# UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

## FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

## DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

# OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE BIOGÁS EN MÉXICO CONSIDERANDO ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES

**TESIS presentada por:**

**LUIS ALBERTO DÍAZ TRUJILLO**

**A la División de Estudios de Posgrado de la**
**Facultad de Ingeniería Química como**
**requisito parcial obtener el**
**Grado de:**
**DOCTOR EN CIENCIAS EN**
**INGENIERÍA QUÍMICA**

**Director: Fabricio Nápoles Rivera**

**Morelia, Michoacán** **Agosto 2020**

## CONTENIDO

CONTENIDO ..... II
RESUMEN ..... IV
ABSTRACT ..... V
DEDICATORIA ..... VI
AGRADECIMIENTOS ..... VII
LISTA DE TABLAS ..... VIII
LISTA DE FIGURAS ..... IX
NOMENCLATURA ..... X
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN ..... 1
1.1 Generalidades ..... 2
1.2 Antecedentes ..... 4
1.3 Justificación ..... 9
1.4 Planteamiento del problema ..... 10
1.5 Hipótesis ..... 11
1.6 Objetivos ..... 11
1.7 Descripción del trabajo ..... 12
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO ..... 13
2.1 Cadena de suministro ..... 14
2.2 Optimización de Procesos ..... 15
2.3. Modelación determinista ..... 16
2.4. Programación lineal ..... 17
2.4.1 Método Simplex ..... 17
2.5. Programación no lineal ..... 20
2.6. Modelado con variables binarias ..... 21
2.7. Programación multiobjetivo ..... 23
2.7.1. Generación de conjunto de soluciones ..... 24
2.8. Programación Estocástica ..... 27
2.8.1 Programación Dinámica Estocástica (PDE) ..... 28
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA ..... 30
3.1 Formulación del modelo determinista ..... 31
3.1.1 Balances de masa y restricciones en la cadena de suministro ..... 31
3.1.2 Ecuaciones considerando aspectos económicos ..... 36

3.1.3 Ecuaciones considerando aspectos ambientales ..... 38
3.1.4 Funciones objetivo ..... 40
3.2 Formulación del modelo estocástico ..... 41
3.2.1 Estrategia multi escenario ..... 41
3.3 Desarrollo de un modelo estocástico para la sustitución de un combustible fósil ..... 45
3.3.1 Implicaciones principales ..... 46
3.3.2 Balances y restricciones ..... 47
3.3.3 Modelo económico ..... 52
3.3.4 Modelo ambiental ..... 53
3.3.5 Funciones objetivo ..... 54
CAPÍTULO 4. RESULTADOS ..... 56
4.1 Resultados y discusión del modelo determinista ..... 57
4.1.1 Caso de estudio ..... 57
4.1.2 Caso de estudio 1 ..... 61
4.1.3 Caso de estudio 2 ..... 67
4.2 Resultados y discusión del modelo estocástico ..... 72
4.2.1 Caso de estudio ..... 72
4.2.2 Resultados del caso ..... 74
4.3 Resultados y discusión del modelo estocástico para sustituir un combustible fósil ..... 81
4.3.1 Caso de estudio ..... 81
4.3.2 Resultados del caso ..... 83
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES ..... 93
REFERENCIAS ..... 97
ANEXOS ..... 107

**OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE BIOGÁS EN MÉXICO CONSIDERANDO ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES**

**Desarrollada por: Luis Alberto Díaz Trujillo**

**Director: Fabricio Nápoles Rivera**

## RESUMEN

Se presenta un enfoque de optimización multiobjetivo para las cadenas de suministro de biogás basado en una superestructura para satisfacer las demandas de biogás y biofertilizante en una región geográfica con el máximo beneficio y el mínimo impacto ambiental. Este enfoque representa la ubicación óptima para las tecnologías de procesamiento y purificación utilizadas para producir el biogás y el biofertilizante, así como para determinar si una tecnología debe instalarse o no. Además, se explora el impacto de la disponibilidad de biomasa y la demanda de biogás en el desempeño económico y ambiental de la cadena de suministro de biogás para lo cual se propone un modelo de programación mixta entera no lineal en forma de objetivos múltiples, y luego el problema se reformula como un problema de mono objetivo con una estrategia de solución de escenarios múltiples y enfoque CVaR. Finalmente, este trabajo busca analizar instrumentos de fijación de precios del carbono en el sector energético mexicano para promover la mejora de la inversión en biogás y sustituir el consumo de gas licuado de petróleo mediante un enfoque de optimización. Además, proponemos un enfoque de optimización multiobjetivo para alentar la inversión en la cadena de suministro de biogás respaldada por un uso efectivo de los esquemas de fijación de precios del carbono.

Se resolvieron algunos casos estudio para una región geográfica en México para mostrar la aplicabilidad de todas las metodologías propuestas para minimizar la brecha de criterios en las funciones económicas y ambientales y para obtener gráficos de probabilidad acumulativa que nos permitan tener un mejor criterio en la toma de decisiones. Los resultados muestran que la implementación de la metodología de optimización propuesta produce importantes beneficios económicos y ambientales debido al aumento simultáneo en el beneficio anual total y el ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero.

***Palabras clave:***

*Biogás, Cadena de suministro, Optimización Multiobjetivo, CVaR, Programación estocástica.*

**OPTIMIZATION OF THE BIOGAS SUPPLY CHAIN IN MEXICO CONSIDERING ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ASPECTS**

**Developed by: Luis Alberto Díaz Trujillo**

**Director: Fabricio Nápoles Rivera**

## ABSTRACT

A multi-objective optimization approach is presented for biogas supply chains based on a superstructure to satisfy the biogas and biofertilizer demands in a geographical region at the maximum profit and the minimum environmental impact. This approach accounts for the optimal location for processing and purification technologies used to produce the biogas and biofertilizer as well as to determine if a technology should be installed or not. Besides, it explores the impact of biomass availability and biogas demand on the economic and environmental performance of the biogas supply chain. A mixed-integer nonlinear programming model is proposed in a multi-objective form and then the problem is reformulated as a single objective problem with a multi-scenario strategy solution and a CVaR approach. Finally, this work seeks to analyze the carbon-pricing instruments in the Mexican energy sector to promote upgrading biogas investment and to substitute liquified petroleum gas consumption using an optimization approach. Furthermore, we propose a multi-objective optimization approach to encourage investment in the biogas supply chain supported by an effective use of carbon-pricing schemes.

Some case studies were solved for a geographical region in Mexico to show the applicability of all proposed methodologies to minimize the criteria gap in economic and environmental functions and to obtain cumulative probability graphs which allow us to have a better criterion in decision making. The results show that the implementation of the proposed optimization methodology yields significant economic and environmental benefits due to the simultaneous increase in the total annual profit and greenhouse gas emission savings.

***Key words:***

*Biogas, Supply Chain, Multi-objective Optimization, CVaR, Stochastic Programming.*

## DEDICATORIA

**A mis papás Fernando Díaz Herrera y Melanie Trujillo Reyes**, cuyo esfuerzo se ve reflejado en cada meta que cumplimos sus hijos, no hay palabra o acto que reflejen todo su apoyo y confianza.

**A mis hermanas María Fernanda y Jessica Paulina**, quienes han sabido ser un apoyo y motivación para realizar correctamente cada meta.

**A mi novia Sofi**, quien con su amor, apoyo y comprensión ha hecho que realice el mayor esfuerzo en cada una de las metas y objetivos que tengo en mente.

## AGRADECIMIENTOS

**A Dios** por permitirme concluir una etapa más en mi vida.

**A mis papás Fernando y Melanie** por haberme enseñado que con esfuerzo, trabajo y constancia todo se consigue, por haberme proporcionado la mejor educación y lecciones de vida, por cada día hacerme ver la vida de una forma diferente y confiar en mis decisiones.

**A mis hermanas Marifer y Pau; y demás familia en general** por el apoyo, cariño y consejos, los cuales me hicieron saber que siempre hay alguien con quien puedo contar. Por ser mi motivación y ejemplo de vida, por enseñarme que el trabajo y la perseverancia rinden frutos.

**Al Dr. Fabricio Nápoles Rivera** por su confianza, paciencia y enseñanzas compartidas, además del tiempo dedicado.

**Al Dr. José María Ponce Ortega, al Dr. Luis Fabián Fuentes Cortés, al Dr. José Apolinar Cortés y al Dr. Agustín Jaime Castro Montoya** por sus consejos y aportaciones para realizar un mejor trabajo.

**A la UMSNH** por ser parte de ella, y haberme abierto las puertas de su seno científico para poder estudiar este Doctorado, **y a sus Profesores** por haberme mostrado las herramientas para el cumplimiento de esta tesis.

**A CONACYT** por el apoyo económico otorgado a través de la beca 330340 para la realización de estos estudios.

**A todos** los que me apoyaron para escribir, ¡y concluir!, esta Tesis.

## LISTA DE TABLAS

**Tabla 3.1** Coste por tonelada de $CO_2$eq en el impuesto sobre las emisiones de carbono (Caso 1). .....55
**Tabla 3.2** Precio por tonelada de $CO_2$eq en el comercio de emisiones de carbono (Caso 2). .....55

**Tabla 4.1** Sectores de demanda de gas L.P. en México. .....57
**Tabla 4.2** Ciudades seleccionadas para el estudio del caso. .....58
**Tabla 4.3** Parámetros económicos para estudio del caso. .....59
**Tabla 4.4** Economías de escala para las tecnologías de purificación. .....60
**Tabla 4.5** Parámetros ambientales para el estudio del caso. .....60
**Tabla 4.6** Resultados para el estudio del caso 1. .....64
**Tabla 4.7** Ubicación y selección optima de las tecnologías para escenarios extremo en los Casos 1 y 2. .65
**Tabla 4.8** Comparación de los caudales para los diferentes escenarios analizados de la curva Pareto para el estudio del caso 1. .....67
**Tabla 4.9** Resultados para el estudio del caso 2. .....70
**Tabla 4.10** Comparación de los caudales para los diferentes escenarios analizados de la curva Pareto para el estudio del caso 2. .....71
**Tabla 4.11** Capacidades de las tecnologías de producción y purificación en el caso de estudio. .....73
**Tabla 4.12** Valores de la función económica y ambiental utilizando la estrategia de solución propuesta con el enfoque CVaR. .....77
**Tabla 4.13** Resultados desglosados para la formulación multiobjetivo. .....91

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 2.1** Representación de una cadena de suministro. ....14
**Figura 2.2** Optimalidad de Pareto. ....24
**Figura 2.3** Métodos de escalarización multiobjetivo. ....25
**Figura 2.4** Método de la suma ponderada. ....26
**Figura 2.5** Método de la restricción épsilon. ....27
**Figura 2.6** Toma de decisión en la incertidumbre de datos. ....27

**Figura 3.1** Superestructura de la cadena de suministro del biogás ....32
**Figura 3.2** Distribución de soluciones óptimas de escenario. ....45
**Figura 3.3** Superestructura para suplir un combustible fósil. ....47

**Figura 4.1** Tipos de biodigestores para el estudio del caso: a) chamber-floating drum type biogas plant, b) digester-floating drum type biogas holder and c) fixed-dome type biogas plant. ....61
**Figura 4.2** Soluciones Pareto para el Caso 1. Ahorro de emisiones GEI. ....63
**Figura 4.3** Soluciones Pareto para el Caso 1. Emisiones GEI. ....63
**Figura 4.4** Solución óptima para el escenario C en el Caso 1. ....66
**Figura 4.5** Solución óptima para el escenario D en el Caso 1. ....66
**Figura 4.6** Solución Pareto para el Caso 2. Ahorro de emisiones GEI. ....68
**Figura 4.7** Solución Pareto para el Caso 2. Emisiones GEI. ....69
**Figura 4.8** Solución óptima para el escenario D en el Caso 2. ....71
**Figura 4.9** Generación de datos aleatorios. ....72
**Figura 4.10** Efecto de incertidumbre asociada a la biomasa disponible en el caso de estudio. ....74
**Figura 4.11** Probabilidad acumulada que maximiza los mejores valores del beneficio. ....75
**Figura 4.12** Probabilidad acumulada que maximiza los mejores valores de emisiones de GEI. ....76
**Figura 4.13** Valores medios de beneficio para el Caso B: A) Probabilidad acumulada minimizando la brecha entre las funciones objetivas y B) Probabilidad para cada escenario. ....78
**Figura 4.14** Probabilidad acumulada de emisiones de GEI minimizando la brecha entre funciones objetivas. ....79
**Figura 4.15** Comparación de la solución de beneficios entre la solución de estrategia propuesta cuando se minimiza la función de objetivo del "gap" y la solución de límite superior. ....80
**Figura 4.16** Comparación de la solución de emisiones de GEI cuando se minimiza función objetiva "gap". ....80
**Figura 4.17** Comparación de beneficios entre biogás y GLP para satisfacer las demandas energéticas de la región geográfica estudiada. ....85
**Figura 4.18** Digestato generado en exceso por la cadena de suministro de biogás a diferentes demandas energéticas de la región geográfica estudiada. ....85
**Figura 4.19** Resultados del régimen de impuestos sobre las emisiones de carbono utilizando los escenarios de la Tabla 3.1 para satisfacer el 10 %, el 20 %, el 50 % y el 100 % de la demanda de energía (Caso 1). ....87
**Figura 4.20** Resultados para el comercio de emisiones de carbono utilizando los escenarios de la Tabla 3.2 para satisfacer el 10%, 20%, 50% y 100% de la demanda de energía (Caso 2). ....88
**Figura 4.21** Resultados para la formulación multiobjetivo mediante el comercio de emisiones de carbono (Caso 3). ....90

## NOMENCLATURA

*Índices*

| | |
|---|---|
| $a$ | Tipo de biogás sin purificar; a $\in A$ |
| $b$ | Tipo de biogás purificado; $b \in B$ |
| $f$ | Lugar donde la biomasa puede ser comprada; $f \in F$ |
| $i$ | Tipos de biomasa; $i \in I$ |
| $j$ | Tecnologías para la producción de biogás; $j \in J$ |
| $k$ | Tecnologías para la purificación de biogás; $k \in K$ |
| $l$ | Lugar donde la tecnología de producción puede ser instalada; $l \in L$ |
| $m$ | Lugar donde la tecnología de purificación puede ser instalada; $m \in M$ |
| $o$ | Mercado para venta de biofertilizante; $o \in O$ |
| $p$ | Mercado para venta de biogás (sin purificar o no); $p \in P$ |
| $q$ | Biofertilizante; $q \in Q$ |
| $s$ | Escenario; $s \in S$ |
| $t$ | Periodo de tiempo; $t \in T$ |

*Variables*

| | |
|---|---|
| $BgRevenue$ | Ingresos asociados a la venta de biogás (sin tratamiento) (€/año) |
| $AvoidEmissions$ | Emisiones de GEI evitadas por el uso de biomasa (ton $CO_2$-eq/año) |
| $BioferRevenue$ | Ingresos asociados a la venta de biofertilizante (€/año) |

| | |
|---|---|
| $ConvEmissions$ | Emisiones de GEI asociadas a las tecnologías de producción y purificación (ton $CO_2$-eq/año) |
| $CapitalCost$ | Costo capital asociado a las tecnologías de producción y purificación (€/año) |
| $DigestateRevenue$ | Ingresos asociados con la venta de digestato (€/año) |
| $Emissions$ | Emisiones de GEI generadas por la cadena de suministro (ton $CO_2$-eq/año) |
| $FixedCost$ | Costos fijos asociados a las tecnologías de producción y purificación (€/año) |
| $FFuelEmission$ | Emisiones de GEI del combustible fresco (ton $CO_2$-eq/año) |
| $FFuelRevenue$ | Ingresos asociados a la venta de combustible fresco (€/año) |
| $FO$ | Función multiobjetivo |
| $GHG$ | Emisiones de GEI (ton $CO_2$-eq/año) |
| $OpCost$ | Costo operacional asociado a las tecnologías de producción y purificación (€/año) |
| $PBgRevenue$ | Ingresos asociados a la venta de biogás purificado (€/año) |
| $PurchBmCost$ | Costos asociados a la adquisición de la biomasa (€/año) |
| $TotalEmission$ | Emisiones totales de GEI de la cadena de suministro (ton $CO_2$-eq/año) |
| $TotalEmissions^{Mean}$ | Promedio de las emisiones totales de GEI de todos los escenarios de la cadena de suministro (ton $CO_2$-eq/año) |
| $TotalEmissionSaving$ | Ahorro total de emisiones de GEI de la cadena de suministro (ton $CO_2$-eq/año) |
| $TotalProfit^{Mean}$ | Promedio de los beneficios económicos totales de todos los escenarios de la cadena de suministro (€/año) |
| $TotalProfit$ | Beneficio económico tota de la cadena de suministro (€/año) |

| | |
|---|---|
| $TransCost$ | Costos asociados al transporte de biomasa, biogás y biofertilizante en la cadena de suministro (€/año) |
| $TransEmissions$ | Emisiones de GEI asociadas al transporte de biomasa, biogás y biofertilizante en la cadena de suministro (ton $CO_2$-eq/año) |
| $UseEmissions$ | Emisiones de GEI asociadas al uso final de biogás y biofertilizante (ton $CO_2$-eq/año) |
| $VarCost$ | Costos variables asociados a las tecnologías de producción y purificación (€/año) |
| $\delta$ | Criterio de holgura "gap" (adimensional) |
| $F$ | Cantidad de materia prima o producto (Ton o $Nm^3$ de producto) |
| $f$ | Solución para la holgura promedio "gap" usando el enfoque CVaR (adimensional) |
| $\gamma$ | Función objetivo normalizada (adimensional) |

*Variables Binarias*

| | |
|---|---|
| $y$ | Variable binaria para la existencia de las tecnologías de procesamiento y purificación. |

*Parámetros*

| | |
|---|---|
| $S$ | Escalar (Numero de escenarios) |
| $H$ | Poder calorífico (GJ/ton) |
| $\eta$ | Coeficiente de demanda ($Nm^3$ o ton) |
| $\chi$ | Factor de eficiencia de las tecnologías de producción o purificación ($Nm^3$/ton, ton/ton o $Nm^3$/ $Nm^3$) |

| | |
|---|---|
| $\omega$ | Coeficiente de capacidad de las tecnologías ($Nm^3$/mes o ton/mes) |
| $\vartheta$ | Disponibilidad de materia prima (ton) |
| $\rho$ | Densidad (ton/$Nm^3$) |

*Parámetros económicos y ambientales*

| | |
|---|---|
| $C$ | Coeficiente de costo (€/ton, €/$Nm^3$ o €) |
| $E$ | Coeficiente de emisiones de GEI (ton $CO_2$-eq/ton o ton $CO_2$-eq/$Nm^3$) |
| $K$ | Factor para anualizar |
| $N$ | Tiempo de vida útil del proyecto (mes o año) |
| $R$ | Precio de productos (€/$Nm^3$, €/ton) |
| $\alpha$ | Tasa de interés para las tecnologías de producción y purificación |

*Superíndices*

| | |
|---|---|
| $Bg$ | Biogás |
| $Bgp$ | Biogás purificado |
| $Bm$ | Biomasa |
| $EQ$ | Condición de igualdad |
| $Fix$ | Fijo |
| $FFuel$ | Combustible fresco |
| $Fr$ | Biofertilizante |
| $GHGEmission$ | Emisiones de GEI |

| | |
|---|---|
| $LB$ | Límite inferior |
| $Mean$ | Promedio |
| $N$ | Normal |
| $Prod$ | Producción |
| $Profit$ | Beneficio económico |
| $Pur$ | Purificación |
| $Source$ | Fuente de suministro |
| $Total$ | Total |
| $Trans$ | Transporte |
| $UB$ | Límite superior |
| $Var$ | Variable |
| $conv$ | Conversión |
| $dem$ | Demanda |
| $excess$ | Exceso |
| $max$ | Máximo |
| $min$ | Mínimo |
| $tech$ | Tecnología |

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se plantean los objetivos generales del proyecto y se da una breve introducción a los problemas de optimización determinista y estocástica, y sus aplicaciones al diseño de cadenas de suministro de energías renovables. También se proporciona una descripción de la organización del trabajo.

## 1.1 Generalidades

Con el aumento de la población, la continua urbanización y la utilización excesiva de combustibles fósiles, es necesario desarrollar estrategias para aumentar el uso de fuentes de energía renovables. La producción de biogás ha demostrado ser una manera factible para sustituir parcialmente a los combustibles fósiles, se ha demostrado que el uso de biogás tiene beneficios económicos ambientales y sociales significativos (Chen et al., 2017; Garbs & Geldermann, 2018; Skovsgaard & Jacobsen, 2017). Los resultados de estudios tecno-económicos revelan que un porcentaje del índice de rentabilidad del sistema es de 60,99% y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a 529.65 toneladas por año $CO_2$ (Teymoori Hamzehkolaei & Amjady, 2018).

El biogás comúnmente se produce con una tecnología de digestión anaeróbica (biodigestor) a partir de diferentes fuentes de biomasa (Q. Zhang et al., 2016). Las fuentes potenciales de biogás incluyen el uso de estiércol animal (excretas) (Iván et al., 2014), desechos urbanos sólidos (Iván et al., 2015), desechos orgánicos, pasto y, estudios recientes, han introducido el uso de algas marinas (Montingelli et al., 2016). Mediante la digestión anaeróbica también es posible producir un bio-digestato que puede procesarse para generar biofertilizante y aumentar la rentabilidad de la producción de biogás (Delzeit & Kellner, 2013). Aunque el tipo de biomasa es uno de los factores más importantes en la producción de biogás (Zaefferer et al., 2016), hay otros factores muy importantes que afectan a su producción y características, algunos estudios buscan optimizarlos. Por ejemplo, encontrar el diámetro óptimo de dos cilindros de etapas separadas del reactor (biodigestor) para aumentar la cantidad de biogás del 64,5% al 71,2% (Markowski et al., 2014), la optimización del tiempo de pretratamiento de biomasa y la concentración de materia orgánica mejorando el 47% de la producción de biogás. El enfoque de análisis para la evaluación técnica, económica y ambiental en el diseño y construcción de biodigestores son aspectos importantes a considerar para la rentabilidad y el rendimiento de un sistema de biogás (Havukainen et al., 2014; Pérez et al., 2014; Stürmer, 2017; Yasar et al., 2017).

El biogás se puede utilizar para producir calor y vapor (por ejemplo, la producción de electricidad y cogeneración), como combustible para vehículos, como sustituto de gas natural en una red doméstica y como inyecciones de gas de rejilla. El uso de biogás depende de su calidad, es decir, que tiene que ser purificado utilizando tecnologías de mejora que permitan eliminar los compuestos que pueden causar una pérdida de eficiencia, daños en el equipo o simplemente evitar consecuencias para la salud. Diferentes tecnologías de mejoramiento se pueden utilizar para la purificación de biogás, en el que la mayoría de las etapas importantes de mejoramiento son la eliminación de la humedad (secado), $H_2S$ (desulfuración) y $CO_2$ (valor de incremento de

calentamiento) (Awe et al., 2017; Miltner et al., 2017). Los compuestos, mencionados anteriormente, se eliminan mediante procesos físicos y químicos, y recientemente, también incluyen procesos fotosintéticos (Toledo-Cervantes et al., 2017). Las características, clasificaciones, configuración y costos de los procesos físicos y químicos se han estudiado en diversos análisis y revisiones (Awe et al., 2017; Miltner et al., 2017; Ullah Khan et al., 2017).

Respecto a la mitigación de GEIs, utilizando la tecnología actual para producir y purificar biogás, se ha demostrado que es posible la reducción de gases en más del 80% (Bekkering et al., 2015b).O bien, si el biogás se purifica o no, el análisis ha demostrado que, implementar un sistema de biogás implica una reducción significativa de emisiones y mitigación de calentamiento global independientemente de la fuente de biomasa (vertederos, estiércol animal, las aguas residuales domésticas, forrajes, carne cruda, etcétera.). Los métodos comunes de análisis ambiental consisten en la implementación del análisis del ciclo de vida (LCA) (Börjesson & Berglund, 2006, 2007; D. & G., 2009; Hardisty et al., 2012),el potencial de mitigación del calentamiento global (GMP) (Jensen & Skovsgaard, 2017; Møller et al., 2009; Otoma & Diaz, 2017; Pathak et al., 2008), el uso de créditos de carbono, el método de cámara cerrada (Vac et al., 2013) y comparación de datos (Chadwick et al., 2011).

Para apoyar la eficiencia energética o el uso de energía renovable, se aplican políticas rigurosas internacionales y nacionales de energía y medio ambiente para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) debido a sus efectos potencialmente dañinos en el clima (Newell et al., 2006). Estas políticas desempeñan papeles importantes para garantizar la seguridad del suministro de energía, coordinar la energía con el desarrollo económico y la protección del medio ambiente, así como abordar el cambio climático global (Liang et al., 2014). Por ejemplo, el precio del carbono proporciona un incentivo financiero para que los consumidores y productores inviertan en tecnologías que reduzcan las emisiones. Esto no solo fomenta la adopción de tecnologías existentes con bajas emisiones de carbono, sino que también indirectamente promueve el desarrollo de otras nuevas (Baranzini et al., 2017). Los impuestos al carbono (CT) y el sistema de comercio de emisiones (ETS) son dos esquemas de política reguladora del carbono practicados a nivel mundial (Du et al., 2016; Xiaoyan Xu et al., 2016). El esquema CT tiene como objetivo controlar las emisiones gravando el carbono generado. A cada emisor de gases de efecto invernadero se le cobra un impuesto proporcional al tamaño de las emisiones generadas (Zakeri et al., 2015), por lo que los precios de los productos y servicios aumentan y la demanda de ellos puede reducirse. La ventaja de implementar un sistema CT es alentar el uso de fuentes alternativas de energía haciéndolas competitivas en costos con combustibles más baratos (Chiu et al., 2015). Por otro lado, en el RCDE, el derecho a emitir carbono es comerciable, y los participantes con altos costos de reducción gastarán dinero en la compra de derechos de emisión para emitir más, mientras que los participantes

con bajos costos de reducción están siendo recompensados por sus emisiones evitadas (Cui et al., 2014). La principal ventaja de la aplicación del comercio de derechos de emisión es garantizar que se cumplan las reducciones esenciales de los objetivos de emisiones de GEI al menor costo posible. La otra ventaja principal de este programa es proporcionar al sector privado la flexibilidad necesaria para reducir las emisiones y, al mismo tiempo, estimular la innovación tecnológica y el crecimiento económico. Este mecanismo proporciona apoyo financiero a los proyectos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero; sin embargo, los efectos en diferentes regiones y diferentes sectores serían diferentes bajo el mismo patrón (Li & Jia, 2017). El Banco Mundial informó en 2018 de que se han implementado 51 iniciativas de fijación de precios del carbono o están programadas para su aplicación, que consisten en 25 ETS (*Carbon-Emission Tax*) y 26 CT (*Carbon Trading*). Estas iniciativas de fijación de precios del carbono cubrirían 11 giga toneladas equivalentes de dióxido de carbono (Gt de $CO_2$e) o aproximadamente el 20% de las emisiones mundiales de GEI. El valor total del RCDE y la CT fue de 82.000 millones de dólares EE.UU., lo que representa un incremento del 56% en comparación con el valor de 2017 de 52.000 millones de dólares EE.UU. (World Bank and Ecofys, 2018). Los precios del carbono se han convertido en uno de los programas estratégicos más importantes utilizados por China para alcanzar sus objetivos de conservación de la energía y mitigación de las emisiones de carbono (Jiang et al., 2016). Sin embargo, algunos países utilizan los ingresos por carbono para complementar los fondos generales del gobierno y los ingresos no se utilizan en alternativas de mitigación de carbono (Carl & Fedor, 2016). Actualmente, los precios del carbono varían sustancialmente, de menos de 1/t$CO_2$e a un máximo de 139 dólares EE.UU./t$CO_2$e; sin embargo, la mayoría de las jurisdicciones tienen precios de carbono sustancialmente inferiores a los necesarios para ser compatibles con el Acuerdo de París (entre 40 y 80 dólares EE.UU.) (World Bank and Ecofys, 2018).

## 1.2 Antecedentes

Satisfacer la demanda de biogás y otros biocombustibles no es una tarea fácil. Sin embargo, una estrategia común para lidiar con el problema es proponer una red de todos los individuos, organizaciones, recursos y tecnologías implicadas en la creación y venta de productos (cadena de suministro). Fundamentalmente, una cadena de suministro involucra aspectos tecno económicos (Bekkering et al., 2010; Hahn et al., 2014; Mirkouei et al., 2017). Sin embargo, una cadena de suministro no solo está delimitada por aspectos económicos, sino que también incluye aspectos ambientales y sociales (Cambero & Sowlati, 2016). Bajo esta premisa, diferentes vías se han propuesto para la generación de bioenergía, cada una con sus implicaciones respectivas; por ejemplo, existe información sobre el diseño de las cadenas de suministro de energía a partir de

estiércol equino usando una modelación matemática que involucra diferentes aspectos: costos debido a la pérdida por almacenamiento y costos por transporte (Svanberg et al., 2017) para la generación de energía a partir de residuos en regiones rurales o agrícolas (Chinese et al., 2014; JIA & JIA, 2017; Mayerle & Neiva de Figueiredo, 2016). Otros estudios apuntan a la optimización de la cadena de suministro de biocombustibles considerando las pérdidas de masa y energía, y además incluyendo aspectos económicos, en donde la tarea principal es encontrar un plan de producción e inversión para la ubicación de una planta (Jensen et al., 2017). También se ha propuesto el uso de una metodología integrada, que combina un sistema de información geográfica con simulación y optimización para minimizar el costo promedio de la cadena de producción de biocarburantes a partir de biomasa lignocelulósica (F. Zhang et al., 2016) o incorporar el uso de un método numérico basado en el principio "*Time Based Pinch Analysis"* para reducir los desechos eliminados y las emisiones de gases de efecto invernadero (Othman et al., 2017).

Respecto al aumento de la demanda de biocombustibles en una región geográfica, varias soluciones se han propuesto; por ejemplo, hacer una optimización basada en la efectividad de precio y costo (Bekkering et al., 2015a). Otras formulaciones incluyen una optimización de la cadena de suministro multi producto, que significa hacer uso de una representación gráfica general que captura las dependencias entre diferentes números de productos, tecnologías y rutas de transporte, así como la relación entre las emisiones de gases de efecto invernadero y las ganancias económicas (una optimización multiobjetivo) (Lyng et al., 2018; Sampat et al., 2017). Además, recientemente se ha incorporado el impacto de los costos externos (es decir, los costos impuestos por las desventajas ambientales generadas a partir de la conversión de energía que no se reflejan en el precio de la energía misma) y los beneficios sociales (por ejemplo, la creación de empleo) para cadenas de biocombustibles (Cambero & Sowlati, 2016; Patrizio et al., 2017).

Sin embargo, la viabilidad tecno-económica de una cadena de suministro de biogás, al igual que otras, está sujeta a diferentes problemas, como la disponibilidad de materia prima, las tecnologías que podrían utilizarse para convertir la materia prima en productos de valor agregado, la distribución a mercado, la incertidumbre asociada con la fuente de biomasa, la variabilidad en la demanda de biogás debido a la fluctuación económica y eventos inusuales (Khishtandar, 2019; Wen et al., 2017; Y. Zhang & Jiang, 2017), etcétera. Por estas razones, el diseño, la formulación, estudio y análisis de la cadena de suministro considerando la naturaleza estocástica del problema junto con estrategias precisas de optimización es de suma importancia (Abdelaziz, 2012).

En este sentido, una estrategia de optimización precisa para resolver problemas en presencia de incertidumbres debe tener en cuenta la medida de los riesgos económicos, ambientales y sociales, junto con la importancia de las partes interesadas en la toma de decisiones del proceso. Las

estrategias basadas en el análisis del Valor Condicional en Riesgo (CVaR, *Conditional Value at Risk*) se han utilizado como estrategias útiles para resolver problemas de optimización de escenarios múltiples y objetivos múltiples asociados a los sistemas de energía (Cao et al., 2017) (es decir, el problema involucra más de una función para ser maximizado o minimizado y al mismo tiempo implica la variabilidad de algunos parámetros que constituyen las funciones objetivo).

El valor condicional en riesgo (CVaR) es una medida de riesgo basada en el cálculo de la desviación máxima del elemento con respecto a un elemento descriptivo paramétrico de una distribución simétrica continua o discreta. Se introdujo tempranamente como una medida relacionada de riesgo financiero y se definió como la expectativa condicional de pérdidas que exceden el VaR (*Value at Risk*) en un nivel de confianza dado. El VaR también se define como un percentil de una función de pérdida (Rockafellar & Uryasev, 2002; Topaloglou et al., 2002; Uryasev, 2000). Con respecto a las contribuciones de CVaR, diferentes trabajos han abordado la programación estocástica que considera el análisis de la incertidumbre bajo diferentes aspectos. Por ejemplo, un análisis de riesgo utilizando el CVAR para la cadena de suministro de etanol en comparación con la evaluación del eNPV (Valor Presente Neto Extendido), concluyeron que, los resultados rentables siempre se obtienen maximizando el eNPV, incluso cuando se supone que el precio puede caer a través de los años. Sin embargo, la minimización del CVAR limita las configuraciones rentables porque el riesgo de inversión y la volatilidad del mercado ahora se tienen en cuenta (Dal-Mas et al., 2011). El uso del enfoque CVaR para una cadena de suministro de petróleo también mostró que la optimización de varios escenarios puede aumentar el Valor Presente Neto esperado utilizando la incertidumbre en los coeficientes de precio de la función objetivo al restringir el número de escenarios de realización que producirán bajos rendimientos por debajo de un mínimo valor establecido para las restricciones del CVaR basadas en la distribución de pérdidas (Carneiro et al., 2010). Mientras que, un estudio sobre el diseño de una cadena de suministro de una biorrefinería de hidrocarburos para el Estado de Illinois demostró que la gestión de CVaR es más conveniente y efectiva que la gestión de riesgos a la baja, proponiendo un modelo MILP (*Mixed-Integer Lineal Programming*) de programación estocástica de objetivos múltiples que minimiza el costo anual (Gebreslassie et al., 2012). En otro estudio, la introducción del CVaR basada en un modelo de cooperación entre un fabricante y un minorista en una cadena de suministro demostró que es eficiente para equilibrar sus prioridades, minimizar sus concesiones y controlar el riesgo financiero debido a la fluctuación en la demanda del mercado (Xinsheng Xu et al., 2015). Otros procesos como la gestión de energía renovable en sistemas con generaciones distribuidas y vehículos eléctricos han incorporado modelos de CVaR para minimizar el valor de riesgo de pérdida de energía (Wu et al., 2018). Para el caso de los proyectos de biogás, se ha aplicado un enfoque CVaR para estudiar las implicaciones de la inserción de biogás en las carteras de productos

en el sector de la caña de azúcar, lo que demuestra que este enfoque puede ser una herramienta poderosa para evaluar el impacto de las políticas de precios en la toma de decisiones (de Moraes Dutenkefer et al., 2018).

Por otro lado, el marco de múltiples partes interesadas ("Multi-stakeholder") incorpora las opiniones de las partes interesadas en cuatro enfoques principalmente (de Gooyert et al., 2017): criterios y ponderaciones, alternativas políticas, árboles de valores múltiples y ponderaciones de las partes interesadas. Todos estos enfoques buscan identificar soluciones que aumenten la oportunidad de implementación y el beneficio de los proyectos. Varios estudios han incorporado el uso del marco de múltiples partes interesadas con incertidumbre, por ejemplo, en la mitigación de la quema y venteo para reducir el impacto ambiental y el costo operativo de los sistemas de cogeneración utilizando un modelo de optimización de objetivos múltiples (Tovar-Facio et al., 2017), maximizar el beneficio de los participantes para la planificación estratégica del sistema municipal de gestión de residuos sólidos considerando la variabilidad en la disponibilidad de residuos sólidos y el precio de los productos (Diaz-Barriga-Fernandez et al., 2018), así como investigar el diseño y las operaciones óptimas de las cadenas de suministro que combinan la integración del *leader-follower Stackelberg game* (Gao & You, 2018) o el uso de métodos de toma de decisiones con múltiples atributos (Wheeler et al., 2018) con un énfasis de objetivos múltiples.

Recientemente, se han desarrollado entornos de toma de decisiones de múltiples partes interesadas que involucran un enfoque de CVaR que busca equilibrar las prioridades de las partes interesadas que parametrizan el CVaR por un nivel de probabilidad que permite dar forma a la cola de la distribución de insatisfacción, lo que significa que se le puede atribuir más significado a una solución compromiso, ya sea la minimización de la insatisfacción promedio y el peor de los casos. En consecuencia, se han resuelto estudios de caso para ubicar instalaciones de procesamiento de residuos biológicos con optimización multiobjetivo y evaluar el impacto de la demanda de electricidad y agua caliente para los ocupantes de los edificios en los sistemas combinados de calor y energía (Dowling et al., 2016; Fuentes-Cortés, Ponce-Ortega, et al., 2018).

Finalmente, algunas obras han estudiado el efecto de los precios del carbono para promover alternativas bajas en carbono en los procesos industriales (Tovar-Facio et al., 2019), la cadena de suministro (Qiu et al., 2017) y el complejo de edificios residenciales (Fuentes-Cortés et al., 2017; Fuentes-Cortés, Ma, et al., 2018). Por ejemplo, Gonela (Gonela, 2018) mostró las ventajas y desventajas ambientales y económicas de varios esquemas de emisión de carbono (límite y comercio de carbono, límite de carbono e impuesto al carbono) en el diseño de una cadena de suministro de electricidad híbrida que combina biomasa y carbón. La generación de electricidad basada. Yu y col. (Yu et al., 2018) estudiaron diferentes políticas de impuestos a las emisiones en

una red de cadena de suministro de varios niveles y sus resultados mostraron que las políticas fiscales combinadas con otros factores pueden ayudar a reducir la huella de carbono total que respalda tecnologías más sostenibles para el transporte. Bing y col. (Bing et al., 2015) propsieron utilizar los ETS como un instrumento para facilitar una red global de reciclaje. La decisión clave es la reubicación de las plantas de reprocesamiento de plástico (es decir, mudarse de Europa a China), y los resultados muestran que los ETS alienta a los reprocesadores a cambiar a un proceso de producción de emisiones más bajas, lo que conduce a una reducción de las emisiones en el sector de reprocesamiento, y las posibilidades de reubicación mejoraron rendimiento de la red que redujo los costos totales y las emisiones de transporte.

Por lo tanto, este trabajo presenta un enfoque de optimización para las cadenas de suministro de biogás. El modelo de optimización está formulado como un problema de optimización de objetivos múltiples para satisfacer las demandas de biogás y biofertilizantes en una región geográfica. Este enfoque también explica la ubicación óptima para las tecnologías de procesamiento y purificación utilizadas para producir el biogás y el biofertilizante, así como determinar si una tecnología debe instalarse o no. Un objetivo es maximizar el beneficio total teniendo en cuenta los ingresos generados por la venta de productos, los costos de capital asociados con el transporte, los costos fijos y variables. La otra función objetivo es maximizar el ahorro de las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por la cadena de suministro de biogás. Sin embargo, debe señalarse que ninguno de los trabajos mencionados anteriormente ha considerado la implementación del enfoque de múltiples partes interesadas y CVaR para analizar el impacto de la incertidumbre en una cadena de suministro de biogás. En este caso, el enfoque de escenarios múltiples está vinculado a la disponibilidad del sustrato, materia prima demanda, etcétera. Como consecuencia, es importante discriminar escenarios extremos basados en una medida estadística. En este caso, el enfoque CVaR se utiliza como criterio para reducir la influencia de soluciones óptimas de Pareto extremas en un entorno de múltiples escenarios y objetivos múltiples. Además, el trabajo se centra en el estudio del efecto de una sustitución a gran escala de combustibles fósiles por combustibles renovables en el sector centro oeste de México para aprovechar la alta producción de estiércol animal, desechos orgánicos municipales, lodos de depuradora y residuos agrícolas. En este caso, ETS y CT se utilizan para apoyar el consumo de energía renovable. Además, combinamos un método de optimización de objetivos múltiples con ETS para mejorar las ventajas ambientales y económicas de este esquema.

## 1.3 Justificación

El biogás es un bioenergético capaz de sustituir a los combustibles fósiles en la generación de energía. Se considera que existe un potencial de 3000 MW para la generación de energía eléctrica a través de biogás proveniente de la recuperación y aprovechamiento del metano de la descomposición de residuos animales, residuos sólidos urbanos y el tratamiento de aguas negras. Dado el valor calorífico del biogás, 23 $MJ/m^3$, sus principales usos en México están relacionados con la generación de electricidad y calor. Sin embargo, el aprovechamiento de este bioenergético, en la actualidad, aun exige la creación de nuevas tecnologías y estrategias para la producción eficiente, es decir que maximicen el beneficio económico y minimicen el impacto ambiental.

En el aspecto ambiental, las emisiones de gases de efecto invernadero del biogás son menores en comparación con otros combustibles. Por ejemplo, investigaciones plantean que el biogás empleado como combustible en los vehículos produce 80% menos Óxido Nitroso ($N_2O$) que el diésel; además de menos emisiones de partículas (Energy Saving Trust, 2008). En el sector ganadero, usar excretas para producir biogás juega un rol pivote en la integración de las granjas ganaderas, reduciendo el riesgo a la salud, facilitando el control de la contaminación y al mismo tiempo añadiendo valor agregado a los subproductos (Preston & Rodriguez, 2007).

Por otra parte, las políticas y regulaciones en México para la producción, manejo y distribución del biogás todavía son muy débiles y limitadas. A continuación, se mencionan las principales limitaciones, de manera general, que se pueden presentar en la implementación de un proyecto de biogás (Nevzorova & Kutcherov, 2019).

*Limitaciones técnicas:* Principalmente se deben a retos infraestructurales (disponibilidad de materia prima en algunas zonas geográficas), una mala recolección, la falta de transporte adecuado, además de una baja disponibilidad de tecnologías de biogás locales, la inexperiencia y falta de capacitación del personal operador, entre otras más.

*Limitaciones económicas:* Se requieren altos costos de inversión, aunado a la indisponibilidad de préstamos bancarios con tasas de interés preferenciales, pobreza generalizada de algunas zonas geográficas, la falta de subsidios gubernamentales, así como la falta de inversión en investigación y desarrollo.

*Limitaciones de mercado:* Se deben a los bajos precios de combustible fósil en comparación con el precio del biogás, la competencia con la biomasa, leña y otros productos utilizados para generar energía. Además, la dificultad de competir a grandes volúmenes para satisfacer las altas demandas por ser un mercado minorista.

*Limitaciones institucionales:* Aquí se encuentran la falta de apoyo político y programas para promover tecnologías de biogás debido a que el panorama político es muy dinámico, incierto e inestable. Sumado a la difícil coordinación entre el sector público y privado.

*Limitaciones socio-culturales:* La estigmatización del material utilizado para la generación de biogás, el bajo nivel de conocimiento de la población en general se vuelven un problema a la hora de implementar un proyecto de esta índole.

*Limitaciones ambientales:* Debidas principalmente por el uso de agua que, si bien no podría presentar problemas en temporadas húmedas, sí lo haría en temporadas de sequía o con disponibilidad limitada de este recurso.

Lo anterior crea la necesidad de generar o mejorar procesos y tecnologías que permitan la sustentabilidad del valor de cadena de éste. Por consiguiente, el desarrollo de nuevas tecnologías y metodologías traerá consigo la implementación de nuevas normas y políticas que aseguren el bienestar social, ambiental y económico para la cadena de suministro de este bioenergético.

## 1.4 Planteamiento del problema

Dada la disponibilidad de biomasa de diferentes fuentes, las demandas de biogás y biofertilizantes para diferentes usos, el período de tiempo donde se requieren estas demandas, las ubicaciones donde se pueden instalar tecnologías de procesamiento y purificación, las características tecnológicas (capacidad y rendimiento) y la distancia entre ciudades y localidades; entonces, el problema consiste en sintetizar la cadena de suministro de biogás para satisfacer las demandas de biogás en una región geográfica en diferentes períodos a través de la instalación óptima de tecnologías de procesamiento y purificación para biogás y biofertilizante, así como determinar si una tecnología debe instalarse o no y, en consecuencia, la optimización de toda la operación para el sistema. La solución óptima debe tener en cuenta la red configuración, materias primas, transporte y transformación en productos finales con el máximo beneficio económico y el máximo ahorro de emisiones de efecto invernadero.

Además, se considera a la disponibilidad de biomasa y a la demanda como variables inciertas y, bajo esta premisa, se evalúa la brecha entre múltiples escenarios en condiciones de igualdad (enfoque CVaR) para cumplir con los siguientes objetivos: i) maximizar el desempeño económico de la cadena de suministro de biogás (Beneficios Generales) y (ii) minimizar el impacto del calentamiento global (en términos de Emisiones GEI Generales). El problema multiobjetivo se reformula como un problema de un solo objetivo con una solución de estrategia multi escenario y

un enfoque CVaR mediante el análisis del comportamiento de los datos utilizando parámetros estadísticos.

Finalmente, esta tesis se plantea la problemática de la sustitución de combustibles fósiles por combustibles renovables utilizando esquemas de fijación de precios de emisiones de carbono evaluando un esquema de *Carbon Taxes* (Impuestos al carbono) y un esquema de *Carbon Trading* (Comercio de carbono).

## 1.5 Hipótesis

El desarrollo de modelos de optimización para la cadena de valor de biogás en México permitirá obtener información para asistir la mejor toma de decisiones que ayudará a disminuir el costo, el impacto ambiental y social asociado a la producción, distribución y generación de valor agregado de éste.

## 1.6 Objetivos

El objetivo general consiste en elaborar y aplicar estrategias de modelación y programación para obtener la mejor toma de decisión para la producción, distribución y purificación del biogás en México, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales.

Objetivos particulares

- Proponer una superestructura para la producción, distribución y generación de valor agregado para el biogás en México.
- Desarrollar un modelo matemático multi escenario y multiobjetivo usando el concepto del CVaR (*Conditional Value at Risk*), el cual permita obtener rutas óptimas de distribución de materia prima, producción y distribución de biogás considerando el impacto económico y ambiental.
- Seleccionar las tecnologías apropiadas para la producción y purificación de biogás, y biofertilizante o digestato.
- Generar escenarios a partir de la distribución histórica de la disponibilidad de biomasa y demanda del biogás que permitan evaluar el efecto de la incertidumbre asociado a estos parámetros en los aspectos económicos y ambientales.
- Analizar la factibilidad de sustitución de un combustible fósil por biogás utilizando incentivos o penalizaciones económicas en favor de la mitigación de gases de efecto invernadero.

## 1.7 Descripción del trabajo

En el capítulo 2 se da una breve introducción al concepto de cadena de suministro, modelado determinista y estocástico, posteriormente se plantean los principios básicos de optimización, programación lineal y no lineal. Finalmente se plantea el uso de variables binarias en la optimización y el establecimiento de análisis multi objetivo. En el capítulo 3 se describe el desarrollo del modelo matemático, primero haciendo una modelación determinística para después proseguir con un modelado estocástico, para finalmente establecer un modelo para sustituir un combustible fósil por biogás. En el capítulo 4 se presentan los resultados de la aplicación de los modelos desarrollados en las secciones anteriores, además de la discusión correspondiente analizando diferentes estudios de caso. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las principales conclusiones y recomendaciones de este trabajo, así como las expectativas hacia un trabajo futuro.

# CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

Este capítulo presenta del fundamento teórico para la comprensión de la cadena de suministro, así como los principios básicos de la optimización, el fundamento del modelado determinista y estocástico, también se da una introducción al modelado de variables viarias y modelación multi objetivo.

## 2.1 Cadena de suministro

La cadena de suministro (SCM por sus siglas en inglés, Supply Chain Management) es un subsistema dentro del sistema organizacional que abarca la planificación de las actividades involucradas en la búsqueda, obtención y transformación de los productos. Incluye la coordinación y colaboración de los socios del canal, o flujo de transmisión de los insumos o productos, sean estos proveedores, intermediarios, funcionarios o clientes. En cada etapa interesa la medición correcta del flujo para evitar mermas y desperdicios. En esencia, la Cadena de suministro integra la oferta y la demanda tanto dentro como fuera de la empresa.

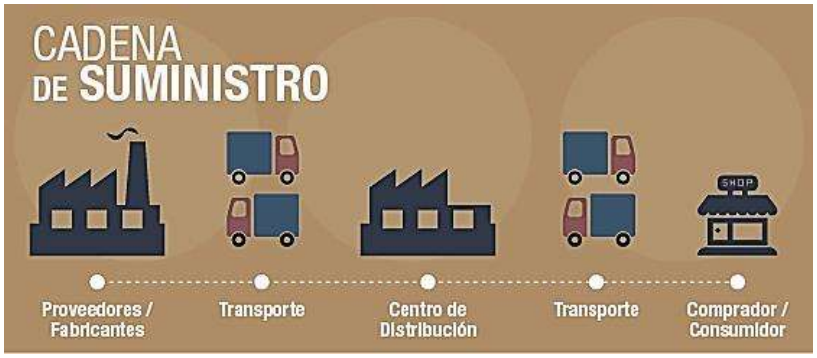



***Figura 2.1*** *Representación de una cadena de suministro.*

Una cadena de suministro consta de tres partes: el suministro, la fabricación y la distribución. La parte del suministro se concentra en cómo, dónde y cuándo se consiguen y suministran las materias primas para fabricación. La fabricación convierte estas materias primas en productos terminados y la distribución se asegura de dichos productos finales llegan al consumidor a través de una red de distribuidores, almacenes y comercios minoristas. Se dice que la cadena comienza con los proveedores y termina con los clientes de tus clientes.

La gestión de la cadena de suministro es la planificación, organización y control de las actividades de la cadena de suministro. En estas actividades está implicada la gestión de flujos monetarios de productos o servicios de información, a través de toda la cadena de suministro, con el fin de maximizar, el valor del producto/servicio entregado al consumidor final, a la vez que se disminuyen los costes de la organización.

Una exitosa cadena de suministros entrega al cliente final el producto apropiado, en lugar correcto y en el tiempo exacto, al precio requerido y con el menor costo posible. Las cadenas de suministros agrupan los procesos de múltiples compañías, así como a las diferentes divisiones y departamentos de nuestra empresa. Definida de una forma sencilla, SCM engloba aquellas actividades asociadas con el movimiento de órdenes, control de inventarios, transportación almacenamiento y servició al cliente.

Las correctas prácticas en toda la cadena de suministro generaran valor en cualquier producto, siendo esto un punto clave en porque las empresas hoy en día buscan cada día mayor eficiencia en sus cadenas de suministro, con mejoras en planificación de la logística relacionada con la cadena.

## 2.2 Optimización de Procesos

Los problemas que se aborda en la Optimización de Procesos se pueden clasificar de diferentes formas. Atendiendo a la certidumbre de los datos, se dividen en:

(a) *Modelos determinísticos,* en los cuales todos los datos se suponen conocidos.

(b) *Modelos probabilísticos o estocásticos,* en los cuales los datos se consideran inciertos y vienen dados por distribuciones de probabilidad.

(c) *Modelos híbridos,* en los cuales se utiliza la combinación de los modelos de programación anteriores.

Sí se toma en consideración el objetivo del problema, es decir cuando el problema es minimizar o maximizar una función sujeta a limitaciones, el problema se puede clasificar en:

(a) *Problema de secuenciación.* Decidir el orden a procesar, por ejemplo, determinar el orden a procesar de varias máquinas de trabajo que requieren distintos tiempos de ejecución, minimizando el tiempo de producción.

(b) *Problema de localización.* Evaluación de problemas de asignación y transporte, por ejemplo, minimizar el costo del uso de un recurso limitado desde cierto origen a otro destino.

(c) *Problema de ruta.* Determinación de la mejor ruta de varias posibles en un proceso, por ejemplo, el problema del viajante de comercio.

(d) *Problema de búsqueda.* Búsqueda de información para tomar una decisión, por ejemplo, realizar una exploración de la tierra para encontrar recursos naturales.

Cuando se requiere predecir un suceso a partir de ciertas condiciones conocidas, el problema se puede clasificar en:

(a) *Problema de remplazamiento o sustitución.* Búsqueda de sustitución de manera preventiva o correctiva, por ejemplo, sustituir alguna máquina de proceso para evitar desgaste o fallas.

(b) *Problema de inventario.* Determinación de la disponibilidad de recursos en un proceso, por ejemplo, conocer la disponibilidad de ciertos productos en un almacén, tienda, etcétera.

(c) *Problema de líneas de espera.* Conocer la demanda de un servicio o producto en función del tiempo.

(d) *Problema de teoría de juegos.* Estudio de interacciones en estructuras formalizadas de incentivos.

## 2.3. Modelación determinista

Este tipo de modelos abordan la programación y características de una solución óptima (es decir, un minino o un máximo) de funciones no convexas restringidas a un dominio especifico. Dada una función objetivo f para ser maximizada o minimizada con restricciones de igualdad o desigualdad S, la optimización determinista se enfoca en los siguientes puntos importantes (Floudas, 2000):

1. Determinar un mínimo o un máximo de una función objetivo sujeto a un conjunto de restricciones.

2. Determinar los limites superiores e inferiores sobre el mínimo o máximo de la función objetivo en S, los cuales deben ser válidos para toda la región factible del conjunto de restricciones.

3. Incluir todas las soluciones del conjunto de restricciones de igualdad y desigualdad.

De acuerdo a lo establecido en los puntos anteriores, un problema se puede abordar en obtener un mínimo global o un mínimo local. Si se aborda como optimización global, la solución obtenida será el valor más bajo para una función objetivo en el conjunto S, pero si se delimita a un área de optimización local (una búsqueda en un área específica), la solución factible será un mínimo local de la función objetivo en el conjunto S. De esto resulta que, en los problemas de optimización no lineales, un mínimo local representa un límite superior en el mínimo global de la función objetivo dado que en este tipo de funciones existen múltiples mínimos locales.

Por otro lado, en los modelos deterministas, los datos o parámetros, utilizados para definir el problema a resolver, se conocen con certeza, es decir, no contemplan la existencia del azar ni el principio de incertidumbre. Por lo que, las mismas entradas producirán invariablemente las mismas salidas. Esto depende de la influencia que puedan tener los factores no controlables, en la determinación de los resultados de una decisión y también en la cantidad de información que el tomador de decisión tiene para controlar dichos factores. Generalmente si en el modelo se han tomado en cuenta todas las variables y relaciones importantes, este se vuelve tan complejo de modelos matemáticos necesarios. Por lo tanto, se deben utilizar modelos parciales teniendo claro

que las soluciones obtenidas no son óptimas, y que el modelo que se está usando. Si un modelo garantiza encontrar la solución óptima, el proceso de solución para dicho modelo se llamará algoritmo de optimización. Se define como algoritmo a una serie de instrucciones en una cierta secuencia lógica, necesarias para describir las operaciones que llevan a la solución de un problema. No siempre los algoritmos conducen a soluciones óptimas, Sin embargo, en investigación de operaciones se hacen todos los esfuerzos posibles para encontrar algoritmos de optimización. Este tipo de algoritmos son exclusivos de los modelos deterministas.

## 2.4. Programación lineal

La programación lineal (LP) es una técnica matemática relativamente reciente (siglo XX), que consiste en una serie de métodos y procedimientos que permiten resolver problemas de optimización. Para sistemas donde se involucran muchas variables, el procedimiento no es tan sencillo y se resuelven por el llamado método Simplex (ideado por G.B. Dantzig, matemático estadounidense en 1951).

Cualquier problema de LP consta de una función objetivo y un conjunto de restricciones. En la mayoría de los casos, las restricciones provienen del entorno en el cual se trabaja para lograr el objetivo. Cuando se quiere lograr el objetivo deseado, el entorno fija ciertas restricciones (es decir, dificultades, limitaciones) para cumplir con su deseo (vale decir, el objetivo).

Cuando se formula un problema de toma de decisiones como un programa lineal, se deben verificar las siguientes condiciones:

1. *La función objetivo debe ser lineal.* Se debe verificar que todas las variables estén elevadas a la primera potencia y que sean sumadas o restadas (no divididas ni multiplicadas).
2. *El objetivo debe ser ya sea la maximización o minimización de una función lineal.* El objetivo debe representar la meta del decisor.
3. *Las restricciones también deben ser lineales.* Asimismo, la restricción debe adoptar alguna de las siguientes formas (>=, <=, =, es decir que las restricciones de LP siempre están *cerradas*).

### *2.4.1 Método Simplex*

El método está sujeto a dos teoremas:

1. El conjunto de posibles soluciones o conjunto factible de cualquier problema de LP puede representarse mediante un poliedro convexo.

2. Si un LP tiene una solución óptima y finita, ésta estará en un vértice del poliedro convexo que representa al problema de LP.

La expresión general de un LP es:

$$\begin{aligned} Max\ (z) &= c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n \\ a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n &\le b_1 \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n &\le b_m \end{aligned} \qquad \forall x_j \ge 0 \tag{2.1}$$

Siendo las matrices:

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}; \boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}; \boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{2n} \\ \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{mn} \end{bmatrix}; \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

De todo lo anterior se deduce que, puesto que el número de vértices de cualquier poliedro factible es finito, el número de posibles soluciones de un LP también es finito. Además, sugiere un posible algoritmo para obtener la solución óptima. Consiste en calcular el valor de la función objetivo en cada uno de los vértices del conjunto factible y escoger el mejor. Para ilustrar esta idea empezaremos planteando un problema de LP en su forma canónica.

$$Max\ (z) = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j \qquad \forall i \in \{1, \dots, m\} \qquad \forall j \in \{1, \dots, n\}$$

Sujeto a: (2.3)

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \le b_j \quad x_j \ge 0$$

Añadiendo variables de holgura a cada una de las restricciones se obtendría la formulación equivalente:

$$Max\ (z) = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j \qquad \forall i \in \{1, \dots, m\} \qquad \forall j \in \{1, \dots, n\} \tag{2.4}$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j + s_i \leq b_j \quad x_j \geq 0 \qquad s_i \geq 0$$

El número de vértices del conjunto factible del problema es:

$$\begin{bmatrix} m+n \\ m \end{bmatrix} = \frac{(m+n)!}{(m)!\,(m+n-m)!} \tag{2.5}$$

La cantidad *m* + *n* refleja el número de variables originales (*n*) más las variables de holgura (una para cada ecuación, en total *m*). Las posibles soluciones serán tantas como combinaciones de *m* + *n* variables tomadas en bloques de *m*. Cada bloque de m variables con m restricciones dará lugar a la solución exacta de un sistema de ecuaciones de dimensión *m x m*.

El método Simplex no recorre explícitamente todos los vértices del conjunto factible, sino que, en cada iteración, comprueba si existe un cambio de vértice que mejore la solución actual. Si no existe ningún vértice mejor que el actual, el proceso se detiene puesto que se ha llegado al óptimo.

El concepto de vértice es de naturaleza geométrica y resulta, por tanto, poco adecuado para construir a partir de él un algoritmo utilizable por computadoras. Por ello, el método Simplex se basa en un concepto algebraico muy similar: el de solución básica factible (SBF).

De una manera más formal, a partir del sistema de ecuaciones:

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j + s_i \leq b_j \quad s.a.\ s_i \geq 0\ ; \qquad \forall i \in \{1, \dots, m\} \qquad \forall j \in \{1, \dots, n\} \tag{2.6}$$

Se dice que una solución básica es aquella que tiene al menos n-m componentes nulos o variables no básicas a las que llamamos $\boldsymbol{X_N}$. Las *m* variables restantes se denominan variables básicas y las denominamos $\boldsymbol{X_B}$. Formalmente, a partir del sistema siguiente **Ax = b**, se dice que $\boldsymbol{X_B}$ es una solución básica del mismo si puede realizarse la partición:

$$\boldsymbol{A} = [\boldsymbol{B}|\boldsymbol{N}]$$
$$\boldsymbol{x} = [\boldsymbol{x_B}|\boldsymbol{x_n}]$$
$$\boldsymbol{Ax} = \boldsymbol{b} \rightarrow [\boldsymbol{B}|\boldsymbol{N}]\begin{bmatrix}\boldsymbol{x_B} \\ \boldsymbol{x_N}\end{bmatrix} = \boldsymbol{Bx_B} + \boldsymbol{Nx_N} = \boldsymbol{b}$$
Si $\boldsymbol{x_N} = 0$ (2.7)

$$\boldsymbol{B^{-1}Bx_B} = \boldsymbol{B^{-1}b}$$
$$\rightarrow \boldsymbol{x_B} = \boldsymbol{B^{-1}b}$$

Existen varios tipos de solución básica:

*a) Solución básica factible (SBF).* Todas las variables básicas son mayores o iguales que cero.

*b) Solución básica factible no degenerada.* Todas las variables básicas son estrictamente positivas.

*c) Solución básica factible degenerada.* Alguna variable básica toma un valor nulo.

Puede demostrarse que cada SBF representa un vértice del conjunto factible. Sin embargo, un vértice puede ser representado por más de una SBF, si la solución es degenerada.

El algoritmo del Simplex busca el óptimo de un problema de P.L. recorriendo sólo algunos de los vértices del poliedro que representa el conjunto de soluciones factibles. En cada iteración, al algoritmo se desplaza de un vértice a otro de forma que el valor de la función objetivo mejore con el desplazamiento, esto es, que aumente si el problema es de maximización, o disminuya si el problema es de minimización.

La optimización de un P.L. puede dar lugar a cuatro posibles resultados:

a) Alcanzar un óptimo único.

b) Alcanzar un óptimo que no es único (soluciones alternativas o múltiples).

c) Concluir que el problema es no factible, esto es, que no existe ninguna solución que satisfaga simultáneamente todas las restricciones del problema.

d) Concluir que el problema es no acotado, es decir, que el valor de la función objetivo en el óptimo es tan grande como se desee si el problema es de maximización, o tan pequeño como se quiera si el problema es de minimización.

El método Simplex alcanza siempre uno de estos resultados en un número finito de iteraciones. En cada iteración se pasa de una solución básica factible a otra, de manera que, en el proceso, el valor de la función objetivo mejora en cada iteración. Cuando se determina que no existe ninguna SBF con un mejor valor de la función objetivo que el actual se detiene el proceso puesto que se ha llegado al óptimo.

## 2.5. Programación no lineal

Un problema no lineal (NLP) es un problema de programación matemática donde la función objetivo o alguna restricción es no lineal. La forma general se da a continuación:

$$Max(Min)\ f(x_1, x_2, \dots, x_n) \tag{2.8}$$

$g_1(x_1, x_2, \dots, x_n)(\leq, =, \geq)b_1$
$g_2(x_1, x_2, \dots, x_n)(\leq, =, \geq)b_2$
$g_m(x_1, x_2, \dots, x_n)(\leq, =, \geq)b_m$

Como en Programación lineal la función $f(x_1, , x_2, \dots, xn)$ es la función objetivo del NLP y $g_i(x_1, x_2, \dots, x_n)(\leq, =, \geq)b_i$ , $i = 1, \dots, m$ son las restricciones del mismo. Además, se supone que estas funciones son diferenciables. Note que las características y propiedades de los NLP son distintas a las de LP y los algoritmos de optimización son también diferentes a los utilizados en LP.

Existen dos tipos de programación no lineal.

- *Sin restricciones:* Estos problemas son un programa matemático para los que las variables de decisión no están restringidas. Su formulación es de la siguiente forma:
  $Max(Min)\ f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ (2.9)

- *Con restricciones:* La formulación de este tipo de problemas responde a la formulación general presentada al comienzo de esta sección. El estudio del problema con restricciones comenzó abordando solamente el problema con restricciones de igualdad, teniendo sus orígenes en el siglo XVIII. El problema con restricciones de desigualdad tiene una historia más reciente, de hecho, hasta los años cincuenta del pasado siglo no se tratan estos. Note que los problemas con restricciones de desigualdad permiten reflejar la realidad en términos matemáticos mejor que los problemas con restricciones de igualdad, ya que no limitan tanto la elección de los valores de las variables de decisión. Los problemas con restricciones de igualdad suelen considerarse como poco realistas debido a lo restrictivo de su planteamiento. Sin embargo, el estudio de ellos se considera interesante ya que es de utilidad en distintas áreas de conocimiento.

## 2.6. Modelado con variables binarias

Un problema en el que aparecen variables continuas y variables discretas (nosotros nos vamos a ceñir al caso de variables binarias variables que sólo pueden tomar el valor 0 ó 1) es la siguiente:

$$
\begin{aligned}
&min: Z = f(x) + c^T y \\
&s.a. \\
&h(x) = 0 \\
&g(x) + By \ \leq 0 \\
&Dy \leq b \\
&y \in \{0,1\}
\end{aligned}
\qquad (2.10)
$$

Donde *f(x)* es una función objetivo que se desea minimizar (maximizar). Dicha función objetivo está sujeta a una serie de restricciones de igualdad (balances de materia, de energía, etcétera.) que quedan representados por el vector de funciones $h(x) = 0$. Las restricciones de desigualdad vienen representadas por la expresión $g(x) + By \leq 0$. En las anteriores expresiones x es un vector de variables continuas e y es un vector de variables binarias.

Nótese que las variables binarias aparecen en forma lineal. La razón es que, quizás el mejor algoritmo de solución, para este tipo de problemas necesita que las variables binarias aparezcan sólo de forma lineal. En cualquier caso, siempre es posible modelar un problema para que las variables binarias aparezcan de esta forma.

Asociado a los modelos de programación lineal y no lineal con variables binarias (MINLP del inglés mixed-integer non linear programming) aparecen siempre una serie de restricciones como consecuencia de la lógica del problema, que es necesario convertir a su formulación matemática. Algunas de estas restricciones se pueden formular de manera bastante directa. Por ejemplo, en un problema de síntesis, especificar que se debe seleccionar exactamente uno de los reactores entre todo el conjunto de reactores candidatos $i \in \Re$ se puede expresar simplemente como: Simulación y Optimización de los Procesos Químicos

$$\sum_{i \in \mathbb{R}} y_i = 1 \qquad\qquad y_i \in \{0,1\} \tag{2.11}$$

donde que la variable binaria $y_i$ tome el valor 1 indica que se selecciona el reactor *i*.

Por otra parte, considérese la siguiente restricción: “Si se selecciona la columna de absorción o el sistema de membrana, entonces no usar separación criogénica”. Si elegimos como variables binarias $y_a$, $y_m$, $y_c$ que toman valor 1 si se selecciona la absorción, la membrana o la separación criogénica, respectivamente y cero en otro caso, se puede, después de algunos tanteos por prueba y error, llegar a la siguiente desigualdad valida:

$$y_a + y_m + 2y_c \leq 2 \tag{2.12}$$

En la anterior restricción es fácil comprobar que si $y_a=1$ y/o $y_m=1$ se fuerza a que $y_c=0$. Sin embargo, veremos que de forma sistemática se puede llegar a una formulación alternativa:

$$\begin{aligned} y_a + y_c &\leq 1 \\ y_m + y_c &\leq 1 \end{aligned} \tag{2.13}$$

El conjunto de ecuaciones (Ec. 2.13) no sólo es equivalente a la Ec 2.12 sino que es también más eficiente en el sentido de que produce una relajación (solución tomando las variables binarias como de decisión, con valor 0 ó 1) cuya solución está más próxima a la solución óptima del problema, debido a que restringe más la región factible.

Para obtener de forma sistemática restricciones que incluyan variables 0,1, es útil primero pensar en la forma correspondiente en lógica proposicional de las restricciones que se desea modelar. Para ello se deben, en primer lugar, considerar cuáles son los operadores básicos en lógica proposicional y cómo se puede transformar cada uno de esos operadores a una forma dada por una igualdad o desigualdad en la que aparezcan variables binarias. Estas transformaciones se usan entonces para convertir expresiones lógicas a su forma matemática equivalente.

## 2.7. Programación multiobjetivo

La programación multiobjetivo es una parte de la programación matemática que se encarga de problemas de decisión con múltiples funciones objetivo que deben ser optimizadas sobre un conjunto factible de soluciones. El problema de optimización multiobjetivo general se plantea en la ecuación 1.

$$Min\ F(x) = [F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x) \qquad (2.14)$$
$$s.a.$$
$$x \in X$$

Donde *k* es el número de funciones objetivo, *x* es el vector de variables de decisión y *X* el espacio de diseño factible, también llamado el espacio de decisión factible o delimitado por el conjunto de restricciones.

En un problema multiobjetivo no se tiene una única función a optimizar, sino un conjunto de n funciones. En estos casos no hay una solución global única, sino que es necesario determinar un conjunto de puntos que se ajusten a una definición predeterminada de un óptimo. El concepto predominante en la definición de un punto óptimo es el de la optimalidad de Pareto (**Fig. 2.2**), donde se define que un punto, $x^2 \in X$, es un Óptimo de Pareto si y sólo si no existe otro punto, $x^2 \in X$, tal que $F(x) \leq F(x^2)$, y $F_i(x) < F_i(x^2)$ para al menos una función.

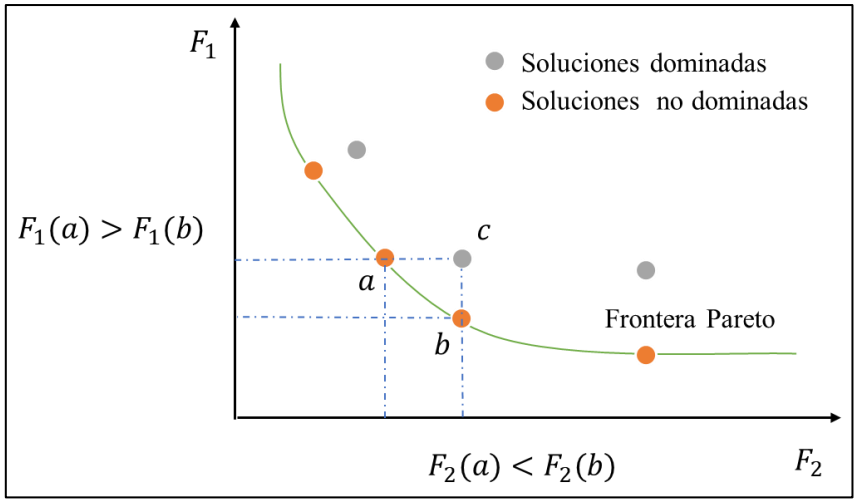



***Figura 2.2*** *Optimalidad de Pareto.*

La solución **a** pertenece a conjunto de soluciones óptimas (o soluciones no dominadas) dado que no puede encontrarse una solución **b** tal que mejore uno de los objetivos sin empeorar al menos uno de los otros. En este caso, la solución **c** es dominada por **a** y por **b**.

El conjunto de Pareto se define entonces como el conjunto de puntos en el espacio de búsqueda que se corresponden con las mejores soluciones al problema de optimización; y la frontera de Pareto, como el conjunto de soluciones ´optimas en el espacio objetivo. Este conjunto de soluciones se integra con aquellos puntos encontrados en el espacio objetivo que se corresponden con las soluciones no dominadas, de acuerdo con el criterio de dominancia de Pareto.

### *2.7.1. Generación de conjunto de soluciones*

Existen diferentes enfoques para generar conjuntos de soluciones, los métodos de escalarización y no escalarización. Los métodos de escalarización son los más utilizados ya que implican la formulación de un modelo mono objetivo relacionado con el modelo multiobjetivo por medio de una función escalar. La **Fig. 2.3** siguiente resume los métodos más utilizados.

| Método | Nombre en inglés | Total artículos |
|---|---|---|
| Programación por metas | *Goal programming* | 969 |
| Suma ponderada | *Weighted sum* | 696 |
| Restricción épsilon | *ε-constraint* | 399 |
| Función logro | *Achievement scalarizing function* | 22 |
| Enfoque de Roy | *Roy approach* | 13 |
| Producto ponderado | *Weighted product* | 13 |
| Esquema de arbitraje de Nash | *Nash arbitration scheme* | 9 |
| Función compromiso | *Compromise function* | 7 |
| Media geométrica ponderada | *Weighted geometric mean approach* | 5 |
| Suma objetivo | *Objective sum* | 4 |
| Enfoque de Pascoletti-Serafini | *Pascoletti-Serafini approach* | 4 |
| Método de Benson | *Benson's method* | 3 |
| Norma ponderada | *Weighted norm* | 3 |
| Criterio global ponderado | *Weighted global criterion* | 3 |
| Restricción elástica | *Elastic constraint approach* | 2 |
| Exponencial ponderado | *Exponential weighted* | 2 |
| Producto objetivo | *Objective product* | 2 |
| Potencia media ponderada | *Weighted power mean* | 2 |

***Figura 2.3*** *Métodos de escalarización multiobjetivo.*

En la programación por metas se especifican metas para cada función objetivo y la formulación básica se presenta en la Ec. 2.15.

$$\begin{aligned} &Min \qquad D = \sum_{i=1}^{k} (d_i^+ + d_i^-) \\ &s.a. \\ &F_i(x) = d_i^+ + d_i^- = b_i \qquad i = 1 \dots, k \\ &x \in X \\ &d_i^+ + d_i^- \geq 0 \end{aligned} \tag{2.15}$$

Donde $D$ es la sumatoria total de las desviaciones, las variables $d_i^+$ y $d_i^-$ son las desviaciones por encima y por debajo obtenidas para cada meta, $b_i$ es la meta definida para cada objetivo, $F_i(x)$ es la $i$-ésima función objetivo y $k$ es el número de objetivos. El modelo busca minimizar la desviación total de las metas.

La programación por metas ponderada (weighted goal programming) constituye una subclase del método de programación por metas, en la que se asignan pesos a la desviación de cada objetivo de su meta respectiva.

El segundo método de escalarización con mayor número de artículos es el de la suma ponderada ($U$). Este método escalariza el conjunto de objetivos en un solo objetivo multiplicando cada

objetivo con un peso definido previamente ($w_i$). Un modelo multiobjetivo escalarizado con este método tiene la forma presentada en la Ecuación 3. Si todos los objetivos son positivos y la frontera de Pareto es convexa, la minimización de la función objetivo establece una condición suficiente para obtener el Óptimo de Pareto, como se muestra en la **Fig. 2.4**.

$$\begin{aligned} &Min \qquad U = \sum_{i=1}^{k} w_i F_i(x) \\ &s.a. \\ &x \in X \end{aligned} \tag{2.16}$$

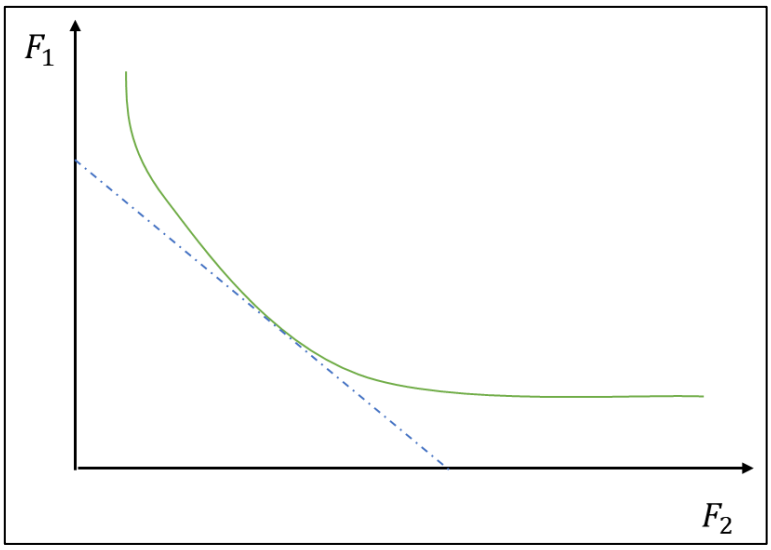



***Figura 2.4*** *Método de la suma ponderada.*

El tercer método de escalarización con mayor número de artículos es el de la restricción épsilon (ε-constraint) propuesto por Haimes en 1971, que se basa en una escalarización donde una de las funciones objetivo se optimiza mientras que todas las otras funciones objetivo están limitadas por medio de restricciones adicionales. La formulación tiene la forma de la Ec. 2.17.

$$\begin{aligned} &Min \qquad F_j(x) \\ &s.a. \\ &F_i(x) \leq \varepsilon_1 \qquad\qquad i = 1 \ldots, k; \quad i \neq j \\ &x \in X \end{aligned} \tag{2.17}$$

Donde los "i representan los valores de las funciones objetivos y se van alterando para obtener el conjunto óptimo de Pareto en un rango deseado. Gráficamente se observa el procedimiento en la **Fig. 2.5.** La Figura 6 describe una frontera de Pareto de un modelo con dos funciones objetivos, donde se minimiza la primera ($F_1$) y se restringe la segunda ($F_2$). El valor $\varepsilon_2$ representa el valor al que se restringe $F_2$ y con cada nivel de $\varepsilon_2$ se obtiene un punto óptimo de Pareto.

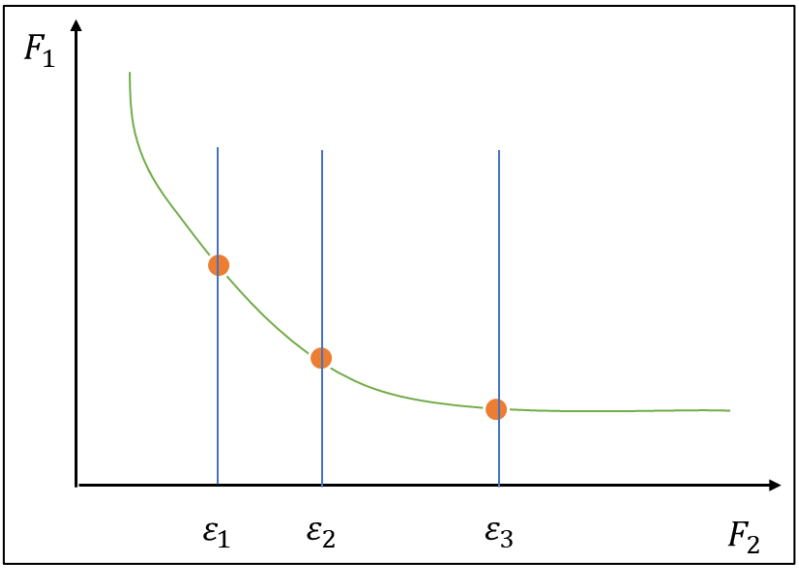



***Figura 2.5*** *Método de la restricción épsilon.*

## 2.8. Programación Estocástica

La Optimización Estocástica busca la mejor decisión en un escenario dependiente de sucesos aleatorios, dependientes del azar, ya sean esos sucesos los precios de un producto, la duración de una tarea, el número de personas en la cola de un cajero, el número de averías en una flota de camiones, o incluso la aprobación de una normativa (**Fig. 2.6**).

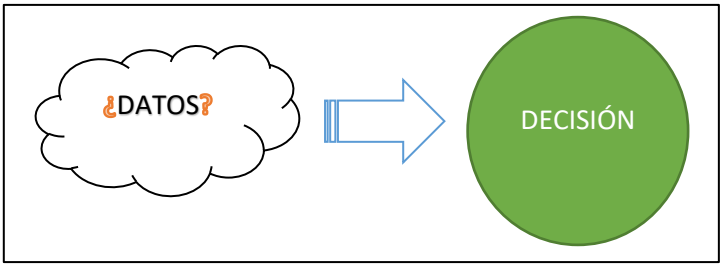



***Figura 2.6*** *Toma de decisión en la incertidumbre de datos.*

Los problemas de optimización estocástica son en general mucho más complejos que los que no consideran el azar, principalmente porque el azar implica que no tenemos un solo escenario a optimizar, sino un conjunto de escenarios posibles**.** Por ejemplo, si queremos optimizar el diseño de una red de distribución de energía, trabajaremos en un escenario de incertidumbre, en el que

desconocemos la demanda real de energía en el momento de uso de la red. En lugar del dato de la demanda se utilizaría una estimación, la cual consta de un conjunto finito de demandas posibles con una probabilidad asociada.

Aunque se considera que esta disciplina nació en los años 50 con Dantzig y Beale**,** históricamente la optimización ha tenido bastante con restringirse a problemas no estocásticos, esencialmente por la complejidad que los problemas estocásticos entrañan. Afrontar problemas reales sigue siendo imposible en muchos casos, pero los avances en capacidad de computación, y el desarrollo de las técnicas de optimización, han permitido resolver problemas hasta hace poco impensables. Además, a veces, tan sólo una aproximación estocástica puede mejorar enormemente la solución, lo que se traduce en ahorros de costes, mejora de servicio, incremento de beneficios, entre otros, todos ellos factores nada despreciables.

***2.****8.1 Programación Dinámica Estocástica (PDE)*

La programación dinámica ha sido una alternativa para enfrentar los problemas de optimización estocástica. Su aplicabilidad surge en la época en que la capacidad computacional era limitada y por lo tanto resolver el problema de optimización estocástica por medio de metodologías basadas en programación matemática no era viable. Hoy en día la situación es diferente, pero su estudio enriquece el estudio y el conocimiento con respecto al modelaje de sistemas dinámicos bajo incertidumbre. El estudio de la PDE se realiza tomando como referencia su aplicación a la planificación de sistemas de recursos hídricos, ya que en dicho campo se han realizado gran parte de las aplicaciones de esta metodología, y más específicamente se hará referencia a las metodologías utilizadas en la planificación y en la operación del sector eléctrico colombiano (Davis y Provonost 1972), las cuales están orientadas a utilizar la PDE como el medio para establecer funciones de costo futuro que han sido utilizadas posteriormente en la simulación del sistema o en la operación real. En el análisis que sigue a continuación solo se considera como fuente de riesgo el conocimiento con respecto a los parámetros y se asume como determinístico el efecto de las decisiones. En este caso el modelo de optimización estocástica se puede formular de la manera más general como:

$$\begin{aligned} \mathbf{PD} \coloneqq \Bigg\{ & \mathbf{Min} \sum_{\mathbf{i=1,T}} \mathbf{c}(\boldsymbol{\omega})_{\mathbf{t}}^{\mathbf{T}} \mathbf{x}_{\mathbf{t}} \Bigg| \\ & \mathbf{A}(\boldsymbol{\omega})_{\mathbf{t}} \mathbf{x}_{\mathbf{t}} = \mathbf{b}(\boldsymbol{\omega})_{\mathbf{t}} - \mathbf{E}(\boldsymbol{\omega})_{\mathbf{t-1}} \mathbf{x}_{\mathbf{t-1}} \quad \forall \mathbf{t} = \mathbf{1}, \mathbf{T} \\ & \mathbf{x}_{\mathbf{t}} \in \mathbf{R}^{+} \quad \forall \mathbf{t} = \mathbf{1}, \mathbf{T} \} \end{aligned} \tag{2.18}$$

Donde $\boldsymbol{\omega}$ representa al proceso aleatorio que genera la incertidumbre en los parámetros. Cuando se limita la incertidumbre al vector de recursos el problema se formula como:

$$\mathbf{PD} \coloneqq \left\{ \mathbf{Min} \sum_{\mathbf{i=1,T}} \mathbf{c}(\boldsymbol{\omega})_{\mathbf{t}}^{\mathbf{T}} \mathbf{x}_{\mathbf{t}} \right| \quad (2.19)$$

$$\mathbf{A}_{\mathbf{t}}\mathbf{x}_{\mathbf{t}} = \mathbf{b}(\boldsymbol{\omega})_{\mathbf{t}} - \mathbf{E}(\boldsymbol{\omega})_{\mathbf{t-1}}\mathbf{x}_{\mathbf{t-1}} \qquad \forall \mathbf{t} = \mathbf{1}, \mathbf{T}$$

$$\mathbf{x}_{\mathbf{t}} \in \mathbf{R}^{+} \quad \forall \mathbf{t} = \mathbf{1}, \mathbf{T}\}$$

Donde $\boldsymbol{\omega}$ representa la realización del proceso aleatorio en el período $\mathbf{t}$.

# CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

Este capítulo se plantean los modelos para la optimización determinística y estocástica para la cadena de suministro de biogás. La primera parte presenta una modelación multi objetivo con un enfoque mixto entero no lineal. La segunda parte considera una modelación multi objetivo mixta entera no lineal usando el CVaR como una medida de riesgo. La última parte plantea un modelo para la sustitución de un combustible fósil usando incentivos como el comercio de carbono.

## 3.1 Formulación del modelo determinista

Esta sección presenta el modelo de optimización propuesto para la cadena de suministro de biogás, que implica la compra y distribución de biomasa, las tecnologías de biogás para la producción y la mejora y, por último, la venta y distribución de productos, en función de la superestructura que se muestra en la **Fig. 3.1**. El modelo tiene en cuenta aspectos económicos aspectos ambientales. Los índices utilizados en esta formulación se definen primero, donde $i$ representa los tipos de biomasa (p. Ej., Suelos, abonos, desechos orgánicos, aguas residuales industriales o domésticas, verde y hojas, carne cruda, etcétera.), $j$ tecnologías de producción de biogás (p. Ej., Cualquier tipo de digestor anaeróbico), $k$ tecnologías de purificación de biogás (p. ej., absorción, separación de membrana y criogénica, etcétera.), $f$, $l$ y $m$ representan ubicaciones para fuentes de biomasa, producción de biogás y tecnologías de purificación de biogás respectivamente (puede ser cualquier lugar donde la biomasa existe y las tecnologías pueden instalarse), $o$ representan un derivado de la producción de biogás (un biofertilizante que podría usarse para nutrir la tierra), $p$ y $q$ son los mercados donde se puede vender biogás y biofertilizante (por ejemplo, pueblos, ciudades, etcétera.). Los índices $i$ y $k$ también se utilizan para etiquetar las cantidades de biogás no purificado, biogás purificado y biofertilizante (es decir, las características de biogás y biofertilizante no purificado pueden cambiar dependiendo del tipo de biomasa que utilicé con la tecnología de procesamiento, mientras que el biogás purificado Las características se deben a la tecnología de purificación $k$). Además, la formulación considera una escala de tiempo, $t$, que representa los meses del año; Esto se debe a que la disponibilidad de biomasa y las demandas del mercado se dan en meses. El modelo se divide en las siguientes secciones, la primera considera el aspecto económico y la segunda el aspecto ambiental.

### *3.1.1 Balances de masa y restricciones en la cadena de suministro*

*Disponibilidad de biomasa de diferentes fuentes.* La suma para cada tipo de biomasa requerida $i$ en todas las ubicaciones $l$ provenientes de cada ubicación $f$ en el período $t$ ($F_{i,f,l,t}^{Bm}$) debe ser menor o igual a la cantidad de biomasa disponible en cada fuente ($\vartheta_{i,f,t}^{Bm}$):

$$\sum_{l} F_{i,f,l,t}^{Bm} \leq \vartheta_{i,f,t}^{Bm} \qquad \forall\, (i \in I, f \in F, t \in T) \tag{3.1}$$

Donde la cantidad de biomasa disponible es un parámetro conocido que se puede obtener de la información para el caso específico de estudio considerado.

*Balance de masas antes de procesar biomasa.* La cantidad de biomasa total en cada ubicación de procesamiento $l$ ($F_{i,l,t}^{Bm_Total}$) (disponible para ser procesada) debe ser igual a la suma de la cantidad de biomasa proveniente de todas las fuentes donde sale (Ec. 3.2). Simultáneamente, la cantidad de biomasa total debe ser igual a la suma de biomasa que se puede distribuir a todas las tecnologías de procesamiento $j$ (para convertir en biogás) ($F_{i,l,j,t}^{Bm_conv}$) en cada ubicación de procesamiento (Ec. 3.3).

$$F_{i,l,t}^{Bm_Total} = \sum_{f} F_{i,f,l,t}^{Bm} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, t \in T) \tag{3.2}$$

$$F_{i,l,t}^{Bm_Total} = \sum_{j} F_{i,l,j,t}^{Bm_conv} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, t \in T) \tag{3.3}$$

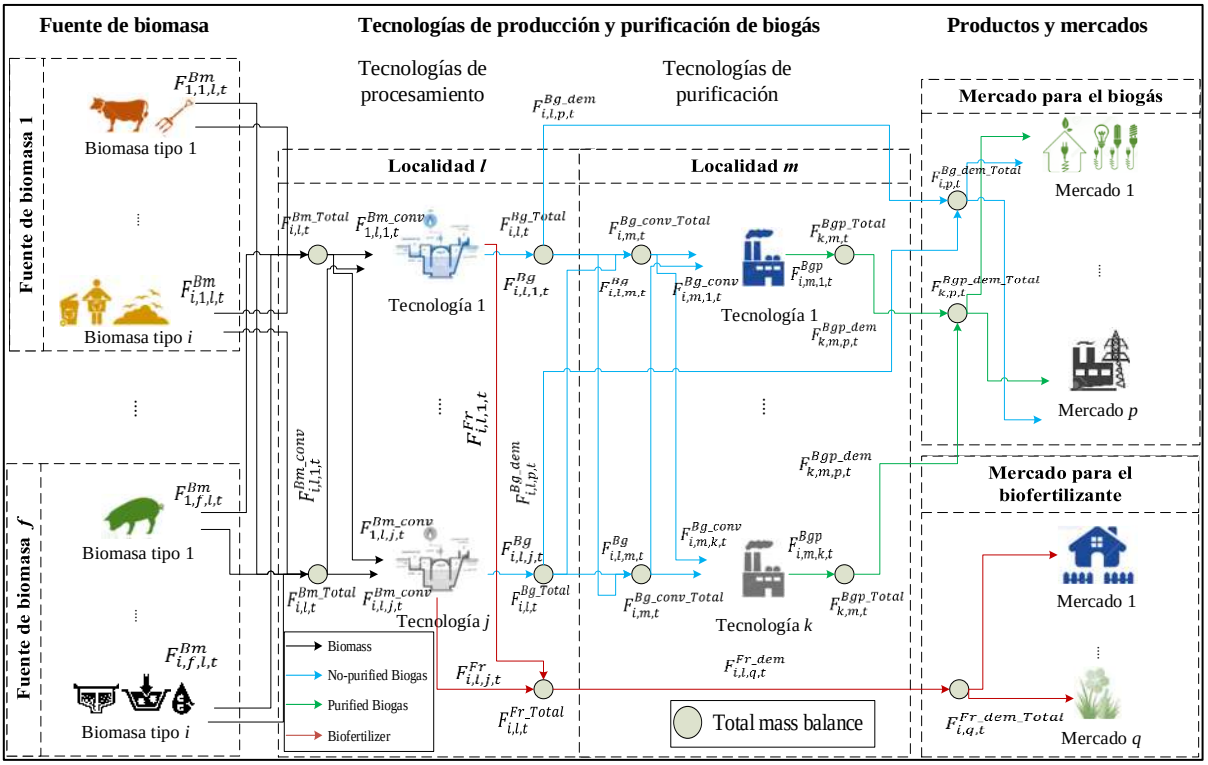



***Figura 3.1*** *Superestructura de la cadena de suministro del biogás*

*Balance de masas después del procesamiento de biomasa.* La cantidad de biogás total generada por diferentes fuentes de biomasa en cada ubicación de procesamiento ($F_{i,l,t}^{Bg_Total}$) debe ser igual a la suma de la cantidad de biogás proveniente de todas las tecnologías de procesamiento que pueden procesarse en cada ubicación de procesamiento ($F_{i,l,j,t}^{Bg}$) (Ec, 3.4).

$$F_{i,l,t}^{Bg_Total} = \sum_{j} F_{i,l,j,t}^{Bg} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, t \in T) \tag{3.4}$$

Ec. 3.5 describe la cantidad de biogás que se transporta a la ubicación $m$ donde se purificará ($F_{i,l,m,t}^{Bg}$) y la cantidad que será vendida al mercado $m$, la suma de las dos partes debe ser igual a la cantidad de biogás total generado por diferentes fuentes de biomasa en cada lugar de procesamiento $l$.

$$F_{i,l,t}^{Bg_Total} = \sum_{m} F_{i,l,m,t}^{Bg} + \sum_{p} F_{i,l,p,t}^{Bg_dem} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, t \in T) \tag{3.5}$$

Por otro lado, la cantidad total de biofertilizante producida por las tecnologías de procesamiento $j$ en la ubicación $l$ de cada fuente de biomasa ($F_{i,l,t}^{Fr_Total}$) debe ser igual a la suma de la cantidad de biofertilizante proveniente de todas las tecnologías de procesamiento que puede utilizarse en cada ubicación de procesamiento ($F_{i,l,j,t}^{Fr}$) (Ec. 3.6). Aquí, el biofertilizante se distribuirá a todos los mercados $q$ desde cada ubicación l ($F_{i,l,q,t}^{Fr_dem}$) debido a que el biofertilizante generado se venderá tal como se produce (Ec. 3.7).

$$F_{i,l,t}^{Fr_Total} = \sum_{j} F_{i,l,j,t}^{Fr} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, t \in T) \tag{3.6}$$

$$F_{i,l,t}^{Fr_Total} = \sum_{q} F_{i,l,q,t}^{Fr_dem} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, t \in T) \tag{3.7}$$

*Balance de masas antes de la purificación de biogás.* La cantidad total de biogás que se purifica en la ubicación m ($F_{i,m,t}^{Bg_conv_Total}$) debe ser igual a la suma de biogás generado en todas las ubicaciones $l$ (Ec. 3.8). Además, la Ec. 3.9 describe cómo se distribuye la cantidad total de biogás (a ser purificada) a todas las tecnologías de purificación $k$ en cada ubicación $m$ ($F_{i,m,k,t}^{Bg_conv}$).

$$F_{i,m,t}^{Bg_conv_Total} = \sum_{l} F_{i,l,m,t}^{Bg} \qquad \forall\, (i \in I, m \in M, t \in T) \tag{3.8}$$

$$F_{i,m,t}^{Bg_conv_Total} = \sum_{k} F_{i,m,k,t}^{Bg_conv} \qquad \forall\, (i \in I, m \in M, t \in T) \tag{3.9}$$

*Balance de masas después de la purificación de biogás.* La cantidad total de biogás purificado generado por cada tecnología de purificación $k$ en cada ubicación $m$ ($F_{k,m,t}^{Bgp_Total}$) debe ser igual a la suma de las cantidades de biogás purificado provenientes de todas las fuentes de biomasa $i$ para

cada tecnología $k$ y ubicación $m$ ($F_{i,m,k,t}^{Bgp}$) (Ec. 3.10). La Ec. 3.11 describe la cantidad de biogás purificado distribuido al mercado $p$ desde cada ubicación $m$ ($F_{k,m,p,t}^{Bgp_dem}$) y debe ser igual a la cantidad total de biogás purificado generado.

$$F_{k,m,t}^{Bgp_Total} = \sum_{i} F_{i,m,k,t}^{Bgp} \qquad \forall\, (k \in K, m \in M, t \in T) \tag{3.10}$$

$$F_{k,m,t}^{Bgp_Total} = \sum_{p} F_{k,m,p,t}^{Bgp_dem} \qquad \forall\, (k \in K, m \in M, t \in T) \tag{3.11}$$

*Balance en los mercados.* Las Ecs. 3.12, 3.13 y 3.14 describen el biogás (tanto el biogás no purificado como el biogás purificado) y las cantidades de biofertilizante procedentes de todas las ubicaciones $m$ y $l$ para cada mercado $p$ y $q$ respectivamente.

$$F_{i,p,t}^{Bg_dem_Total} = \sum_{l} F_{i,l,p,t}^{Bg_dem} \qquad \forall\, (i \in I, p \in P, t \in T) \tag{3.12}$$

$$F_{k,p,t}^{Bgp_dem_Total} = \sum_{m} F_{k,m,p,t}^{Bgp_dem} \qquad \forall\, (k \in K, p \in P, t \in T) \tag{3.13}$$

$$F_{i,q,t}^{Fr_dem_Total} = \sum_{l} F_{i,l,q,t}^{Fr_dem} \qquad \forall\, (i \in I, q \in Q, t \in T) \tag{3.14}$$

*Rendimientos de productos.* Las cantidades de biogás y biofertilizante generadas por las tecnologías de procesamiento están relacionadas con el flujo procesado en cada tecnología $j$ a través de un factor de eficiencia ($\chi_{i,j}^{Bg}$ y $\chi_{i,j}^{Fr}$ respectivamente). Este factor de eficiencia depende exclusivamente del tipo de biomasa utilizado en la tecnología de procesamiento (Ecs. 3.15 y 3.16).

$$F_{i,l,j,t}^{Bg} = \chi_{i,j}^{Bg} \times F_{i,l,j,t}^{Bm_conv} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, j \in J, t \in T) \tag{3.15}$$

$$F_{i,l,j,t}^{Fr} = \chi_{i,j}^{Fr} \times F_{i,l,j,t}^{Bm_conv} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, j \in J, t \in T) \tag{3.16}$$

Además, otro factor de eficiencia ($\chi_{i,k}^{Bgp}$) se utiliza para describir la cantidad de biogás purificado obtenido en las tecnologías de purificación $k$ y se describe en la Ec. 3.17. Aquí, el factor de eficiencia depende del tipo de tecnología de purificación utilizada.

$$F_{i,m,k,t}^{Bgp} = \chi_{i,k}^{Bgp} \times F_{i,m,k,t}^{Bg_conv} \qquad \forall\, (i \in I, m \in M, k \in K, t \in T) \tag{3.17}$$

*Capacidades de equipo.* La cantidad de biogás, biofertilizante y biogás purificado, que se puede generar a partir de biomasa tipo $i$ en cada ubicación $l$ y $m$ respectivamente utilizando las tecnologías correspondientes $j$ y $k$, debe ser menor o igual a la capacidad máxima de estas

tecnologías ($\gamma_j^{Bg}$, $\gamma_j^{Fr}$, $\gamma_k^{Bgp}$). La capacidad máxima se multiplica por una variable de decisión que indica si las tecnologías j y k deben instalarse o no en la ubicación $l$ y $m$ ($y_{j,l}$, $y_{k,m}$). Las Ecs. 3.18, 3.19 y 3.20 describen esta afirmación.

$$\sum_i F_{i,l,j,t}^{Bg} \leq \gamma_j^{Bg} \times y_{j,l} \qquad \forall\, (l \in L, j \in J, t \in T) \tag{3.18}$$

$$\sum_i F_{i,l,j,t}^{Fr} \leq \gamma_j^{Fr} \times y_{j,l} \qquad \forall\, (l \in L, j \in J, t \in T) \tag{3.19}$$

$$\sum_i F_{i,m,k,t}^{Bgp} \leq \gamma_k^{Bgp} \times y_{k,m} \qquad \forall\, (m \in M, k \in K, t \in T) \tag{3.20}$$

Observe que hay una suma de todas las cantidades de biomasa tipo $i$ en cada ecuación previamente citada. Esta suma indica que las cantidades del producto no se pueden generar al mismo tiempo, es decir, cada cantidad del producto toma una parte del período de tiempo $t$. Por lo tanto, la capacidad máxima no está indexada para cada tipo de biomasa $i$.

*Demandas mínimas y máximas de productos.* La suma de las cantidades de biogás en las ubicaciones $l$ y $m$ (tanto biogás no purificado como biogás purificado) generadas por diferentes tecnologías debe satisfacer la demanda del mercado $p$ ($F_{i,l,p,t}^{Bg_dem}$, $F_{k,m,p,t}^{Bgp_dem}$, respectivamente). Esta suma debe ser mayor o igual a la demanda mínima ($\eta_{i,p,t}^{Bg_min}$, $\eta_{k,p,t}^{Bgp_min}$) y también debe ser menor o igual a la demanda máxima ($\eta_{k,p,t}^{Bgp_max}$, $\eta_{i,p,t}^{Bg_max}$) necesita en el mercado de biogás. Las Ecs. 3.21 y 3.22 describen los requisitos de biogás (tipo $i$ y $k$).

$$\eta_{i,p,t}^{Bg_min} \leq \sum_l F_{i,l,p,t}^{Bg_dem} \leq \eta_{i,p,t}^{Bg_max} \qquad \forall\, (i \in I, p \in P, t \in T) \tag{3.21}$$

$$\eta_{k,p,t}^{Bgp_min} \leq \sum_m F_{k,m,p,t}^{Bgp_dem} \leq \eta_{k,p,t}^{Bgp_max} \qquad \forall\, (k \in K, p \in P, t \in T) \tag{3.22}$$

La Eq. 3.23 representa la demanda de biofertilizantes en el mercado $q$ ($F_{i,l,q,t}^{Fr_dem}$). La suma de la cantidad de biofertilizante generada por la biomasa tipo $i$ en todas las ubicaciones $l$ debe ser mayor o igual a la demanda mínima ($\eta_{o,q,t}^{Fr_min}$) y también debe ser menor o igual a la demanda máxima ($\eta_{o,q,t}^{Fr_max}$) de biofertilizante tipo $o$.

$$\eta_{o,q,t}^{Fr_min} \leq \sum_i \sum_l F_{i,l,q,t}^{Fr_dem} \leq \eta_{o,q,t}^{Fr_max} \qquad \forall\, (o \in O, q \in Q, t \in T) \tag{3.23}$$

*Existencia de tecnologías de procesamiento y purificación.* Las tecnologías de procesamiento y purificación $j$ y $k$, respectivamente, que pueden instalarse en ubicaciones $l$ y $m$ dependen de variables binarias ($y_{j,l}$ y $y_{k,m}$) que determinan su existencia. En este caso, las Ecs. 3.24 y 3.25 indican que solo se puede instalar una tecnología en una ubicación determinada.

$$\sum_{j} y_{j,l} = 1 \qquad \forall\, l \in L \tag{3.24}$$

$$\sum_{k} y_{k,m} = 1 \qquad \forall\, m \in M \tag{3.25}$$

### *3.1.2 Ecuaciones considerando aspectos económicos*

*Ingresos asociados a la venta de productos.* El ingreso de biogás ($BgRevenue$) es igual a la suma del precio de venta de biogás ($R_{i,p,t}^{Bg}$) multiplicado por la cantidad de biogás demandada por el mercado ($F_{i,l,p,t}^{Bg_dem}$). La suma incluye todos los índices $i$, $l$ y $p$ en todos los períodos $t$ (Ec. 3.26).

$$BgRevenue = \sum_{i}\sum_{l}\sum_{p}\sum_{t}(R_{i,p,t}^{Bg} \times F_{i,l,p,t}^{Bg_dem}) \tag{3.26}$$

Del mismo modo, a continuación, se muestran las ecuaciones de ingresos de biogás purificado ($PBgRevenue$) e ingresos de biofertilizantes ($BioferRevenue$) (Ecs. 3.27 y 3.28). Donde el parámetro $R_{k,p,t}^{Bgp}$ es el precio de venta del biogás purificado y $R_{i,q,t}^{Fr}$ es el precio de venta del biofertilizante para el mercado $p$ y $q$ respectivamente.

$$PBgRevenue = \sum_{k}\sum_{m}\sum_{p}\sum_{t}(R_{k,p,t}^{Bgp} \times F_{k,m,p,t}^{Bgp_dem}) \tag{3.27}$$

$$BioferRevenue = \sum_{i}\sum_{l}\sum_{q}\sum_{t}(R_{i,q,t}^{Fr} \times F_{i,l,q,t}^{Fr_dem}) \tag{3.28}$$

*Costo asociado con la compra de biomasa.* El costo asociado con la compra de biomasa ($PurchBmCost$) es igual a la suma del parámetro de costo de biomasa ($C_{i,f,t}^{Bm}$) multiplicado por la cantidad de biomasa tipo $i$ que viene de la fuente de suministro $f$ a la ubicación $l$ ($F_{i,f,l,t}^{Bm}$) (Ec. 3.29). El parámetro $C_{i,f,t}^{Bm}$ depende del tipo de biomasa que se considere utilizada en el caso de estudio.

$$PurchBmCost = \sum_{i}\sum_{f}\sum_{l}\sum_{t}\left(C_{i,f,t}^{Bm} \times F_{i,f,l,t}^{Bm}\right) \tag{3.29}$$

*Costos asociados al transporte de biomasa, biogás y fertilizantes*. La Ec. 3.30 representa el costo asociado con el transporte ($TransCost$), incluida la suma de todas las materias primas y productos de un lugar a otro multiplicado por un parámetro de costo de transporte. Donde $C_{i,f,l,t}^{Trans,Bm}$, $C_{i,l,m,t}^{Trans,Bg}$, $C_{i,l,p,t}^{Trans,Bg}$, $C_{k,m,p,t}^{Trans,Bgp}$ y $C_{i,l,q,t}^{Trans,Fr}$ son parámetros de costo para el transporte de biomasa, biogás, biogás purificado y biofertilizante respectivamente y estos dependen del tipo de biomasa y la distancia entre ubicaciones. Cada parámetro de costo de transporte se multiplica por su cantidad correspondiente variable $F$.

$$\begin{aligned} TransCost = & \sum_i \sum_f \sum_l \sum_t \left(C_{i,f,l,t}^{Trans,Bm} \times F_{i,f,l,t}^{Bm}\right) \\ & + \sum_i \sum_l \sum_m \sum_t \left(C_{i,l,m,t}^{Trans,Bg} \times F_{i,l,m,t}^{Bg}\right) \\ & + \sum_i \sum_l \sum_p \sum_t \left(C_{i,l,p,t}^{Trans,Bg} \times F_{i,l,p,t}^{Bg_dem}\right) \\ & + \sum_k \sum_m \sum_p \sum_t \left(C_{k,m,p,t}^{Trans,Bgp} \times F_{k,m,p,t}^{Bgp_dem}\right) \\ & + \sum_i \sum_l \sum_q \sum_t \left(C_{i,l,q,t}^{Trans,Fr} \times F_{i,l,q,t}^{Fr_dem}\right) \end{aligned} \tag{3.30}$$

*Costos fijos asociados con las tecnologías de procesamiento y purificación*. La Ec. 3.31 representa los costos fijos de las tecnologías de procesamiento y purificación ($FixedCost$) e incluye la suma de todos los costos fijos de procesamiento ($C_{j,l}^{Fix,Prod_tech}$) y todos los costos fijos de purificación ($C_{k,m}^{Fix,Pur_tech}$) en todas las ubicaciones donde se podrían instalar las tecnologías. Los costos fijos se multiplican por un factor utilizado para anualizarlos ($K$) y cada uno se activa mediante la variable binaria correspondiente ($y$).

$$\begin{aligned} FixedCost = & \sum_j \sum_l \sum_t \left(K_{j,t} \times C_{j,l}^{Fix,Prod_tech} \times y_{j,l}\right) \\ & + \sum_k \sum_m \sum_t \left(K_{k,t} \times C_{k,m}^{Fix,Pur_tech} \times y_{k,m}\right) \end{aligned} \tag{3.31}$$

Los factores de anualización ($K_{j,t}$ y $K_{k,t}$) para el procesamiento y las tecnologías purificadas $j$ y $k$ respectivamente están determinados por la Ec. 332. Donde $\alpha_j$ y $\alpha_k$ son tasas de descuento utilizadas para determinar el costo anual y $N$ es la vida útil esperada de cada tecnología.

$$K_{j,t} = \left[\frac{\left(1+\alpha_j\right)^N \times \alpha_j}{\left(1+\alpha_j\right)^N - 1}\right];\ K_{k,t} = \left[\frac{(1+\alpha_k)^N \times \alpha_k}{(1+\alpha_k)^N - 1}\right] \quad \forall\ (j \in J, k \in K, t \in T) \qquad (3.32)$$

*Costos variables asociados con las tecnologías de procesamiento y purificación.* Los costos variables están frecuentemente asociados con el volumen de producción. Por esa razón, los costos variables ($VarCost$) dependen directamente de la cantidad de materia prima ($F_{i,l,j,t}^{Bm_conv}$) y $F_{i,m,k,t}^{Bg_conv}$) convertidos en final productos. La Ec. 3.33 describe la suma total de los costos variables asociados con las tecnologías de procesamiento y purificación. $C_{l,j,t}^{Var,Prod_tech}$ y $C_{m,k,t}^{Var,Pur_tech}$) son parámetros de costo vinculados a las materias primas, servicios y mano de obra involucrados en el proceso de fabricación.

$$VarCost = \sum_i \sum_l \sum_j \sum_t \left(C_{l,j,t}^{Var,Prod_tech} \times F_{i,l,j,t}^{Bm_conv}\right) + \sum_i \sum_m \sum_k \sum_t \left(C_{m,k,t}^{Var,Pur_tech} \times F_{i,m,k,t}^{Bg_conv}\right) \qquad (3.33)$$

### *3.1.3 Ecuaciones considerando aspectos ambientales*

*Emisiones evitadas mediante el uso de biomasa*. La Ec. 3.34 representa las emisiones de efecto emisiones de gases de efecto invernadero evitadas ($AvoidEmissions$) (es decir, las emisiones generadas al utilizar la biomasa en un proceso diferente) e incluye la suma de las emisiones de efecto invernadero de todos los tipos de biomasa que se transportan desde la ubicación $f$ a la ubicación $l$ en un período de tiempo ($F_{i,f,l,t}^{Bm}$) multiplicado por un parámetro de emisión ($E_{i,f}^{Source}$) para cada tipo de biomasa utilizada.

$$AvoidEmissions = \sum_i \sum_f \sum_l \sum_t \left(E_{i,f}^{Source} \times F_{i,f,l,t}^{Bm}\right) \qquad (3.34)$$

*Emisiones asociadas al transporte en la cadena de suministro*. La Ec. 3.35 describe la emisión de efecto invernadero asociada con el transporte ($TransEmissions$) e incluye la suma de todas las materias primas y productos de un lugar a otro multiplicado por un parámetro de emisión de gases de efecto invernadero. Donde, $E_{i,f,l}^{Trans,Bm}$, $E_{i,l,m}^{Trans,Bg}$, $E_{i,l,p}^{Trans,Bg}$, $E_{k,m,p}^{Trans,Bgp}$ y $E_{i,l,q}^{Trans,Fr}$ son parámetros de emisión de gases de efecto invernadero para el transporte de biomasa, biogás no purificado, biogás purificado y biofertilizante, respectivamente, y estos dependen del tipo de biomasa y la distancia entre ubicaciones. Cada parámetro de emisión de gases de efecto invernadero se multiplica por su correspondiente cantidad variable $F$.

$$
\begin{aligned}
TransEmissions &= \sum_i \sum_f \sum_l \sum_t \left(E_{i,f,l}^{Trans,Bm} \times F_{i,f,l,t}^{Bm}\right) \\
&+ \sum_i \sum_l \sum_m \sum_t \left(E_{i,l,m}^{Trans,Bg} \times F_{i,l,m,t}^{Bg}\right) \\
&+ \sum_i \sum_l \sum_p \sum_t \left(E_{i,l,p}^{Trans,Bg} \times F_{i,l,p,t}^{Bg_dem}\right) \\
&+ \sum_k \sum_m \sum_p \sum_t \left(E_{k,m,p}^{Trans,Bgp} \times F_{k,m,p,t}^{Bgp_dem}\right) \\
&+ \sum_i \sum_l \sum_q \sum_t \left(E_{i,l,q}^{Trans,Fr} \times F_{i,l,q,t}^{Fr_dem}\right)
\end{aligned} \tag{3.35}
$$

*Emisiones asociadas con tecnologías de procesamiento y purificación*. La Ec. 3.36 describe las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el uso de tecnologías de procesamiento y purificación ($ConvEmissions$) y es la suma total de las emisiones de gases de efecto invernadero en todos los lugares. Aquí, las emisiones de gases de efecto invernadero dependen directamente de la cantidad de materia prima procesada ($F_{i,l,j,t}^{Bm_conv}$ y $F_{i,m,k,t}^{Bg_conv}$). $E_{i,j}^{Bm_conv}$ y $E_{i,k}^{Bg_conv}$ son parámetros de emisión de gases de efecto invernadero vinculados a las materias primas, servicios y mano de obra involucrados en el proceso de fabricación y estos dependen del tipo de biomasa y tecnología.

$$
\begin{aligned}
ConvEmissions &= \sum_i \sum_l \sum_j \sum_t \left(E_{i,j}^{Bm_conv} \times F_{i,l,j,t}^{Bm_conv}\right) \\
&+ \sum_i \sum_m \sum_k \sum_t \left(E_{i,k}^{Bg_conv} \times F_{i,m,k,t}^{Bg_conv}\right)
\end{aligned} \tag{3.36}
$$

*Emisiones asociadas al uso final de productos*. La Ec. 3.37 implica la suma total de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el uso final de biogás no purificado y purificado, y el biofertilizante ($UseEmissions$). $E_i^{Use,Bg}$, $E_k^{Use,Bgp}$ y $E_i^{Use,Fr}$ son los parámetros de emisión de efecto invernadero para el uso final de biogás no purificado, biogás purificado y biofertilizante, estos parámetros dependen solo de las características del producto. Las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por el uso final están en relación con la cantidad demandada del producto.

$$UseEmissions = \sum_i \sum_l \sum_p \sum_t \left(E_i^{Use,Bg} \times F_{i,l,p,t}^{Bg_dem}\right) + \sum_k \sum_m \sum_p \sum_t \left(E_k^{Use,Bgp} \times F_{k,m,p,t}^{Bgp_dem}\right) + \sum_i \sum_l \sum_q \sum_t \left(E_i^{Use,Fr} \times F_{i,l,q,t}^{Fr_dem}\right) \quad (3.37)$$

### *3.1.4 Funciones objetivo*

*Beneficio total.* Una función objetivo es la maximización de la ganancia total (Ec. 3.38), que incluye los ingresos asociados con la venta de biogás no purificado ($BgRevenue$), los ingresos generados por la venta de biogás purificado ($PBgRevenue$) y los ingresos asociados con la venta de biofertilizante ($BioferRevenue$), costos asociados con la compra de biomasa (PurchBmCost), costos asociados con el transporte de biomasa, biogás y fertilizante ($TransCost$), costos fijos asociados con las tecnologías de procesamiento y purificación ($FixedCost$) y costos variables asociados con las tecnologías de procesamiento y purificación ($VarCost$).

$$TotalProfit = BgRevenue + PBgRevenue + BioferRevenue - (PurchBmCost + TransCost + FixedCost + VarCost) \quad (3.38)$$

*Ahorro total de emisiones*. Otra función objetivo es la maximización del ahorro total de emisiones de gases de efecto invernadero ($TotalEmissionSaving$) (Ec. 3.39), que incluye las emisiones evitadas mediante el uso de biomasa ($AvoidedEmissions$), las emisiones asociadas con el transporte en la cadena de suministro ($TransEmissions$), las emisiones asociadas con tecnologías de procesamiento y purificación ($ConvEmissions$) y emisiones asociadas con el uso final de productos ($UseEmissions$).

$$TotalEmissionSaving = AvoidedEmissions - (TransEmissions + ConvEmissions + UseEmissions) \quad (3.39)$$

*Función Objetivo*. La función objetivo (Ec. 3.40) es la maximización de el beneficio total ($TotalProfit$) y la maximización del ahorro total de emisiones GEI ($TotalEmissionSaving$).

$$ObjectiveFunction = \{\text{Max.}\, TotalProfit\,;\, \text{Max.}\, TotalEmissionSaving\} \quad (3.40)$$

La Ec. 3.40 implica maximizar la ganancia total ($TotalProfit$, dada en la Ec. 3.38) y el ahorro total de emisiones GEI ($TotalEmissionSaving$, dada en la Ec. 3.39). Cabe señalar que cuando la función objetivo se resuelve para maximizar el beneficio total, la solución para el ahorro total de

emisiones corresponde a la solución con las emisiones de gases de efecto invernadero más altas (el ahorro mínimo) porque esta busca la mejor solución en el aspecto económico sin importar cuántas emisiones se puedan generar. Por otro lado, la solución con las emisiones totales más bajas (el ahorro máximo) brinda los beneficios económicos más bajos porque esto podría requerir más infraestructura para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y aumentar los costos. Por lo tanto, los objetivos se contradicen entre sí y el problema se resuelve para maximizar el $TotalProfit$ con el método de restricciones épsilon (*$\varepsilon$-constraint method*).

## 3.2 Formulación del modelo estocástico

La formulación matemática propuesta incluye balances de masa para la cantidad de biomasa disponible que se transformará en biogás, las ecuaciones de rendimiento de las tecnologías de procesamiento y purificación, así como los balances de masa para las demandas de productos en los mercados. Todo esto basado en la superestructura que se muestra en la **Fig. 3.1**. La formulación se desarrolla como un modelo multi escenario. Además, incluye el establecimiento de funciones objetivas para el análisis económico y medioambiental. Para el desarrollo de este modelo se toma en consideración parte de las ecuaciones establecidas en el modelo determinista pero ahora indexado para una estrategia multi escenario (ver anexos).

### *3.2.1 Estrategia multi escenario*

En esta sección, se presenta una metodología para abordar la distribución de la solución óptima de Pareto utilizando un enfoque CVaR. De acuerdo con Dowling et al. y Fuentes-Cortés et al (Dowling et al., 2016; Fuentes-Cortés, Ponce-Ortega, et al., 2018), el marco CVaR se puede utilizar como una herramienta analítica para la resolución de conflictos en entornos de toma de decisiones y también permite a las partes interesadas evaluar cuánta importancia tienen en una solución compromiso. Los pasos de metodología son destacados por los autores mencionados anteriormente, los cuales son utilizados para el desarrollo del modelo estocástico. Sobre la base de las declaraciones de este enfoque CVaR, es posible adaptar este enfoque para abordar el análisis multi escenario y desarrollar un conjunto de ecuaciones que permitan evaluar los criterios de carencia (*gap criteria*) en condiciones de igualdad para las funciones económicas y ambientales involucradas en esta declaración de problemas.

En primer lugar, es necesario normalizar las funciones objetivas para que sus valores objetivos tengan el mismo orden de magnitud (Ecs. 3.41 y 3.42), esto permite combinar las funciones objetivas en una sola expresión. Dónde $\gamma_s^{Profit}$ y $\gamma_s^{GHGEmission}$ son las funciones objetivo normalizadas para la misión *Total Profit* y *Total Emission* respectivamente para cada escenario $s$.

Por lo tanto, $\gamma$ toma valores entre 0 y 1. Debe tenerse en cuenta que cuando el valor de la función objetivo tiende hacia su límite superior $UB$, $\gamma \to 0$. De lo contrario, $\gamma \to 1$cuando se aproxima hacia su límite inferior $LB$ (esto para $\gamma_s^{Profit}$). Para $\gamma_s^{GHGEmission}$, sucede lo contrario, es decir, cuando el valor de función tiende hacia su $LB$, el $\gamma \to 0$. De lo contrario, $\gamma \to 1$cuando se aproxima hacia su límite superior, $UB$. Tenga en cuenta que, para las Ecs. (3.41) y (3.42), el valor de $\gamma$ es 0 en los valores más deseables del beneficio total y las emisiones totales, es decir, obteniendo el mayor beneficio económico y las emisiones más bajas. Estas ecuaciones también se pueden estructurar de modo que en los valores más deseables $\gamma$ pueden ser 1. Esto dependerá de si la función objetivo final que implica ambas funciones normalizadas se maximiza o se minimiza.

$$\gamma_s^{Profit} = \frac{TP_s^{UB} - TP_s}{TP_s^{UB} - TP_s^{LB}} \qquad \forall s \tag{3.41}$$

$$\gamma_s^{GHGEmission} = \frac{TE_s - TE_s^{LB}}{TE_s^{UB} - TE_s^{LB}} \qquad \forall s \tag{3.42}$$

Los valores de $LB$ y $UB$ de las funciones objetivas se obtienen resolviendo el problema para cada escenario con la maximización y minimización del beneficio total y las emisiones totales (valores extremos). Como resultado de maximizar la función objetivo de beneficio total, se obtiene el $UB$ de la misma (que es un valor deseado de la función), y el $UB$ de la función de emisiones totales (que es un valor no deseado). Esto también permite abordar el conflicto entre funciones objetivas. Ahora bien, como resultado de minimizar las emisiones totales, se alcanza el $LB$ de esta función, así como el $LB$ de la función de beneficio total. Como se ha mencionado, esto permite normalizar las funciones objetivas ($\gamma$). Finalmente, esta metodología permite reformular el problema multiobjetivo como un problema mono objetivo para cada escenario ($s$) abordado. Asimismo, como consecuencia de la reformulación, la función mono objetivo obtenida permite obtener la solución Pareto más cercana al punto de utopía que se define por los valores óptimos deseados de las funciones objetivas (en este caso $UP$ ($TP^{UB}, TE^{LB}$)) (Cao et al., 2017; Fuentes-Cortés, Ponce-Ortega, et al., 2018; Zavala & Flores-Tlacuahuac, 2012).

La suma de las diferencias entre las funciones objetivo normalizadas define los criterios de carencia ("gap") $\delta$ para todas las funciones objetivas implicadas en el proceso de toma de decisión (*decision-making process*) (Ec. 3.43). Para un análisis multi escenario, $\delta_s$ representa la brecha para

cada escenario y $\gamma^{EQ,Profit}$ and $\gamma^{EQ,GHGEmission}$define una solución variable en condiciones de igualdad que compensan un equilibrio entre ambas funciones objetivas, es decir, se considera que todos los escenarios tienen una influencia y peso similares o iguales sobre el proceso de decisión multiobjetivo, para el beneficio total y el total de emisiones respectivamente.

$$\delta_s = \left|\gamma^{EQ,Profit} - \gamma_s^{Profit}\right| + \left|\gamma^{EQ,GHGEmission} - \gamma_s^{GHGEmission}\right| \qquad \forall s \tag{3.43}$$

El enfoque CVaR está representado por la Ec. 3.44. Dónde $[\cdot]_+$ es la función máxima y $v$ es una variable artificial, $M$ representa el número total de funciones objetivo implicadas en el proceso de toma de decisión.

$$\min v + \frac{1}{(1-\alpha)M} \cdot \sum_s [\delta_s - v]_+ \tag{3.44}$$

Cuando $\alpha \to 0$, resulta en minimizar la brecha media entre las soluciones asociadas a los múltiples escenarios (Eq. (3.45)). Esto significa que minimizar la suma de las diferencias para todas las funciones objetivo normalizadas debe dar una solución única $f$ que pueda ayudar a alcanzar una solución de compensación teniendo en cuenta la distribución generada para la variación de datos utilizada para definir el enfoque multi escenario en la función económica y ambiental en condiciones de igualdad.

$$\min f = \frac{1}{M} \cdot \sum_s \delta_s \tag{3.45a}$$

s.a. (3.1) a (3.39) (3.45b)

Para el problema abordado, como enfoque de múltiples escenarios, el enfoque CVaR permite discriminar soluciones de escenarios con valores extremos asociados a la distribución de datos. Al igual que un enfoque multicriterio, el enfoque multi escenario reduce la brecha entre varios escenarios para llegar a una solución compensada. En este caso, las soluciones multi objetivo presentan una distribución específica basada en el valor de las funciones objetivo. Para alcanzar

una solución de compensación para el problema de múltiples escenarios, el enfoque CVaR se puede utilizar teniendo en cuenta las siguientes características de la formulación:

a) Considere un conjunto de funciones objetivas: $\Phi = \{\phi_1(x), ..., \phi_n(x)\}$ para un conjunto de escenarios $J = \{1, ..., m\}$, en los que $j \in J$. La solución óptima para el escenario $j$ se define por la solución óptima $\phi^*_j$ que se determina por el conjunto de decisiones $x_j \in \mathbb{R}$. Esto se asocia a la medida discreta del *gap* $\delta_j(x)$ que es la diferencia del valor de la función objetiva con respecto a la que alcanza un equilibrio entre las soluciones óptimas de los escenarios $m$ involucrados en el problema de múltiples escenarios.
b) Teniendo en cuenta la variable $\delta$ con la probabilidad $p_j = 1/m$, el CVaR de la variable $\delta$ con el parámetro $\alpha \in [1, 0]$ se define de la siguiente manera:

$$CVaR_\alpha(\delta(x)) = \min_{v\in\mathbb{R}} \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^{J} \left( v + \frac{1}{1-\alpha} [\delta_j(x) - v]_+ \right) \tag{3.46}$$

Dónde $[v]_+ = \max\{v, 0\}$

c) Para minimizar la medida de brecha o carencia (gap), se resuelve el problema de minimización de CVaR y la solución calculada se define como una solución de compensación entre múltiples escenarios. Se expresa de la siguiente manera:

$$\min_{x\in X} CVaR_\alpha(\delta) \Leftrightarrow \min_{(v,x)\in x\times\mathbb{R}} v + \frac{1}{(1-\alpha)\cdot m} \sum_{j=1}^{J} [\delta_j(x) - v]_+ \tag{3.47}$$

Conduce a expresiones 3.44 y 3.45a.

d) El enfoque CVaR permite interpretar soluciones óptimas asociadas a los diferentes escenarios como muestras de una población. El uso de CVaR penaliza la gran brecha en la $1 - \alpha$ cola de distribución de las soluciones óptimas asociadas a los escenarios implicados en el problema multi escenario. Se ilustra en la **Fig. 3.2**, donde se asume una distribución normal de los valores de $\delta$.
e) Calcular el CVaR de la insatisfacción es equivalente a ordenar los valores de $J$ en orden creciente, tomar los elementos más grandes de $1 - \alpha$ y promediarlos. Se observa que la

solución de CVaR converge a la solución en el peor de los casos ($\alpha \rightarrow 1$) y a la solución media ($\alpha \rightarrow 0$). Para el análisis presentado en este trabajo, se utiliza la solución $\alpha \rightarrow 0$.

f) La métrica CVaR puede evitar el conservadurismo extremo de la solución en el peor de los casos. Evita una situación en la que un escenario, definido por la distribución de soluciones óptimas, domine la solución de compensación y permite explorar si una decisión cambia cuando descartamos ciertos elementos de la población.

g) Por último, CVaR es una función convexa que puede ser manejada por algoritmos de optimización estándar. Como consecuencia, es posible utilizarlo como una herramienta de análisis multiobjetivo, multi escenario en problemas de programación MILP o MINLP.

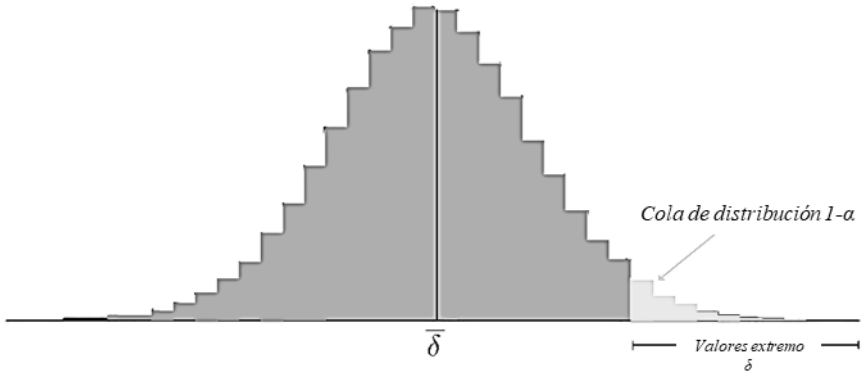



**Figura 3.2** Distribución de soluciones óptimas de escenario.

## 3.3 Desarrollo de un modelo estocástico para la sustitución de un combustible fósil

Este modelo de optimización se basa en contribuciones de secciones anteriores (Díaz-Trujillo & Nápoles-Rivera, 2019) y la **Fig. 3.3** presenta la representación esquemática de la cadena de suministro de biogás en competencia con un combustible fósil (combustible fresco). Esta superestructura se divide en tres secciones principales: cadena de suministro de biogás, caudal de combustible fresco y demanda de energía. La cadena de suministro de biogás se subdivide en tres secciones: fuente de biomasa, procesamiento y tecnologías de purificación, donde el tipo de biomasa $i$ puede provenir de cualquier fuente de suministro $f$ y se transporta a un lugar $l$ para ser procesado con una tecnología de producción $j$ para producir biogás no purificado y digestato. El digestato se puede vender al mercado y el biogás no purificado se transporta a un lugar para ser purificado con una tecnología de purificación $k$ para producir biogás purificado (llamado únicamente biogás en las siguientes secciones). El biogás purificado se puede vender al mercado para satisfacer la demanda de energía. Como se puede ver en la **Fig. 3.3**, el biogás competirá con

el combustible fresco para satisfacer la demanda de energía teniendo en cuenta que el combustible fresco tiene toda la infraestructura necesaria para ser vendido en el mercado. La formulación del modelo y las consideraciones de la inversión en la cadena de suministro de biogás para sustituir el combustible fresco se describen en la siguiente sección.

### *3.3.1 Implicaciones principales*

El trabajo al que se hace referencia consiste en la síntesis de una cadena de suministro de biogás para satisfacer la demanda en una región geográfica mediante la instalación óptima de tecnologías de procesamiento y purificación utilizando diferentes tipos de biomasa disponibles, así como determinar qué tecnología debe instalarse teniendo en cuenta los aspectos económicos y ambientales. En este trabajo, el modelo incluye balances de masa similares y ecuaciones de rendimiento similares de las tecnologías de procesamiento y purificación utilizadas en previas secciones. Sin embargo, considera la competencia con otro combustible usado en la actualidad (GLP, gas natural, gas de esquisto, etcétera.), llamado combustible fresco en la formulación del modelo. Todo esto se basa en la superestructura que se muestra en la **Fig. 3.3** y desarrollado como una formulación de optimización multiobjetivo, que incluye una función económica y consideraciones ambientales. En cuanto a las consideraciones medioambientales, el modelo sólo incluye las emisiones de GEI generadas por el combustible fresco porque el modelo compara las emisiones de combustión bajo las siguientes consideraciones. Las emisiones de GEI por combustión de biogás y biomasa/digestato pueden considerarse insignificantes porque provienen de la biomasa y éstas no modifican el equilibrio del $CO_2$ atmosférico (ciclo de carbono); es decir, las emisiones de $CO_2$ por combustión se consideran biogénicas debido al biogás procedente de la biomasa y, a su vez, a la biomasa procedente de la captura del $CO_2$ atmosférico (Paolini et al., 2018). Aunque en el desarrollo del modelo mostrado anteriormente (Díaz-Trujillo & Nápoles-Rivera, 2019), las emisiones generadas por la cadena de suministro (por transporte, uso de tecnologías de producción y purificación) se han considerado en el estudio del proyecto de biogás, en este trabajo, estas emisiones no se tienen en cuenta debido a que varios estudios muestran que los factores de emisión de la cadena de biogás, gas natural y productos del petróleo son 14,9, 12,8 y 10,7 g de $CO_2$eq por MJ (Moro & Lonza, 2018), respectivamente. Además, se ha informado de que el promedio de las emisiones de los diferentes combustibles se encuentra en un rango de 11,3 a 16,8 g de $CO_2$eq por MJ lo cual representa una pequeña porción en comparación con el valor de la combustión (World LP Gas Association, 2007) y la diferencia entre las emisiones es mínima. Por lo tanto, la formulación matemática propuesta se presenta a continuación.

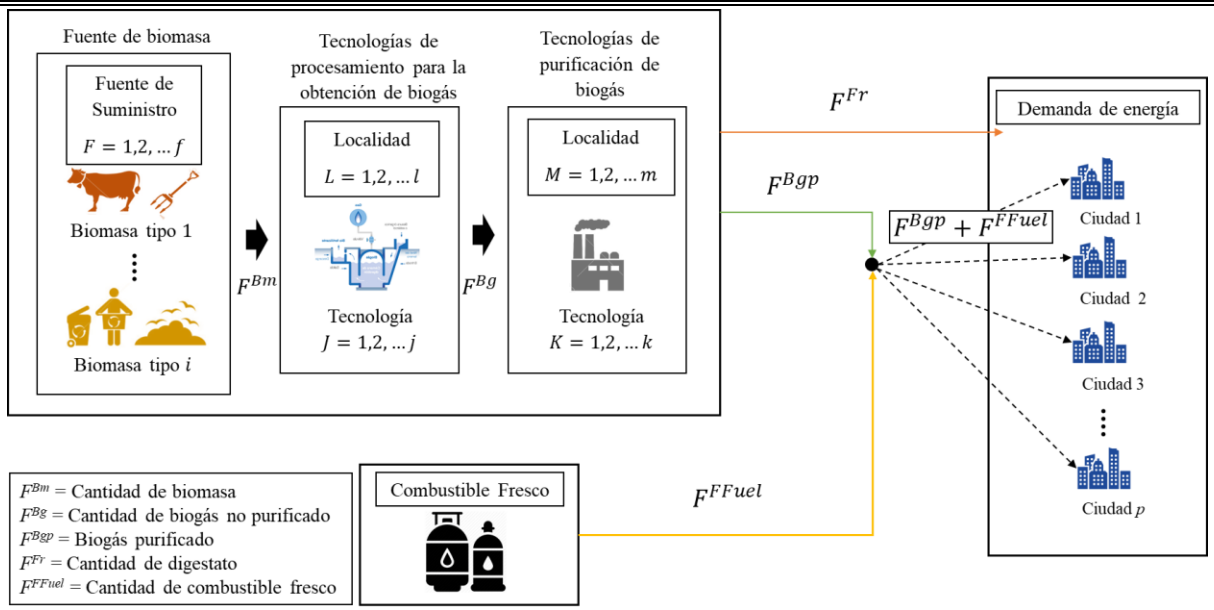



***Figura 3.3*** *Superestructura para suplir un combustible fósil.*

### *3.3.2 Balances y restricciones*

Los saldos y restricciones se describen a partir de izquierda a derecha para cada sección presentada en la **Fig. 3.3**.

*En la sección de fuentes de biomasa:* la restricción de la disponibilidad de biomasa se describe en la Ec. 3.48. La suma de cada biomasa $i$ requerida en todos los lugares $l$ procedentes de cada fuente de suministro $f$ ($F^{Bm}_{i,f,l,t}$) debe ser inferior o igual a la cantidad de biomasa disponible en cada fuente ($\vartheta^{Bm}_{i,f,t}$):

$$\sum_{l} F^{Bm}_{i,f,l,t} \leq \vartheta^{Bm}_{i,f,t} \qquad \forall\, (i \in I, f \in F, t \in T) \tag{3.48}$$

*Antes de procesar la biomasa:* las Ecs. 3.49 y 3.50 representan los balances de masa antes de procesar la biomasa. La cantidad de biomasa total en cada lugar de procesamiento $l$( $F^{Bm_Total}_{i,l,t}$) debe ser igual a la suma de la cantidad de biomasa procedente de todas las fuentes ($F^{Bm}_{i,f,l,t}$) y también debe ser la suma de la cantidad de biomasa que se puede distribuir a todas las tecnologías de procesamiento $j$ que se convertirán en biogás ($F^{Bm_conv}_{i,l,j,t}$).

$$F_{i,l,t}^{Bm_Total} = \sum_{f} F_{i,f,l,t}^{Bm} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, t \in T) \tag{3.49}$$

$$F_{i,l,t}^{Bm_Total} = \sum_{j} F_{i,l,j,t}^{Bm_conv} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, t \in T) \tag{3.50}$$

*En la sección de tecnologías de procesamiento:* las Ecs. 3.51 y 3.52 representan que la cantidad de biogás total generada por diferentes fuentes de biomasa en cada ubicación de procesamiento ($F_{i,l,t}^{Bg_Total}$ ) debe ser igual a la suma de la cantidad de biogás procedente de todas las tecnologías de procesamiento que puedan utilizarse en cada lugar de procesamiento ($F_{i,l,j,t}^{Bg}$) y también debe ser igual a la suma de la cantidad de biogás que se transporta a la ubicación $m$ ($F_{i,l,m,t}^{Bg}$). Además, la cantidad total de digestato en el lugar $l$ de cada fuente de biomasa ($F_{i,l,t}^{Fr_Total}$) debe ser igual a la suma de la cantidad de digestato procedente de todas las tecnologías de procesamiento ($F_{i,l,j,t}^{Fr}$) y debe ser igual a la suma del digestato distribuido al mercado $q$ ($F_{i,l,q,t}^{Fr_dem}$) (Ecs. 3.53 y 3.54). La Ec. 3.55 describe la cantidad total de digestato exigido en el mercado $q$ ($F_{i,q,t}^{Fr_dem_Total}$).

$$F_{i,l,t}^{Bg_Total} = \sum_{j} F_{i,l,j,t}^{Bg} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, t \in T) \tag{3.51}$$

$$F_{i,l,t}^{Bg_Total} = \sum_{m} F_{i,l,m,t}^{Bg} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, t \in T) \tag{3.52}$$

$$F_{i,l,t}^{Fr_Total} = \sum_{j} F_{i,l,j,t}^{Fr} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, t \in T) \tag{3.53}$$

$$F_{i,l,t}^{Fr_Total} = \sum_{q} F_{i,l,q,t}^{Fr_dem} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, t \in T) \tag{3.54}$$

$$F_{i,q,t}^{Fr_dem_Total} = \sum_{l} F_{i,l,q,t}^{Fr_dem} \qquad \forall\, (i \in I, q \in Q, t \in T) \tag{3.55}$$

Las cantidades de biogás y digestato generadas por las tecnologías de procesamiento están relacionadas con el caudal procesado en cada tecnología a través de un factor de eficiencia ($\chi_{i,j}^{Bg}$ y $\chi_{i,j}^{Fr}$ respectivamente) (Ecs. 3.56 y 3.57).

$$F_{i,l,j,t}^{Bg} = \chi_{i,j}^{Bg} \times F_{i,l,j,t}^{Bm_conv} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, j \in J, t \in T) \tag{3.56}$$

$$F_{i,l,j,t}^{Fr} = \chi_{i,j}^{Fr} \times F_{i,l,j,t}^{Bm_conv} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, j \in J, t \in T) \tag{3.57}$$

Las capacidades de las tecnologías de producción se describen en las Ecs. 3.58 y 3.59. Las cantidades de biogás y digestato deben ser inferiores o iguales a la capacidad máxima de estas tecnologías ($\gamma_j^{Bg}$, $\gamma_j^{Fr}$) y, al mismo tiempo, deben ser mayores que la capacidad mínima multiplicada por una variable de decisión $y_{j,l}$.

$$\gamma_j^{Bg_min} \times y_{j,l} \leq \sum_i F_{i,l,j,t}^{Bg} \leq \gamma_j^{Bg_max} \times y_{j,l} \qquad \forall\, (l \in L, j \in J, t \in T) \tag{3.58}$$

$$\gamma_j^{Fr_min} \times y_{j,l} \leq \sum_i F_{i,l,j,t}^{Fr} \leq \gamma_j^{Fr_max} \times y_{j,l} \qquad \forall\, (l \in L, j \in J, t \in T) \tag{3.59}$$

*Antes de purificar el biogás:* La cantidad total de biogás, que se purifica en el lugar $m$ ($F_{i,m,t}^{Bg_conv_Total}$), debe ser igual a la suma de biogás generado por todas las ubicaciones $l$ y debe ser igual a la suma de biogás distribuido a toda la tecnología de purificación $k$ en cada ubicación $m$ ($F_{i,m,k,t}^{Bg_conv}$) (Ecs. 3.60 y 3.61).

$$F_{i,m,t}^{Bg_conv_Total} = \sum_l F_{i,l,m,t}^{Bg} \qquad \forall\, (i \in I, m \in M, t \in T) \tag{3.60}$$

$$F_{i,m,t}^{Bg_conv_Total} = \sum_k F_{i,m,k,t}^{Bg_conv} \qquad \forall\, (i \in I, m \in M, t \in T) \tag{3.61}$$

*En la sección de tecnologías de purificación:* La cantidad total de biogás purificado (Ecs. 3.62 y 3.63) generada por cada tecnología de purificación $k$ en cada ubicación $m$ ($F_{k,m,t}^{Bgp_Total}$) debe ser igual a la suma de las cantidades de biogás purificados procedentes de toda la biomasa $i$ para cada

tecnología $k$ y ubicación $m$ ( $F_{i,m,k,t}^{Bgp}$) y debe ser igual a la suma de biogás purificado distribuido al mercado $p$ ($F_{k,m,p,t}^{Bgp_dem}$). La Ec. 3.64 describe la cantidad total de biogás exigida en el mercado $p$ ($F_{k,m,p,t}^{Bgp_dem}$).

$$F_{k,m,t}^{Bgp_Total} = \sum_{i} F_{i,m,k,t}^{Bgp} \qquad \forall\, (k \in K, m \in M, t \in T) \tag{3.62}$$

$$F_{k,m,t}^{Bgp_Total} = \sum_{p} F_{k,m,p,t}^{Bgp_dem} \qquad \forall\, (k \in K, m \in M, t \in T) \tag{3.63}$$

$$F_{k,p,t}^{Bgp_dem_Total} = \sum_{m} F_{k,m,p,t}^{Bgp_dem} \qquad \forall\, (k \in K, p \in P, t \in T) \tag{3.64}$$

El rendimiento del biogás purificado es dado por la Ec. 3.65 con su factor de eficiencia ($\chi_{i,k}^{Bgp}$).

$$F_{i,m,k,t}^{Bgp} = \chi_{i,k}^{Bgp} \times F_{i,m,k,t}^{Bg_conv} \qquad \forall\, (i \in I, m \in M, k \in K, t \in T) \tag{3.65}$$

Las capacidades de las tecnologías de actualización se describen en la Ec. 3.66. La cantidad de biogás purificado debe ser inferior o igual a la capacidad máxima de estas tecnologías ($\gamma_{k}^{Bgp}$) y, al mismo tiempo, debe ser mayor que la capacidad mínima multiplicada por una variable de decisión $y_{j,l}$.

$$\gamma_{k}^{Bgp_min} \times y_{k,m} \leq \sum_{i} F_{i,m,k,t}^{Bgp} \leq \gamma_{k}^{Bgp_max} \times y_{k,m} \qquad \forall\, (m \in M, k \in K, t \in T) \tag{3.66}$$

Observe que hay una suma de todas las cantidades de tipo de biomasa $i$ en cada ecuación citada anteriormente (Ecs. 3.58, 3.59 y 3.66). Esta suma indica que los importes del producto no se pueden generar al mismo tiempo (es decir, cada importe del producto toma una parte del período de tiempo $t$). Por lo tanto, la capacidad máxima no se indexa para cada tipo de biomasa $i$.

*Sección de combustible fresco:* la cantidad total de combustible fresco en competencia con el biogás es igual a la suma de todas las ciudades del mercado $p$ (Ec. 3.67).

$$F_t^{FFuel_Total} = \sum_p F_{p,t}^{FFuel_dem} \qquad \forall\, (t \in T) \tag{3.67}$$

*Sección de demanda de energía:* las demandas energéticas mínimas y máximas de los productos son dadas por Ecs. (3.68) y (3.69). La suma de las cantidades de biogás purificados en los lugares $m$ generados por diferentes tecnologías más la cantidad de combustible fresco debe satisfacer la demanda de energía del mercado $p$. Esta suma debe ser menor o igual que igual o mayor o igual que la demanda máxima y mínima ($\eta^{max}$y $\eta^{min}$) necesaria en el mercado, respectivamente. Cabe señalar en la Ec. (3.68) que las cantidades de biogás y combustible fresco se multiplican por sus valores de calentamiento ($H^{Bgp}$ y $H^{FFuel}$) y densidad normal ($\rho^{Bg_N}$) con el fin de obtener unidades consistentes. Dado que existe un exceso de digestato, la Ec. (3.69) se formula de esta manera para evitar que la producción de biogás se limite cuando se alcanza la demanda máxima de digestato. Cabe señalar que la Ec. (3.68) representa la competencia entre el biogás y el combustible fresco (es decir, la demanda de energía puede ser satisfecha ya sea por el biogás y/o el combustible fresco).

$$\eta_{p,t}^{Fuel_min} \leq \left(\sum_k \sum_m F_{k,m,p,t}^{Bgp_dem}\right) \times H^{Bgp} \times \rho^{Bg_N} + \left(F_{p,t}^{FFuel_dem} \times H^{FFuel}\right) \leq \eta_{p,t}^{Fuel_max} \qquad \forall\, (p \in P, t \in T) \tag{3.68}$$

$$\eta_{o,q,t}^{Fr_min} \leq \sum_i \sum_l F_{i,l,q,t}^{Fr_dem} - \sum_i \sum_l \sum_j F_{i,l,j,t}^{Fr_excess} \leq \eta_{o,q,t}^{Fr_max} \qquad \forall\, (o \in O, q \in Q, t \in T) \tag{3.69}$$

*Existencia de tecnologías de procesamiento y purificación:* las tecnologías de procesamiento y purificación $j$ y $k$, respectivamente, dependen de variables binarias ($y_{j,l}$ y $y_{k,m}$) que determinen su existencia. En este caso, las Ecs. 3.70 y 3.71 indican que solo se puede instalar una tecnología en cada ubicación.

$$\sum_j y_{j,l} \leq 1 \qquad \forall\, (l \in L) \tag{3.70}$$

$$\sum_{k} y_{k,m} \leq 1 \qquad \forall\, (m \in M) \tag{3.71}$$

### *3.3.3 Modelo económico*

Los ingresos asociados a la venta de productos son dados por las Ecs. 3.72 a 3.74**.** Cada cantidad de producto se multiplica por el parámetro de precio de venta. Donde $R_{k,p,t}^{Bgp}$, $R_{i,q,t}^{Fr}$ y $R_{p,t}^{FFuel}$ son los parámetros de precio de venta respectivos utilizados en la ecuación de energía.

$$PBgRevenue = \sum_{k}\sum_{m}\sum_{p}\sum_{t}\left(R_{k,p,t}^{Bgp} \times F_{k,m,p,t}^{Bgp_dem}\right) \times H^{Bgp} \times \rho^{Bg_N} \tag{3.72}$$

$$DigestateRevenue = \sum_{i}\sum_{l}\sum_{q}\sum_{t}\left(R_{i,q,t}^{Fr} \times F_{i,l,q,t}^{Fr_dem}\right) \tag{3.73}$$

$$FFuelRevenue = \left(\sum_{p}\sum_{t} R_{p,t}^{FFuel} \times F_{p,t}^{FFuel_dem}\right) \times H^{FFuel} \tag{3.74}$$

El costo asociado con la compra, el transporte, el capital y las operaciones de biomasa se calcula mediante las Ecs. 3.75 a 3.78. Los costos de compra, transporte y operación de biomasa son obtenidos por el producto entre las cantidades de materia prima y productos multiplicado por un costo unitario ($C^{Bm}$, $C^{Trans}$ y $C^{Var.Prod}$), mientras que el costo de capital se calcula utilizando una variable binaria que decide si la tecnología está instalada o no y utilizando un factor de anualización.

$$PurchBmCost = \sum_{i}\sum_{f}\sum_{l}\sum_{t}\left(C_{i,f,t}^{Bm} \times F_{i,f,l,t}^{Bm}\right) \tag{3.75}$$

$$TransCost = \sum_{i}\sum_{f}\sum_{l}\sum_{t}\left(C_{i,f,l,t}^{Trans,Bm} \times F_{i,f,l,t}^{Bm}\right) + \sum_{i}\sum_{l}\sum_{m}\sum_{t}\left(C_{i,l,m,t}^{Trans,Bg} \times F_{i,l,m,t}^{Bg}\right) + \sum_{k}\sum_{m}\sum_{p}\sum_{t}\left(C_{k,m,p,t}^{Trans,Bgp} \times F_{k,m,p,t}^{Bgp_dem}\right) + \sum_{i}\sum_{l}\sum_{q}\sum_{t}\left(C_{i,l,q,t}^{Trans,Fr} \times F_{i,l,q,t}^{Fr_dem}\right) \quad (3.76)$$

$$CapitalCost = K \times \left[\sum_{j}\sum_{l}\sum_{t}\left(C_{j,l}^{Fix,Prod_tech} \times y_{j,l}\right) + \sum_{k}\sum_{m}\sum_{t}\left(C_{k,m}^{Fix,Pur_tech} \times y_{k,m}\right)\right] \quad (3.77)$$

$$OpCost = \sum_{i}\sum_{l}\sum_{j}\sum_{t}\left(C_{l,j,t}^{Var,Prod_tech} \times F_{i,l,j,t}^{Bm_conv}\right) + \sum_{i}\sum_{m}\sum_{k}\sum_{t}\left(C_{m,k,t}^{Var,Pur_tech} \times F_{i,m,k,t}^{Bg_conv}\right) \quad (3.78)$$

El factor de anualización ($K$), de las tecnologías de procesamiento $j$ y purificación $k$, respectivamente, está determinado por la Ec. 3.79, donde $\alpha$ es la tasa de descuento utilizada para determinar el costo anual y $N$ es la vida útil esperada para cada tecnología.

$$K = \left[\frac{(1+\alpha)^N \times \alpha}{(1+\alpha)^N - 1}\right] \quad (3.79)$$

### *3.3.4 Modelo ambiental*

Las emisiones de GEI generadas mediante el uso de combustible fresco se presentan en la Ec. 3.80.

$$FFuelEmission = E^{Use,FFuel} \times H^{FFuel} \sum_{t} F_{t}^{FFuel_Total} \quad \forall\, s \quad (3.80)$$

### *3.3.5 Funciones objetivo*

La función objetivo está formulada para tres casos diferentes para comparar el efecto de la monetización positiva o negativa en las emisiones de GEI frente a una estrategia multiobjetivo que tiene como objetivo obtener mejores soluciones minimizando las emisiones y maximizando el beneficio económico. Antes de explicar los casos, es necesario aclarar que las emisiones totales de GEI generadas por el sistema propuesto son las emisiones de GEI generadas sólo por la quema de combustible fresco (Ec. 3.81) porque no se tienen en cuenta las emisiones de biogás. A continuación, la formulación para la función objetiva para cada caso se da de la siguiente manera.

$$TotalGHG = FFuelEmission \tag{3.81}$$

*Caso 1.* El primer caso trata de maximizar el beneficio total (Ec. 3.82) haciendo una competencia entre el biogás y el combustible fresco. La producción de biogás se estimula mediante el impuesto sobre las emisiones de carbono. Entonces, se espera que las emisiones de GEI puedan disminuir debido a una penalización de las emisiones de GEI generadas por el combustible fresco. La **Tabla 3.1** presenta los valores del impuesto sobre las emisiones de carbono utilizados en cada escenario de este caso. Los impuestos sobre las emisiones de carbono (ETS) varían sustancialmente, desde menos de 1 € por tonelada de $CO_2$eq hasta un máximo de 126 € por toneladas de $CO_2$eq dependiendo de las políticas del país (World Bank and Ecofys, 2018). Por este motivo, la **Tabla 3.1** muestra los valores de este rango.

$$\begin{aligned} TotalProfit = {} & PBgRevenue + DigestateRevenue + FFuelRevenue \\ & - (PurchBmCost + TransCost + CapitalCost + OpCost) \\ & - CTax(TotalGHG) \end{aligned} \tag{3.82}$$

*Caso 2.* El segundo caso trata de maximizar el beneficio total (Ec. 3.83) que estimula la producción de biogás mediante el comercio de emisiones de carbono (CT) (es decir, dar más competitividad con un incentivo económico al biogás sobre el combustible fresco y, en consecuencia, tener una reducción de las emisiones de GEI). La **Tabla 3.2** presenta los valores del comercio de emisiones de carbono utilizados en cada escenario de este caso. Los valores de comercio de emisiones de carbono varían sustancialmente, desde menos de 1 € por tonelada de $CO_2$eq hasta un máximo de 110 € toneladas de $CO_2$eq dependiendo de las políticas del país. Por este motivo, la **Tabla 3.2** muestra los valores de este rango. El valor de 200 € toneladas de $CO_2$eq corresponde a un valor extremo sólo para analizar el comportamiento de la implementación de este esquema.

$$TotalProfit = PBgRevenue + DigestateRevenue + FFuelRevenue - (PurchBmCost + TransCost + CapitalCost + OpCost) + CTrad(GHG^{UB} - TotalGHG) \quad (3.83)$$

*Caso 3.* Este último caso tiene como objetivo maximizar el beneficio y minimizar las emisiones de GEI simultáneamente. La Ec. 3.84 formula el enfoque de modelización multiobjetivo, donde $FO$ es la solución multiobjetivo y es igual a la diferencia entre el beneficio total y las emisiones totales multiplicadas por un parámetro $M$. El beneficio total se puede configurar utilizando el Caso 1 o Caso 2 o sin impuestos sobre el carbono y el comercio de carbono. Aquí, $M_1$ y $M_2$ son valores arbitrarios asignados a los objetivos para hacerlos del mismo orden de magnitud. Para obtener $M_1$ y $M_2$, en primer lugar, es necesario obtener el máximo valor del beneficio total y las emisiones totales. Una vez obtenidos, se le asigna el valor de $M = 1$ al mayor y FO se tomará como cero sólo para calcular el otra $M$ de la Ec. 3.84, de esta manera tanto el beneficio total como las emisiones totales estarán en el mismo orden de magnitud y finalmente $FO$ se podrán maximizar o minimizar. Por lo tanto, dado que el término ambiental en la formulación es negativo, si se maximiza $FO$ entonces el beneficio se maximizará y las emisiones de GEI se minimizarán. Aunque existen otros enfoques de modelización multi objetivos, como el método de restricción épsilon, la programación por meta, la metodología de múltiples partes interesadas, etcétera., este enfoque se eligió debido a la dificultad para obtener los límites máximos y mínimos de los objetivos económicos y medioambientales (los límites cambian en cada escenario).

$$FO = M_1 \times TotalProfit - M_2 \times TotalGHG \quad (3.84)$$

***Tabla 3.1*** *Coste por tonelada de $CO_2$eq en el impuesto sobre las emisiones de carbono (Caso 1).*

| **Escenario** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Coste (€/tonelada $CO_2$eq) | 8.93 | 13.39 | 22.32 | 28.57 | 36.61 | 46.43 | 100 |

***Tabla 3.2*** *Precio por tonelada de $CO_2$eq en el comercio de emisiones de carbono (Caso 2).*

| **Escenario** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Precio (€/tonelada $CO_2$eq) | 2.68 | 8.93 | 13.39 | 26.78 | 71.43 | 107.14 | 200 |

# CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Este capítulo se resuelven los modelos presentados en la sección de metodología. La primera parte corresponde a la aplicación del modelo determinista usando el método de la restricción épsilon para generar diagramas Pareto. La segunda parte muestra los resultados usando el enfoque CVaR a la incertidumbre asociada al proceso. Finalmente se presentan los resultados de la sustitución de combustible fósil por biogás usando una estrategia multi objetivo.

## 4.1 Resultados y discusión del modelo determinista

### *4.1.1 Caso de estudio*

En México, el gobierno federal espera que el 35% de la electricidad generada en 2024 provenga de fuentes de combustibles no fósiles y también se espera que para 2028 el biogás tenga una participación del 4,8% de la electricidad renovable. Por estas razones, se ha intentado establecer estrategias que puedan determinar si una producción de biogás es rentable con o sin subsidio gubernamental (Gutierrez et al., 2016). Para satisfacer esta afirmación, algunos de los principales combustibles fósiles utilizados en México son gas L.P. y gas natural, estos representan un consumo de aproximadamente 300 mil barriles por día y 7,000 millones de pies$^3$ por día respectivamente (SENER, 2014), lo que significa que podría tener un buen beneficio si estos combustibles fósiles fueron reemplazados por otro combustible renovable, en este caso, el biogás podría ser una buena opción. De esta manera, se consideraron dos estudios de caso para los estados de Guanajuato, Jalisco y Michoacán en México para mostrar la aplicabilidad de la formulación de optimización propuesta. Uno corresponde al caso cuando solo existe la venta de biogás purificado a los mercados, es decir, toda la producción de biogás proveniente de la tecnología de producción se actualiza en las tecnologías de purificación, y el otro implica tanto la venta de biogás purificado y no purificado.

***Tabla 4.1*** *Sectores de demanda de gas L.P. en México.*

| **Sector** | **%** |
|---|---|
| Residencial | 59.5 |
| Servicios | 14.8 |
| Autotransporte | 12.5 |
| Industrial | 10.3 |
| Petrolero | 1.5 |
| Agricultura | 1.4 |
| Total | 100 |

Los estados mexicanos seleccionados en los estudios de caso tienen una gran variedad de fuentes de biomasa, sin embargo, para esta aplicación del modelo, las fuentes de biomasa se limitarán a tres: estiércol de vaca, desechos orgánicos y aguas residuales. En la región geográfica de Guanajuato, Jalisco y Michoacán hay 31.800 toneladas por día de estiércol de vaca (INEGI, 2009), 7.500 toneladas por día de desechos orgánicos (INEGI, 2014) y más de 5 millones de toneladas por mes de aguas residuales (SEMARNAT & CONAGUA, 2014). Con respecto a la demanda del producto, las demandas de biogás se calcularon a partir de un consumo global per cápita en esta región para sustituir los requisitos de energía dados por el gas LP (6,16 kg de gas LP / mes per cápita (PROFECO, 2008) y teniendo en cuenta los sectores de demanda (**Tabla 4.1**), de la misma

manera, las demandas de biofertilizantes también fueron calculadas por información del banco global donde México demanda 102.20 kg de biofertilizante por hectárea de tierra cultivable (BIRF et al., n.d.), el área cultivable total para esta región geográfica es más de 2 millones de hectáreas (Instituto Nacional de Estádistica y Geografía (México), 2016a, 2016c, 2016b). El caso de estudio solo incluye algunas ciudades de la región geográfica (**Tabla 4.2**) y su disponibilidad de biomasa respectiva y la demanda de productos, así como la distancia entre ellas, se encuentran en el material complementario de este documento (ver Anexos).

***Tabla 4.2*** *Ciudades seleccionadas para el estudio del caso.*

| **Michoacán** | **Guanajuato** | **Jalisco** |
|---|---|---|
| Aguililla | Abasolo | Acatic |
| Apatzingán | San Miguel de Allende | Arandas |
| Arteaga | Manuel Doblado | Atotonilco el Alto |
| Coalcomán | Dolores Hidalgo | La Barca |
| Cotija | León | Degollado |
| La Huacana | Pénjamo | Encarnación de Díaz |
| Huetamo | Purísima del Rincón | Guadalajara |
| Morelia | Salvatierra | Jesús María |
| La Piedad | San Felipe | San Miguel el Alto |
| Puruándiro | San Luis de la Paz | Tamazula de Gordiano |
| Tanhuato | Silao | Tepatitlán de Morelos |
| Tepalcatepec | Valle de Santiago | Tomatlán |
| Zamora | Yuriria | Zapopan |
| | | Zapotlanejo |

Con respecto a las tecnologías utilizadas para la producción y purificación de biogás, el caso de estudio considera la implementación de tres tipos de biodigestores: planta de biogás de tambor flotante de cámara *(chamber-floating drum type biogas plant*), soporte de biogás de tambor flotante de digestor (*digester-floating drum type biogas holder*) y planta de biogás de tipo domo fijo (*fixed-dome type biogas plant*) (**Fig. 4.1**) (Yasar et al., 2017). La capacidad de producción de estos biodigestores oscila en 150 metros cúbicos por mes, los costos fijos son de aproximadamente 300 € y los costos variables alrededor de 0.47-1.46 € $m^3$, además, la producción de biofertilizantes necesita la instalación de una unidad de digestato que aumente costo del sistema de biogás. En este caso, el análisis representa una prensa de tambor de cribado (*screening drum press*) con 14 toneladas por mes de capacidad de producción y un costo fijo de 27, 299 € (Delzeit & Kellner, 2013). Se seleccionaron cinco tecnologías de purificación (*upgrading*) de biogás: adsorción por oscilación de presión (PSA), depuración de agua a alta presión (HPWS), depuración física orgánica (OPS), proceso de depuración química (CSP) y separación por membrana (MS). Estas tecnologías

de purificación tienen un factor de eficiencia que oscila entre 0,60 y 0,68; a una capacidad de purificación de alrededor de 500 metros cúbicos por hora, los costos fijos están entre 1,280,000 € a 2,080,000 € y los costos variables de 0.12 € a 0.4 € (Ullah Khan et al., 2017). La **Tabla 4.4** muestra las ecuaciones teniendo en cuenta la economía de escalas para cada tecnología de actualización que relaciona los costos fijos con su capacidad (Delzeit & Kellner, 2013).

***Tabla 4.3*** *Parámetros económicos para estudio del caso.*

| Parámetro | Tipo | Valor | Unidad | Referencia |
|---|---|---|---|---|
| $C_{i,f,t}^{Bm}$ | Excretas<br>Residuos Orgánicos<br>Aguas residuales | 1 | € ton$^{-1}$ | Supuesto |
| $C_{j,l}^{Fix,Prod_tech}$ | Floating Drum<br>Floating Drum Biogas Holder<br>Fixed Dome | 27,700 approx. | € | (Delzeit & Kellner, 2013; Yasar et al., 2017) |
| $C_{k,m}^{Fix,Pur_tech}$ | Ver Tabla 4.4 | | € | (Ullah Khan et al., 2017) |
| $C_{i,f,l,t}^{Trans,Bm}$ | Todos | 4.2 | € km$^{-1}$ ton$^{-1}$ | Calculado |
| $C_{i,l,m,t}^{Trans,Bg}$ | | 15.7 | € km$^{-1}$ Nm$^{-3}$ | Calculado |
| $C_{i,l,p,t}^{Trans,Bg}$ | | 15.7 | € km$^{-1}$ Nm$^{-3}$ | Calculado |
| $C_{k,m,p,t}^{Trans,Bgp}$ | | 14.5 | € km$^{-1}$ Nm$^{-3}$ | Calculado |
| $C_{i,l,q,t}^{Trans,Fr}$ | | 7.5 | € km$^{-1}$ ton$^{-1}$ | Calculado |
| $C_{l,j,t}^{Var,Prod_tech}$ | Floating Drum<br>Floating Drum Biogas Holder<br>Fixed Dome | 0.47<br>0.48<br>0.46 | € Nm$^{-3}$ | (Yasar et al., 2017) |
| $C_{m,k,t}^{Var,Pur_tech}$ | PSA<br>HPWS<br>OPS<br>CSP<br>MS<br>CS | 0.4<br>0.13<br>0.11<br>0.17<br>0.12<br>0.15 | € Nm$^{-3}$ | (Ullah Khan et al., 2017) |
| $N$ | | 10 | Years | Supuesto |
| $R_{i,p,t}^{Bg}$ | Excretas<br>Residuos Orgánicos<br>Aguas residuales | 10 | € Nm$^{-3}$ | Supuesto |
| $R_{k,p,t}^{Bgp}$ | PSA<br>HPWS<br>OPS<br>CSP<br>MS<br>CS | 10 | € Nm$^{-3}$ | Supuesto |
| $R_{i,q,t}^{Fr}$ | Excretas<br>Residuos Orgánicos<br>Aguas residuales | 5 | € Nm$^{-3}$ | Supuesto |
| $\alpha_j$ | Todos | 0.10 | - | Supuesto |
| $\alpha_k$ | | 0.10 | - | Supuesto |

***Tabla 4.4*** *Economías de escala para las tecnologías de purificación.*

| **Tecnología** | **Contaminante removido** | **Ecuación de economía de escalas**<br>**Capacidad, *C* ($m^3$/h)**<br>**Costo Fijo, *E* (€)** | **Intervalo ($m^3$/h)** |
|---|---|---|---|
| PSA | $CO_2$ | $E = 1.221C^2 - 683.67C + 1 \times 10^6$ | 250-1000 |
| HPWS | $CO_2, H_2S$ | $E = -3.3024C^2 + 5950.3C - 1 \times 10^6$ | 250-1000 |
| OPS | $CO_2, H_2O, H_2S$ | $E = -1.92C^2 + 3680C + 1.6 \times 10^5$ | 250-1000 |
| CSP | $H_2S$, H2O | $E = 1357.4C + 737189$ | 250-1000 |
| MS | $CO_2$ | $E = 1344C + 393600$<br>1 232 000 € | 100-600<br>700-1400 |

***Tabla 4.5*** *Parámetros ambientales para el estudio del caso.*

| **Parámetro** | **Tipo** | **Valor** | **Unidad** | **Referencia** |
|---|---|---|---|---|
| $E_{i,j}^{Bm_conv}$ | Excretas<br>Residuos Orgánicos<br>Aguas residuales | 0.48-0.65<br>(Promedio) | Ton $CO_2$eq $Ton^{-1}$ | |
| $E_{i,k}^{Bg_conv}$ | Excretas<br>Residuos Orgánicos<br>Aguas residuales | 0.35-0.89<br>(Promedio) | Ton $CO_2$eq $m^{-3}$ | |
| $E_{i,f}^{Source}$ | Excretas<br>Residuos Orgánicos<br>Aguas residuales | 0.48-0.65<br>(Promedio) | Ton $CO_2$eq $Ton^{-1}$ | Basado en (Garbs & Geldermann, 2018) |
| $E_{i,f,l}^{Trans,Bm}$ | Camión tipo volteo<br>Semi tráiler | 0.594 *d* | Ton $CO_2$eq $Ton^{-1}$ $km^{-1}$ | |
| $E_{i,l,m}^{Trans,Bg}$ | Camión cisterna | 0.4 *d* | Ton $CO_2$eq $m^{-3}$ $km^{-1}$ | |
| $E_{i,l,p}^{Trans,Bg}$ | Camión cisterna | 0.36 *d* | Ton $CO_2$eq $m^{-3}$ $km^{-1}$ | |
| $E_{k,m,p}^{Trans,Bgp}$ | Camión cisterna | 0.36 *d* | Ton $CO_2$eq $m^{-3}$ $km^{-1}$ | |
| $E_{i,l,q}^{Trans,Fr}$ | Camión tipo volteo<br>Semi tráiler | 0.36 *d* | Ton $CO_2$eq $Ton^{-1}$ $km^{-1}$ | |
| $E_i^{Use,Bg}$ | Todos | 0.0051 | Ton $CO_2$eq $m^{-3}$ $Ton^{-1}$ | Calculado |
| $E_k^{Use,Bgp}$ | | 0.0032 | Ton $CO_2$eq $m^{-3}$ $Ton^{-1}$ | Calculado |
| $E_i^{Use,Fr}$ | | 0.0015 | Ton $CO_2$eq $Ton^{-1}$ $Ton^{-1}$ | Calculado |

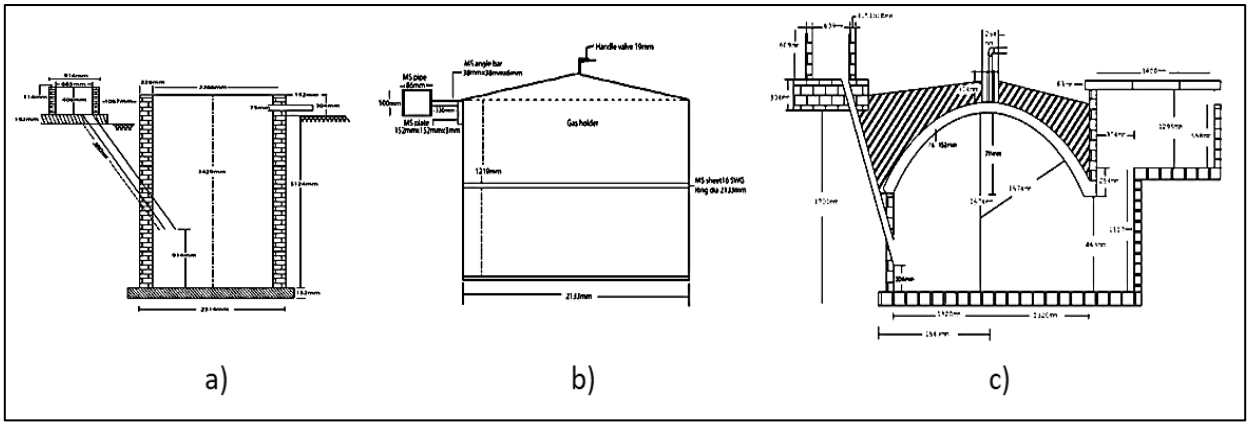



***Figura 4.1*** *Tipos de biodigestores para el estudio del caso: a) chamber-floating drum type biogas plant, b) digester-floating drum type biogas holder and c) fixed-dome type biogas plant.*

Las emisiones de gases de efecto invernadero representan un potencial de mitigación del calentamiento global (es decir, estas emisiones generadas por fuentes de biomasa, tecnologías y productos se analizan como emisiones de $CO_2$eq). Finalmente, los parámetros económicos y ambientales utilizados por el modelo de optimización se presentan en la **Tabla 4.3** y la **Tabla 4.5**. Para ambos estudios de caso, la tasa de descuento fue del 10% y la vida útil del proyecto a 10 años.

El problema se codificó en el software GAMS (Brook et al., 1988), donde se utilizó el solucionador BARON para resolver el problema de programación lineal de enteros mixtos (MILP) asociado. El problema consiste en 56,158 variables continuas, 54 variables binarias, y cada punto del conjunto de Pareto se resolvió en una computadora con procesador Intel® Core ™ i7 a 2.50 Hz con 8GB de RAM en aproximadamente 60 s de tiempo de CPU para cada solución óptima (escenario) de caso de estudio. La discusión de estos resultados se da a continuación.

### *4.1.2 Caso de estudio 1*

El conjunto de soluciones óptimas de Pareto que compensan el objetivo económico y ambiental para el caso de estudio 1, que corresponde al caso cuando solo existe la venta de biogás purificado a los mercados, se muestra en la **Fig. 4.2** y la **Fig. 4.3**. Debe notarse esa solución debajo de la curva son soluciones subóptimas y las soluciones arriba de la curva son soluciones inviables. La **Fig. 4.2** muestra las soluciones óptimas que representan el beneficio total frente al ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero, mientras que la **Fig. 4.3** muestra las soluciones óptimas que representan el beneficio total frente a las emisiones de gases de efecto invernadero solo generadas por la propia cadena de suministro de biogás (es decir, excluyendo el término de emisiones evitadas en el Ec. (39)). El escenario A corresponde al beneficio total máximo con las emisiones de gases de efecto invernadero más altas (el ahorro mínimo) y el escenario H corresponde a la solución con

las emisiones totales más bajas (el ahorro máximo) pero los beneficios más bajos (este escenario no se muestra en la curva Pareto debido al hecho de que su valor es negativo y aumenta la distancia con otros escenarios, ver **Tabla 4.6**), mientras que los escenarios B, C, D, E y F corresponden a soluciones intermedias que compensan estos dos escenarios extremos. Los escenarios intermedios pueden ser una herramienta en el proceso de toma de decisiones para seleccionar la mejor solución que satisfaga los requisitos deseados. Por lo tanto, los escenarios analizados en la curva de Pareto para el caso cuando solo existe la venta de biogás purificado a los mercados se muestran en la **Tabla 4.6**. Desde un punto de vista económico, los escenarios B, C, D y E tienen mayores beneficios, que representa menores costos fijos, esto significa que la implementación del proyecto de biogás y biofertilizante es rentable en comparación con los escenarios E, F y G que tienen ganancias negativas. El escenario A que presenta el mayor beneficio (solución con máximo beneficio) es 168.7% más atractivo económicamente que la solución menos atractiva (escenario E, sin tener en cuenta las emisiones mínimas de gases de efecto invernadero debido a la pérdida económica), sin embargo, las emisiones de gases de efecto invernadero aumentan 95.3 % del escenario E al escenario A. Obviamente, los escenarios F, G, H se evitan en cualquier toma de decisiones porque representan escenarios con pérdida económica. Estos escenarios presentan pérdidas que pueden alcanzar los 4,318,000 € pero que pueden lograr 130,000 toneladas anuales de ahorro de emisiones de GEI, desde un punto de vista ambiental es factible, sin embargo, los beneficios económicos son más importantes en un proyecto de inversión. Los escenarios G y H presentan ahorros de emisiones similares, con una gran diferencia en los costos, esto se debe a las tecnologías seleccionadas en cada caso. Teniendo el escenario H como las tecnologías más caras para la mejora del biogás.

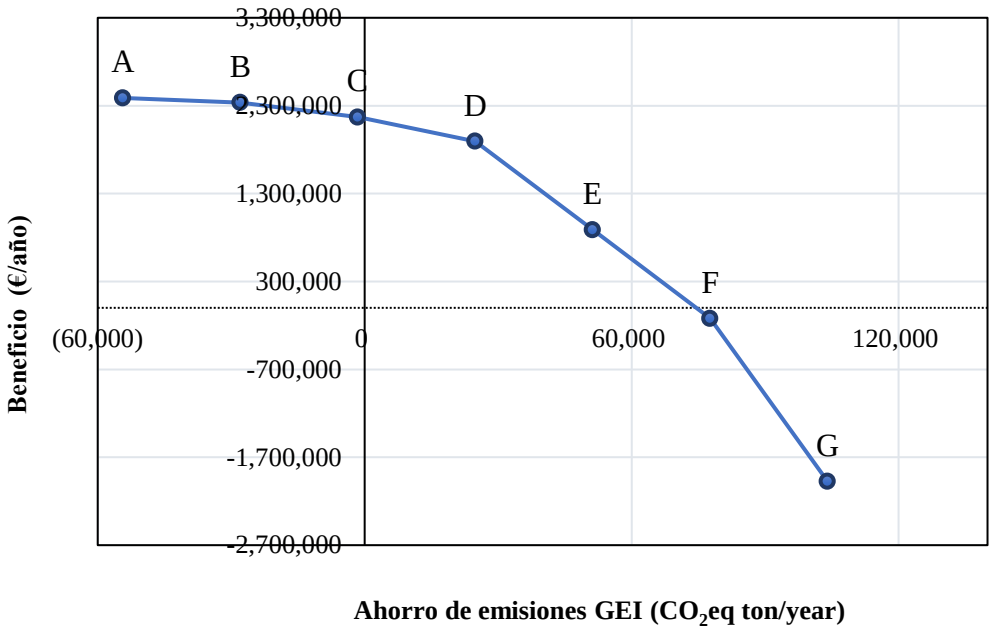



***Figura 4.2*** *Soluciones Pareto para el Caso 1. Ahorro de emisiones GEI.*

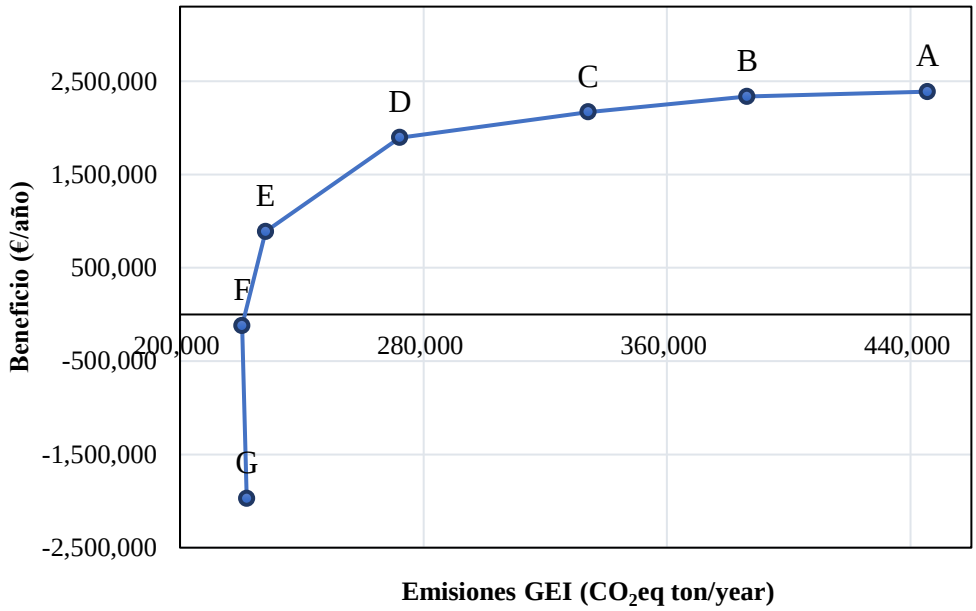



***Figura 4.3*** *Soluciones Pareto para el Caso 1. Emisiones GEI.*

Con respecto a la ubicación óptima y la selección de tecnologías, la **Tabla 4.7** muestra la configuración de la tecnología en la ubicación óptima, es decir, donde debe instalarse. Las ciudades elegidas para todos los escenarios son siete ciudades de la región geográfica estudiada. Para el escenario A (con el beneficio máximo) para las siete ciudades, la planta de biogás de tambor

flotante con HPWS debería instalarse, mientras que el escenario H (con el ahorro máximo de emisiones de GEI) tiene dos configuraciones: el tipo de tambor flotante de cámara planta de biogás con CSP y el soporte de biogás de tambor flotante de digestor con CSP. Debe notarse que los escenarios B, C y D tienen la misma configuración tecnológica que el escenario A porque presentan costos fijos similares (**Tabla 4.6**). Por otro lado, el escenario E tiene dos configuraciones factibles con las tecnologías de purificación (es decir, HPWS y MS), mientras que los escenarios F y G tienen más de tres configuraciones (es decir, HPWS, CSP y MS para el escenario F, y HPWS, OPS, CSP y MS para el escenario G). Entonces, las tecnologías de procesamiento y purificación tienen un papel importante en los resultados económicos y ambientales como se analizó previamente. De la **Tabla 4.6**, se puede notar que, aunque los ingresos por biogás y los costos de transporte tienen influencia en los beneficios, efectivamente la configuración de la tecnología tiene un alto impacto en las ganancias y el ahorro de emisiones de GEI (ver costos fijos y emisiones de conversión). En la **Tabla 4.8** se muestran los caudales para todos los escenarios donde se puede observar que el 75% de los escenarios no usan estiércol como materia prima, la mayoría de estos escenarios usan desechos orgánicos y aguas residuales para producir biogás y biofertilizante con 88% y 75% respectivamente para este caso de estudio.

***Tabla 4.6*** *Resultados para el estudio del caso 1.*

| | | **Ingresos (€/año)** | | | **Costos (€/año)** | | | | **Emisiones GEI ($CO_2$eq Ton/año)** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Escenario** | **Beneficio (€/año)** | **Biogás sin purificar** | **Biogás purificado** | **Biofertilizante** | **Biomasa** | **Transporte** | **Fijos** | **Variables** | **Transporte** | **Conversión** | **Uso** |
| [a]A | 2,388,100 | - | 6,378,300 | 46,813 | 26,750 | 1,872,500 | 2,064,200 | 73,542 | 89,879 | 354,660 | 1,035 |
| B | 2,335,200 | - | 5,968,500 | 43,991 | 25,138 | 1,519,000 | 2,064,200 | 68,866 | 72,914 | 312,460 | 968 |
| C | 2,169,600 | - | 5,769,300 | 44,402 | 25,373 | 1,487,500 | 2,064,200 | 67,073 | 71,401 | 261,780 | 936 |
| D | 1,894,900 | - | 5,392,100 | 43,365 | 24,780 | 1,388,400 | 2,064,200 | 63,189 | 66,643 | 204,680 | 876 |
| E | 888,620 | - | 4,803,700 | 37,753 | 21,573 | 904,310 | 2,971,400 | 55,546 | 43,407 | 183,930 | 780 |
| F | -120,300 | - | 4,848,100 | 37,957 | 21,690 | 923,790 | 3,998,600 | 62,287 | 44,342 | 175,270 | 787 |
| G | -1,974,000 | - | 5,026,700 | 40,416 | 23,095 | 1,063,100 | 5,885,100 | 69,723 | 51,027 | 170,070 | 816 |
| [b]H | -4,318,000 | - | 5,439,000 | 42,645 | 24,368 | 1,396,500 | 8,292,300 | 86,076 | 67,033 | 169,600 | 883 |

Tasa de interés 10%, N = 10 años, a Maximizando Beneficio, b Maximizando Ahorro de Emisiones.

***Tabla 4.7*** *Ubicación y selección optima de las tecnologías para escenarios extremo en los Casos 1 y 2.*

| Localidad | Caso 1 | | Caso 2 | |
|---|---|---|---|---|
| | **Escenario A** | **Escenario H** | **Escenario A** | **Escenario H** |
| **Michoacán** | | | | |
| Morelia | Floating Drum y HPWS | Floating Drum y CSP | Floating Drum y HPWS | Floating Drum y PSA |
| La Piedad | Floating Drum y HPWS | Floating Drum Biogas Holder y CSP | Floating Drum y HPWS | Floating Drum Biogas Holder y CSP |
| **Guanajuato** | | | | |
| León | Floating Drum y HPWS | Floating Drum y CSP | Floating Drum y HPWS | Floating Drum y PSA |
| **Jalisco** | | | | |
| Arandas | Floating Drum y HPWS | Floating Drum Biogas Holder y CSP | Floating Drum y HPWS | Floating Drum Biogas Holder y CSP |
| Guadalajara | Floating Drum y HPWS | Floating Drum y CSP | Floating Drum y HPWS | Floating Drum Biogas Holder y PSA |
| San Miguel El Alto | Floating Drum y HPWS | Floating Drum y CSP | Floating Drum y HPWS | Floating Drum Biogas Holder y CSP |

Finalmente, hay dos soluciones adecuadas que compensan ambos objetivos, estos podrían ser el escenario C, que tiene una ganancia anual de 2,169,550 € y el escenario D con una ganancia anual de 1,894,881 €. Para el escenario C, el beneficio es igual al 90.1% del beneficio máximo (escenario A). Mientras que el escenario D representa el 79.3% del beneficio económico otorgado por el escenario A. Además, en términos de emisiones, estos se reducen en un 33.3% (111,460 ton de $CO_2$eq por año) en el escenario C y 63.7% (173,380 ton de $CO_2$eq por año) en el escenario D, esto en comparación con las emisiones de GEI generadas por el escenario A. Al mismo tiempo, el ahorro de emisiones de GEI es apreciable para los escenarios C y D (-1,566 ton de $CO_2$eq por año y 24,835 ton de $CO_2$eq por año respectivamente) (**Fig. 4.2**), es decir, se generan 1,566 toneladas anuales y se disminuyen 24,835 toneladas en comparación con las emisiones generadas por la misma cantidad de biomasa, pero utilizadas para otro propósito. La configuración de la tecnología para los escenarios C y D involucra la planta de biogás de tambor flotante con HPWS. La **Fig. 4.4** y la **Fig. 4.5** muestran los caudales y la configuración de la tecnología para los escenarios C y D, respectivamente. Debe notarse que la diferencia entre estos dos escenarios es el tipo de biomasa utilizada para la producción de biogás, considerando que la distribución del producto se mantiene similar. Luego, de acuerdo con la discusión previa, el escenario D puede ser una opción factible que garantice un buen equilibrio entre los problemas económicos y ambientales.

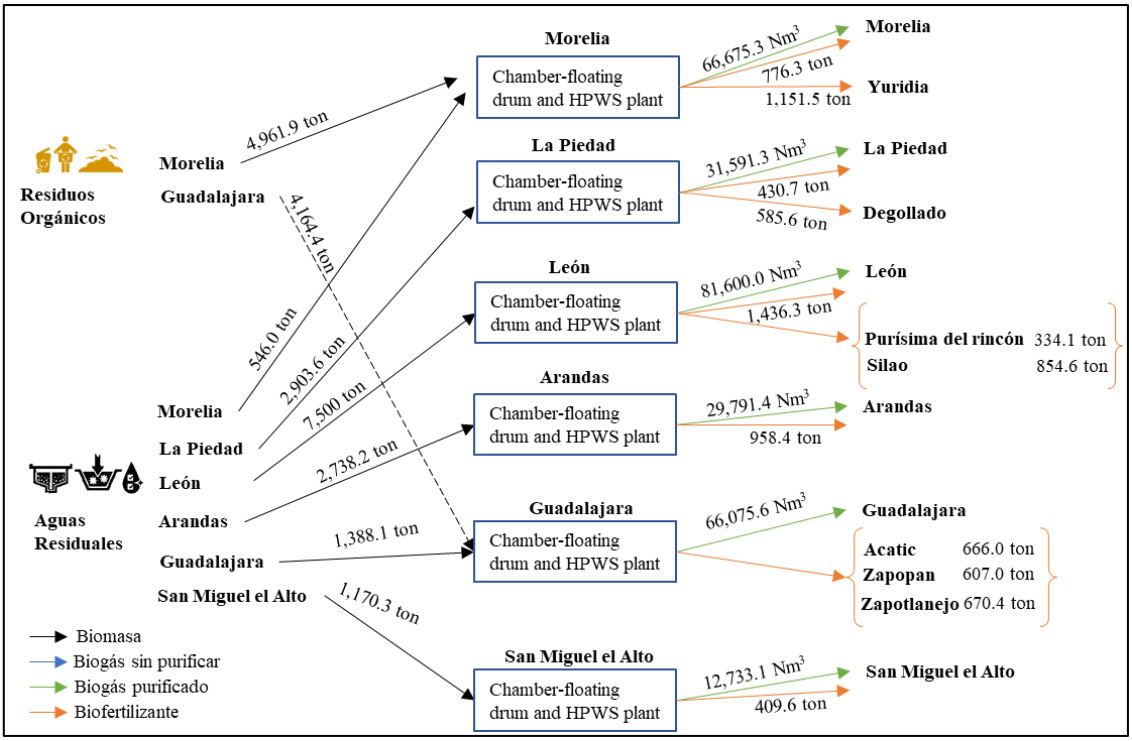



***Figura 4.4*** *Solución óptima para el escenario C en el Caso 1.*

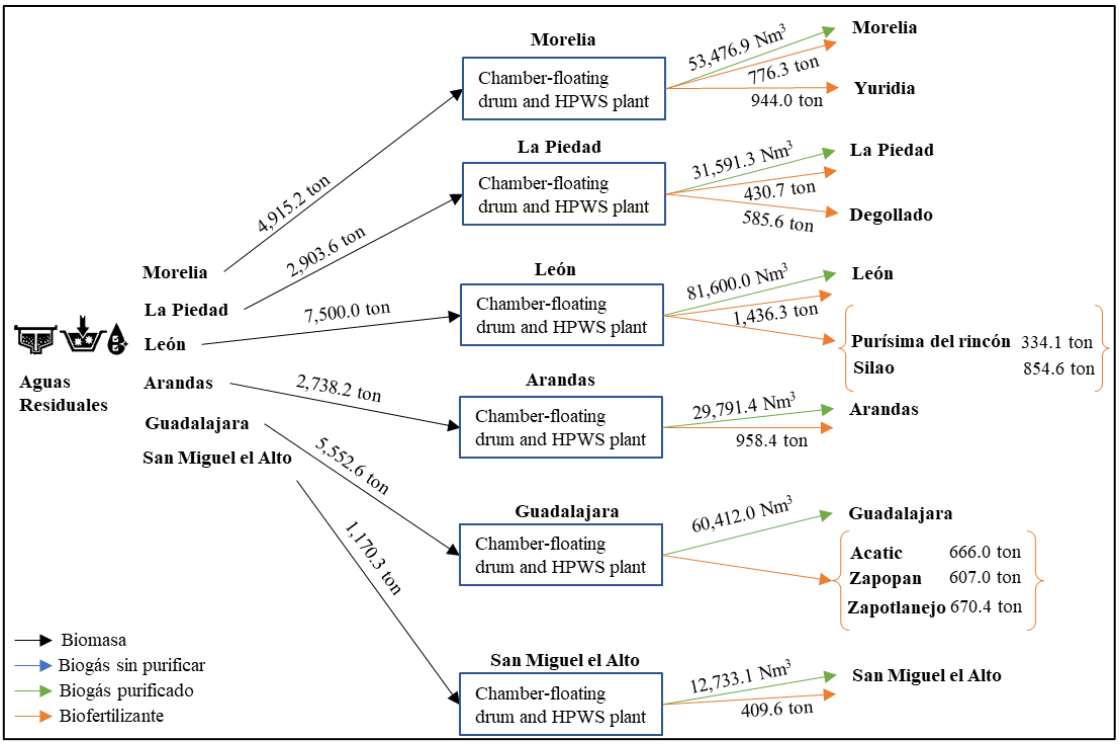



***Figura 4.5*** *Solución óptima para el escenario D en el Caso 1.*

***Tabla 4.8*** *Comparación de los caudales para los diferentes escenarios analizados de la curva Pareto para el estudio del caso 1.*

| Flujo de materia (ton/año) ($Nm^3$/año) | Escenario | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E | F | G | H |
| **Biomasa Total** | **26,750** | **25,138** | **25,645** | **24,780** | **21,573** | **21,690** | **23,095** | **24,368** |
| Excretas | 4,169 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3,310 | 0 |
| Residuos Orgánicos | 22,581 | 18,326 | 9,398 | 0 | 6,667 | 12,219 | 15,711 | 24,368 |
| Aguas Residuales | 0 | 6,812 | 16,246 | 24,780 | 14,907 | 9,471 | 4,074 | 0 |
| **Biogás sin purificar total** | **468,994** | **438,858** | **424,216** | **377,752** | **358,508** | **371,477** | **397,629** | **438,632** |
| Excretas | 62,536 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 49,652 | 0 |
| Residuos Orgánicos | 406,458 | 329,865 | 164,275 | 0 | 120,000 | 219,946 | 282,794 | 438,632 |
| Aguas Residuales | 0 | 108,994 | 259,941 | 377,752 | 238,508 | 151,531 | 65,183 | 0 |
| **Biogás purificado total** | **318,952** | **298,424** | **288,467** | **269,605** | **240,185** | **242,406** | **251,333** | **271,952** |
| PSA | - | - | - | - | - | - | - | - |
| HPWS | 318,952 | 298,424 | 288,467 | 269,605 | 162,185 | 103,041 | 44,324 | - |
| OPS | - | - | - | - | - | - | 29,791 | - |
| CSP | - | - | - | - | - | 74,400 | 136,367 | 271,952 |
| MS | - | - | - | - | 78,000 | 64,965 | 40,851 | - |
| CS | - | - | - | - | - | - | - | - |
| **Biofertilizante total** | **9,363** | **8,798** | **8,880** | **8,673** | **7,551** | **7,591** | **8,083** | **8,529** |
| Excretas | 1,459 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,159 | 0 |
| Residuos Orgánicos | 7,903 | 6,414 | 3,194 | 0 | 2,333 | 4,277 | 5,499 | 8,529 |
| Aguas Residuales | 0 | 2,384 | 5,686 | 8,673 | 5,217 | 3,315 | 1,426 | 0 |

### *4.1.3 Caso de estudio 2*

La Fig. **4.6** y la **Fig. 4.7** muestran el diagrama de Pareto para las soluciones óptimas del caso de estudio 2, que corresponde al caso en el que tanto el biogás purificado como el no purificado se venden en el mercado. Al igual que el caso de estudio 1, un diagrama de Pareto muestra las ganancias haciendo una comparación con las emisiones de GEI evitadas menos las emisiones generadas por la cadena de suministro, mientras que el otro solo muestra las emisiones generadas por la cadena de suministro. Debe notarse que las ganancias en el caso de estudio 2 son más altas que en el caso de estudio 1 debido a la incorporación de biogás no purificado, esto se observa claramente en el escenario A (con máximo beneficio), los ingresos por venta de biogás se mantienen mientras también el biogás no purificado genera ingresos (**Tabla 4.9**). Desde un punto de vista económico, los escenarios B, C, D, E, F y G tienen mayores beneficios, esto significa que cualquier escenario podría tomarse en consideración como una solución factible. El escenario H

(con el máximo ahorro de emisiones de GEI) presenta pérdidas a 4.567.000 € similar al caso 1 pero tiene un mayor ahorro de emisiones de GEI (354.000 toneladas anuales), esto se debe a que la venta de biogás no purificado es mayor, lo que lleva a un menor biogás cantidad a ser purificada y, por lo tanto, las emisiones de conversión son menores (44.141 toneladas anuales). En la **Tabla 4.9** se muestran los resultados económicos y ambientales para el caso de estudio 2. El escenario A que presenta el mayor beneficio es 63.3% más atractivo económicamente que la solución menos atractiva (escenario G), sin embargo, las emisiones de gases de efecto invernadero aumentan 142.5% del escenario G al escenario A. Los escenarios G a A presentan la siguiente rentabilidad económica: 36.8%, 53.8%, 66.6%, 77.34%, 86.49%, 94.37% y 100% y una rentabilidad ambiental: 90.1%, 71.9%, 61.2%, 53.3%, 47.2%, 42.4% y 37.14%.

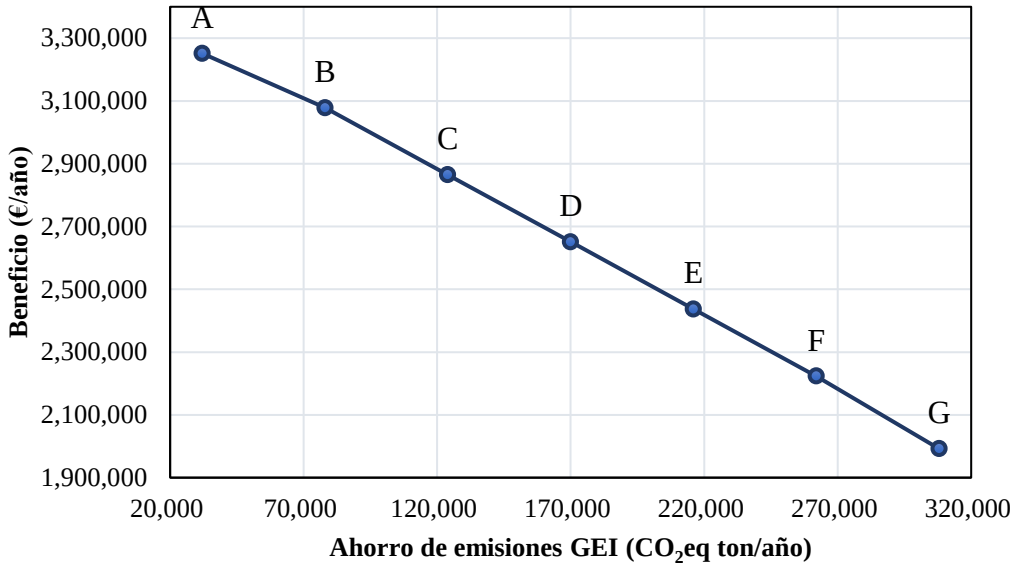



***Figura 4.6*** *Solución Pareto para el Caso 2. Ahorro de emisiones GEI.*

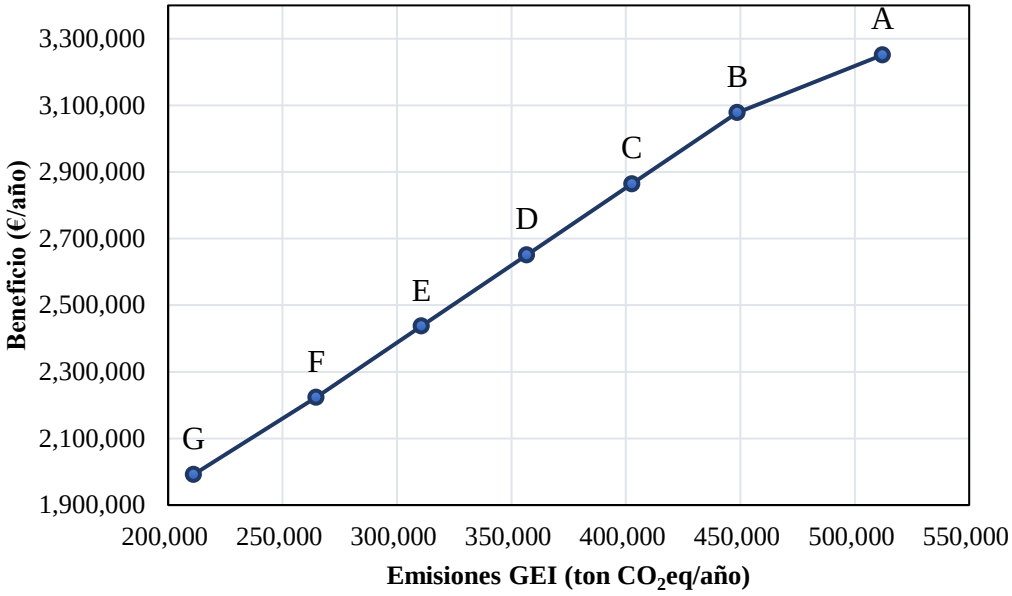



***Figura 4.7*** *Solución Pareto para el Caso 2. Emisiones GEI.*

La **Tabla 4.7** muestra la configuración de la tecnología en la ubicación óptima. Para el escenario A para las siete ciudades, la planta de biogás de tambor flotante con HPWS debe instalarse, mientras que el escenario H tiene tres configuraciones: la planta de biogás de tambor flotante con PSA, el soporte de biogás de tambor flotante con digestor con CSP y el soporte de biogás tipo tambor flotante de digestor con PSA. Cabe señalar que los escenarios B, C, D, E. F y G tienen la misma configuración tecnológica que el escenario A porque presentan costos fijos similares (**Tabla 4.9**). Al igual que el caso de estudio 1, no solo las tecnologías de purificación tienen un papel importante en la determinación económica y ambiental, sino también la incorporación de la venta de biogás no purificado, lo que tiene un impacto en la emisión de conversión que conduce a la disminución de las emisiones de GEI y aumenta los ingresos. Obviamente, la venta no purificada depende de las políticas y regulaciones sobre la producción de biogás. A diferencia del caso 1, en la **Tabla 4.10** se puede observar que el 100% de los escenarios utilizan estiércol, desechos orgánicos y aguas residuales como materia prima casi en la misma proporción y la producción de biogás purificado es decisiva para los aspectos económicos y ambientales debido a la competencia de ambos tipos de biogás, es decir, es necesario producir más biogás no purificado para obtener ganancias, sin embargo, esto conduce a un impacto ambiental negativo o producir más biogás purificado, pero esto significa un impacto económico negativo debido al costo de purificación.

***Tabla 4.9*** *Resultados para el estudio del caso 2.*

| Escenario | Beneficio (€/año) | Ingresos (€/año) | | | Costos (€/año) | | | | Emisiones GEI ($CO_2$eq Ton/año) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Biogás sin purificar | Biogás Purificado | Biofertilizante | Biomasa | Transporte | Fijos | Variables | Transporte | Conversión | Uso |
| [a]A | 3,251,400 | 1,894,600 | 6,378,300 | 65,639 | 37,508 | 2,906,800 | 2,064,200 | 78,598 | 139,530 | 370,630 | 2,006 |
| B | 3,078,000 | 2,355,000 | 5,468,400 | 63,611 | 36,349 | 2,639,200 | 2,064,200 | 69,356 | 126,680 | 319,900 | 2,095 |
| C | 2,864,300 | 2,970,700 | 4,631,100 | 63,611 | 36,349 | 2,639,200 | 2,064,200 | 61,352 | 126,680 | 273,720 | 2,275 |
| D | 2,650,700 | 3,586,400 | 3,793,800 | 63,611 | 36,349 | 2,639,200 | 2,064,200 | 53,348 | 126,680 | 227,540 | 2,455 |
| E | 2,437,000 | 4,202,100 | 2,956,400 | 63,611 | 36,349 | 2,639,200 | 2,064,200 | 45,344 | 126,680 | 181,370 | 2,635 |
| F | 2,223,400 | 4,817,800 | 2,119,100 | 63,611 | 36,349 | 2,639,200 | 2,064,200 | 37,340 | 126,680 | 135,190 | 2,815 |
| G | 1,991,900 | 5,286,000 | 1,482,300 | 64,632 | 36,933 | 2,708,300 | 2,064,200 | 31,528 | 130,000 | 78,205 | 2,952 |
| [b]H | -4,567,000 | 5,912,200 | 856,080 | 66,627 | 38,073 | 2,977,400 | 8,357,100 | 29,878 | 142,910 | 44,141 | 3,172 |

Tasa de interés 10%, N = 10 años, a Maximizando Beneficio, b Maximizando Ahorro de emisiones.

Finalmente, considerando que todos los escenarios positivos están disponibles para ser una solución factible, el escenario D podría ser una buena opción, debido a que el aspecto ambiental está en equilibrio con el económico, es decir, este escenario representa una reducción de las emisiones de GEI del 30.3% y una reducción de beneficios del 18,5% con respecto al escenario A que equivale a 155.490 ton de $CO_2$eq por año y 600.672 € por año. Aunque el escenario D tiene esta reducción económica, aun así, mantiene un beneficio anual de 2.650.688 € y, al mismo tiempo, el ahorro de emisiones de GEI es positivo (170.020 ton de $CO_2$eq por año) (**Fig. 4.6**). La configuración tecnológica para el escenario D involucra la planta de biogás de tambor flotante con HPWS. La **Fig. 4.8** muestra los caudales y la configuración tecnológica para este escenario.

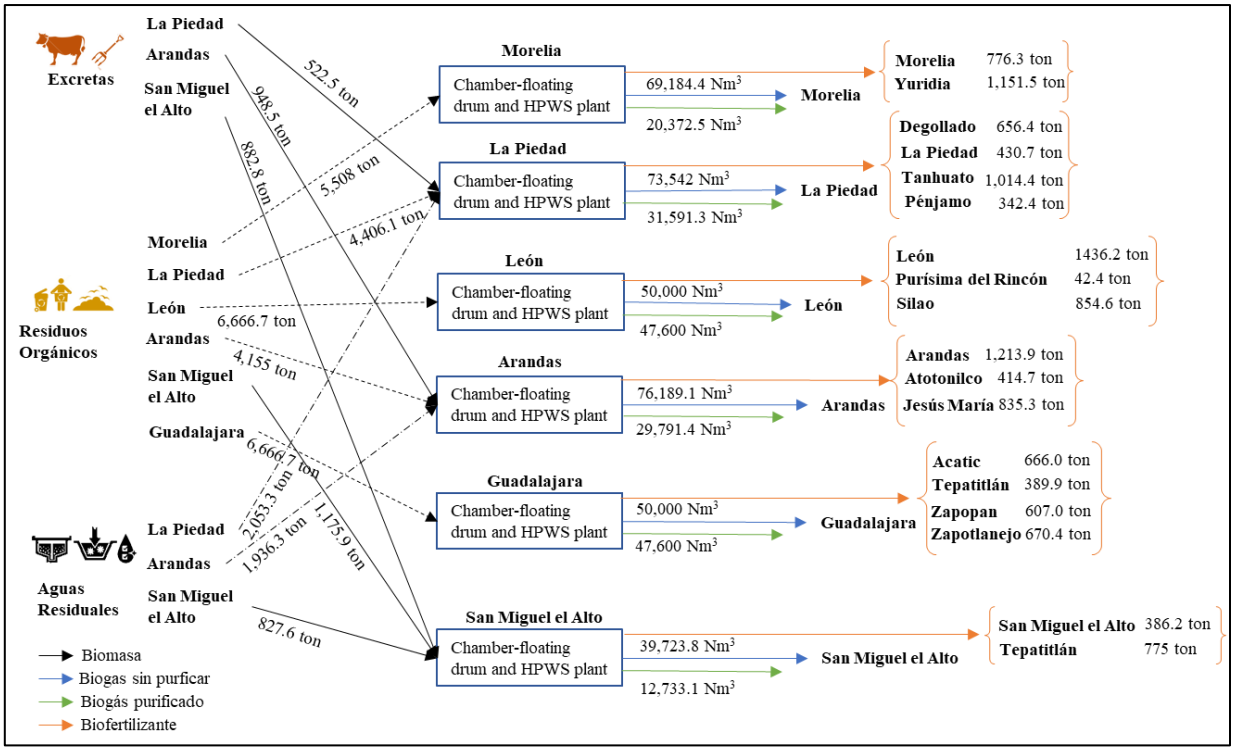



***Figura 4.8*** *Solución óptima para el escenario D en el Caso 2.*

***Tabla 4.10*** *Comparación de los caudales para los diferentes escenarios analizados de la curva Pareto para el estudio del caso 2.*

| Flujo de materia (ton/año) ($Nm^3$/año) | Escenario | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E | F | G | H |
| **Biomasa Total** | **37,508** | **36,349** | **36,349** | **36,349** | **36,349** | **36,349** | **36,349** | **38,071** |
| Excretas | 2,354 | 2,354 | 2,354 | 2,354 | 2,354 | 2,354 | 2,354 | 5,138 |
| Residuos Orgánicos | 30,337 | 29,178 | 29,178 | 29,178 | 29,178 | 29,178 | 29,178 | 28,116 |
| Aguas Residuales | 4,817 | 4,817 | 4,817 | 4,817 | 4,817 | 4,817 | 4,817 | 4,817 |
| **Biogás sin purificar Total** | **658,449** | **637,593** | **637,593** | **637,593** | **637,593** | **637,593** | **637,593** | **660,261** |
| Excretas | 35,307 | 35,307 | 35,307 | 35,307 | 35,307 | 35,307 | 35,307 | 77,074 |
| Residuos Orgánicos | 546,068 | 525,212 | 525,212 | 525,212 | 525,212 | 525,212 | 525,212 | 506,113 |
| Aguas Residuales | 77,074 | 77,074 | 77,074 | 77,074 | 77,074 | 77,074 | 77,074 | 77,074 |
| **Biogás purificado Total** | **318,916** | **273,422** | **231,555** | **189,688** | **147,822** | **105,955** | **74,116** | **42,804** |
| PSA | - | - | - | - | - | - | - | 14,125 |
| HPWS | 318,916 | 273,422 | 231,555 | 189,688 | 147,822 | 105,955 | 74,116 | - |
| OPS | - | - | - | - | - | - | - | - |
| CSP | - | - | - | - | - | - | - | 28,679 |
| MS | - | - | - | - | - | - | - | - |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CS | - | - | - | - | - | - | - | - |
| **Biofertilizante Total** | **13,128** | **12,722** | **12,722** | **12,722** | **12,722** | **12,722** | **12,722** | **13,325** |
| Excretas | 824 | 824 | 824 | 824 | 824 | 824 | 824 | 1,798 |
| Residuos Orgánicos | 10,618 | 10,212 | 10,212 | 10,212 | 10,212 | 10,212 | 10,212 | 9,841 |
| Aguas Residuales | 1,686 | 1,686 | 1,686 | 1,686 | 1,686 | 1,686 | 1,686 | 1,686 |

## 4.2 Resultados y discusión del modelo estocástico

### *4.2.1 Caso de estudio*

Para este caso de estudio, los parámetros inciertos son la disponibilidad de biomasa y la demanda de biogás. En consecuencia, se realizó un muestreo de cien escenarios aleatorios basados en la distribución normal a partir del análisis del comportamiento en los datos históricos (**Fig. 4.9**). Dado que las demandas de biogás y biofertilizantes no se especifican directamente en la literatura, la demanda de biogás se calculó a partir de un consumo global per cápita para sustituir las necesidades energéticas mediante la utilización del gas LP (6,16 kg de gas LP/mes per cápita para esta región geográfica)) (PROFECO, 2008) y la demanda de biofertilizantes se calculó mediante una información bancaria mundial que sabía la cantidad de biofertilizante utilizado por hectárea y la superficie cultivable de esta región (102,20 kg de biofertilizantes por hectárea) (BIRF et al., n.d.; Instituto Nacional de Estádistica y Geografía (México), 2016c, 2016b, 2016a). Por último, los estudios de caso tienen en cuenta algunos lugares para instalar las tecnologías de producción y purificación (Morelia, La Piedad, Léon, Arandas, Guadalajara, San Miguel el Alto). De acuerdo a los resultado anteriores (Díaz-Trujillo & Nápoles-Rivera, 2019), su respectiva disponibilidad de biomasa, demanda de producto para cada escenario y su distribución, así como la distancia entre ellas y otras ciudades están incluidos en el material suplementario de este trabajo (ver Anexos).

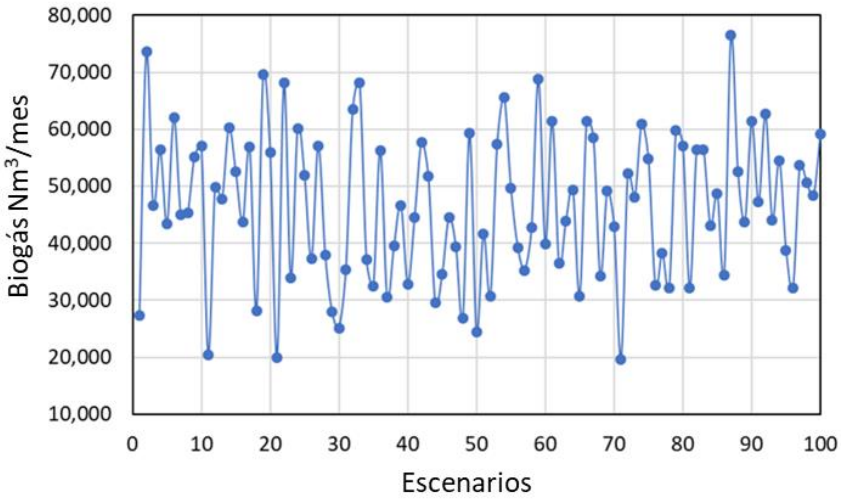



***Figura 4.9*** *Generación de datos aleatorios.*

Para dar solución a este problema, el caso de estudio se divide en dos análisis: el primer análisis consiste en establecer la capacidad de las tecnologías de producción y purificación en 10.000 y 18.000 $Nm^3$ por mes, mientras que el segundo las capacidades se fijan a 30.000 $Nm^3$ por mes para ambos casos. Estos dos análisis se denominan Caso A y Caso B, respectivamente (**Tabla 4.11**). A diferencia del modelo determinista, sólo se distribuye el biogás purificado hacia los mercados, por lo que $F_{i,l,p,t,s}^{Bg_dem} = 0$ en la Ec. A.26 y los ingresos asociados con el biogás no purificado no son tomados en cuenta. El problema se resuelve utilizando los parámetros aleatorios para obtener los gráficos de probabilidad acumulada, los gráficos en general se generan de la siguiente manera: para el análisis económico se maximiza el beneficio medio para todos los escenarios que permite obtener la solución con el mayor beneficio (maximizando la Ec. (A.39)). Del mismo modo se obtienen los gráficos de probabilidad acumulada para la función ambiental (minimizando la Ec. (A.39)).

Respecto al enfoque de la solución de estrategia multi escenario, los valores $LB$ y $UB$ de las funciones objetivas se obtienen resolviendo el problema para cada escenario con la maximización y minimización de *Total Profit* y *Total Emission* (valores extremos), después, la estrategia propuesta (Ecs. 3.41 a 3.45) se resuelve con la maximización simultánea de los objetivos económicos y la minimización de objetivos ambientales (Ec. A.39) lo que resulta en minimizar la brecha (*"gap"*) media entre la función objetiva implicada (Ec. 3.45). Una vez resuelto el problema, la incertidumbre se representa y analiza utilizando curvas de probabilidad acumulada asociadas a cada escenario para los casos de estudio A y B. Estas curvas se utilizan para analizar el comportamiento económico y ambiental bajo incertidumbre cuando se minimiza el *gap* entre ellas. La información adicional se presenta en material complementario. Los resultados y la discusión se dan de la siguiente manera.

***Tabla 4.11*** *Capacidades de las tecnologías de producción y purificación en el caso de estudio.*

| | **Caso A** | **Caso B** |
|---|---|---|
| ***Tecnología de producción*** | $Nm^3$/mes | |
| Chamber-floating drum type biogas plant<br>Digester floating drum type biogas holder<br>Fixed-dome type biogas plant | 10,000 | 30,000 |
| ***Tecnología de purificación*** | $Nm^3$/mes | |
| PSA<br>HPWS<br>OPS<br>CSP<br>MS<br>CS | 18,000 | 30,000 |

### *4.2.2 Resultados del caso*

El problema se codifica en el software GAMS (Brook et al., 1988), el modelo resultante es una programación mixta entera no lineal (MINLP) donde se utilizó el *solver* CPLEX para resolverlo. El problema consiste en 5.680.805 variables continuas, 5.400 variables discretas y 1.471.803 ecuaciones individuales. Se resolvió en un ordenador con procesador Intel® Core™ i7 a 2,50 Hz con 8 GB de RAM en aproximadamente 1,20 h de tiempo de CPU.

**Fig. 4.10** muestra el efecto de la incertidumbre de la biomasa disponible en los estudios del caso, de acuerdo con la información obtenida, la incertidumbre en la disponibilidad de biomasa no representa un cambio significativo en el beneficio (**Fig. 4.10A**), que mantiene un valor de 6.000.000 euros al año, mientras que los ingresos y los costes se mantienen en 8.200.000 y 2.100.000 euros al año. Estos valores se deben a varios factores, la biomasa disponible es muy grande en comparación con la demanda de biogás en la región geográfica analizada en este caso de estudio, además, la producción de biogás está limitada por la capacidad de las tecnologías de producción, la cual es constante. Por lo tanto, el valor mínimo de la biomasa disponible satisface la capacidad de producción de biogás y, en consecuencia, la demanda. En este caso, aunque las tecnologías tienen un coste diferente, se está escogiendo la misma tecnología para todos los escenarios con el fin de obtener el mejor beneficio para la mínima disponibilidad de biomasa. Se puede notar que, la biomasa utilizada por el sistema cambia, pero no significativamente porque las pequeñas fluctuaciones se deben a su rendimiento para producir biogás (alrededor de 42.000-43.000 toneladas al año) **(Fig. 4.10B**), este comportamiento se refleja en un beneficio constante. Entonces, una toma de decisiones basada sólo en la disponibilidad de biomasa no es suficiente para ver la rentabilidad del proyecto de biogás debido al hecho de que no tiene una influencia significativa en los resultados. De acuerdo a lo último, la información sólo se presenta para diez escenarios debido a que la tendencia se mantiene.

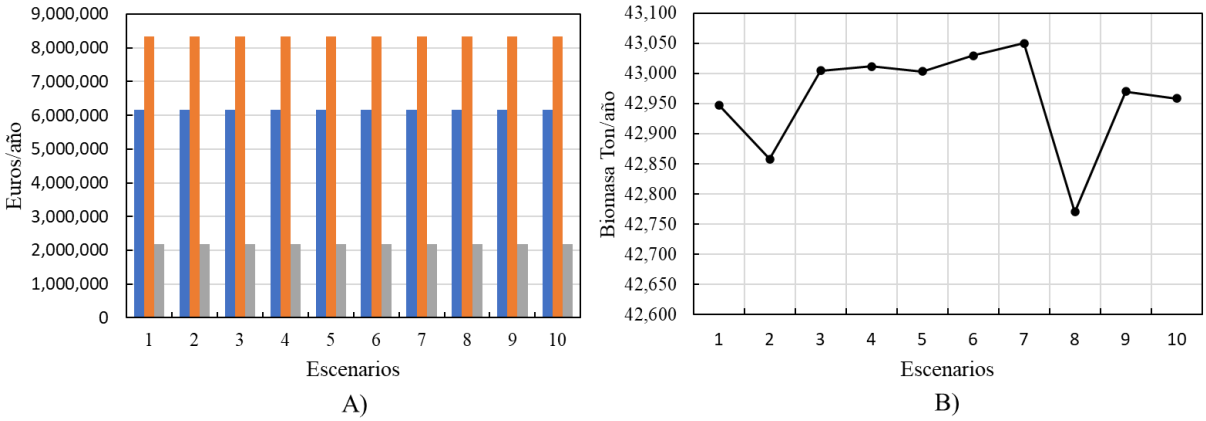



***Figura 4.10*** *Efecto de incertidumbre asociada a la biomasa disponible en el caso de estudio.*

Las curvas de probabilidad acumuladas maximizando el más alto beneficio tanto para el caso A como el caso B se presentan en **la Fig. 4.11**. Estas curvas representan el beneficio máximo sin tener en cuenta la cantidad de emisiones de GEI que podría generar la cadena de suministro (lo que conduce al límite superior). Para el caso A, el intervalo de beneficio es de 2.800.000 a 5.100.000 euros por año, donde los puntos negros son tres valores posibles para el beneficio. Los valores de beneficio elegidos son 4.000.000, 4200.000 y 5.000.000 euros al año, por lo tanto, la probabilidad de obtener al menos estos valores de beneficio es del 82%, 55% y 0,2%, respectivamente. Para el caso B, el intervalo de beneficio es de 7.000.000 a 12.400.000 euros al año donde los puntos elegidos para analizar tienen un beneficio de 9.500.000 y 11.500 euros al año, la probabilidad de obtener al menos estos beneficios es del 91% y del 26%, respectivamente. Debe señalarse que el caso B tiene un mayor beneficio que el caso A debido al aumento de la capacidad en las tecnologías de producción y purificación. Además, se muestran las curvas de ajuste que tienen la mejor adaptación a la tendencia de la curva empírica, para la Case A tiene una distribución normal mientras que el caso B presenta una curva de mejor ajuste con una distribución de valores extremos que una distribución normal.

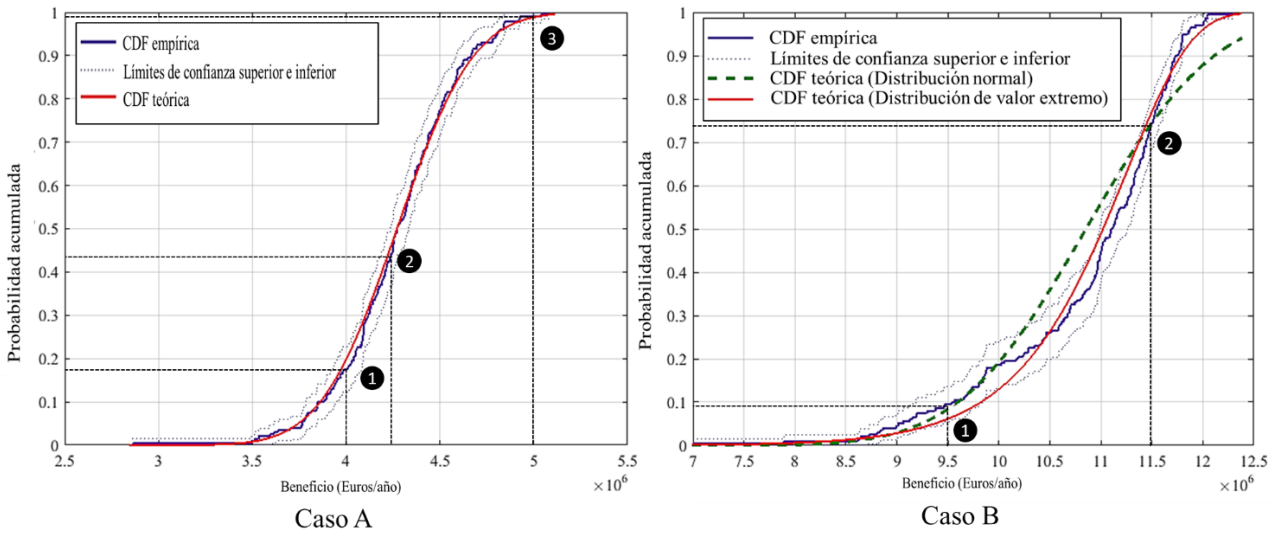



***Figura 4.11*** *Probabilidad acumulada que maximiza los mejores valores del beneficio.*

La **Fig 4.12** muestra las curvas de probabilidad acumulativas para maximizar los valores más altos de las emisiones de GEI. Para la Case A, el rango de emisiones de GEI es de 1.50 x $10^8$ a 1.545 a $10^8$ toneladas de $CO_2$-eq por año, al igual que los valores de beneficio, se puede obtener la probabilidad de que ocurrencia de escenario. Para obtener al menos 1,52 x $10^8$ y 1,535 x $10^8$ emisiones de GEI, las probabilidades son del 75% y del 10%, respectivamente. Para aumentar la capacidad de producción y purificación, la emisión de GEI aumenta en un intervalo de 3.94 x $10^8$

a 4.1 x $10^8$ toneladas de $CO_2$-eq por año, un cambio significativo. Por ejemplo, para obtener al menos 3,98 x $10^8$ y 4,06 x $10^8$ toneladas de $CO_2$-eq por año, existe una probabilidad de 90% y 16% respectivamente. Ambos casos tienen una distribución normal. Estas curvas de probabilidad acumulativa presentadas para casos extremos son de gran utilidad para observar el comportamiento donde el sistema conduce a un escenario extremo. Obviamente, en un sistema equilibrado, debe elegirse la mejor solución económica que no comprometa el aspecto medioambiental.

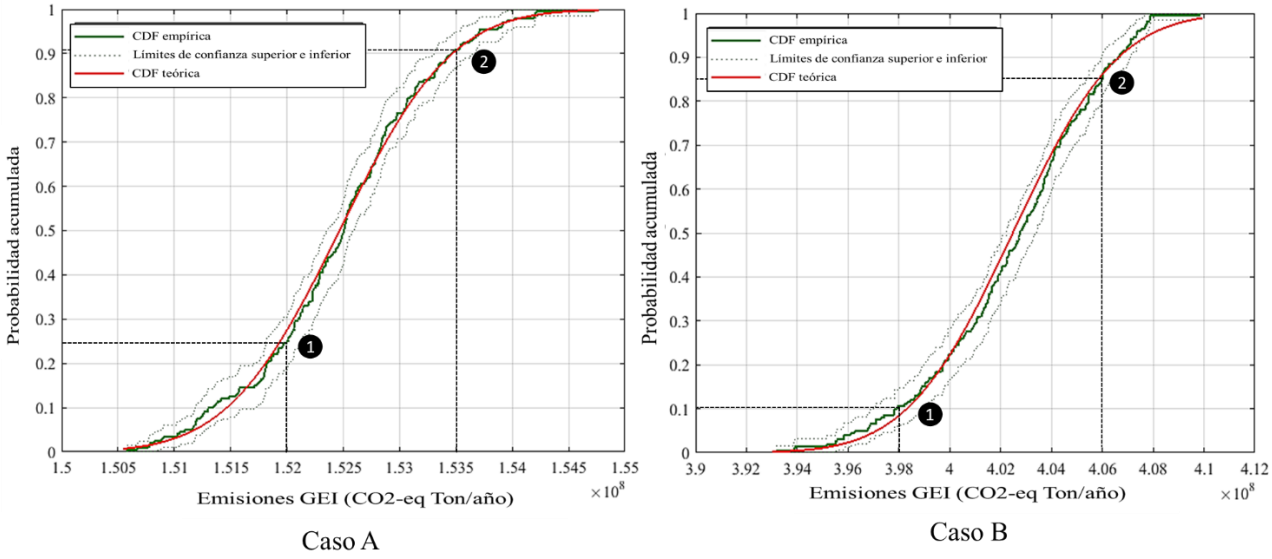



***Figura 4.12*** *Probabilidad acumulada que maximiza los mejores valores de emisiones de GEI.*

Para una mejor compresión**,** la **Tabla 4.12** muestra los resultados obtenidos por la estrategia multi escenario con un enfoque CVaR bajo criterios de igualdad ofreciendo una solución media cuando se minimiza la brecha (*gap*) entre la función objetivas. Esto quiere decir que, el peso de las funciones objetivo tiene la misma importancia y no prioriza ninguna de ellas. Esto permite evaluar el comportamiento del sistema garantizando la rentabilidad y al mismo tiempo reduciendo las emisiones de GEI.

Para el caso A, el valor de la brecha es de 0,0035 con un beneficio total medio de 4.241.700 euros al año y emisiones medias de GEI de 292.440 toneladas de $CO_2$-eq por año. Estos valores se pueden trazar en una curva de probabilidad acumulativa para conocer la probabilidad de que ocurran. En la **Fig. 4.11**, el punto negro número 2 representa la solución media al beneficio, la probabilidad de beneficio de obtener al menos 4.241.700 euros al año es del 56% aproximadamente. De hecho, la solución está dentro de los valores más altos para el beneficio. En el **Fig. 4.15 (Caso A)**, se ilustra esta declaración, la figura muestra la comparación entre la estrategia de solución propuesta para cada escenario cuando se minimiza la brecha para la función

objetivo y se maximiza la función objetivo económica para obtener los valores de beneficio más altos. Todos los escenarios para el caso A tienden a sus valores más altos de beneficio. Debe tenerse en cuenta que el valor medio de emisión de GEI obtenido por la estrategia de solución multi escenario está fuera del intervalo de emisiones de GEI debido a los valores más altos mostrados en **Fig. 4.12** y la probabilidad de ocurrencia de escenario es difícil de saber. Sin embargo, la probabilidad de las emisiones medias de GEI se puede obtener por la probabilidad acumulada de solución de emisiones de GEI cuando se minimiza la brecha (*gap*), entonces la **Fig. 4.14 (Caso A)** muestra esta información y la probabilidad de obtener al menos 292.440 toneladas de $CO_2$-eq por año es del 52%. El rango de emisiones de GEI para este caso es de 250.000 a 330.000 toneladas de $CO_2$-eq por año con una distribución normal.

***Tabla 4.12*** *Valores de la función económica y ambiental utilizando la estrategia de solución propuesta con el enfoque CVaR.*

| Variables objetivas | Caso A | Caso B |
|---|---|---|
| $f$ | 0.0035 | 0.0020 |
| $\gamma^{EQ,Profit}$ | 0.0000 | $6.48 \times 10^{-4}$ |
| $\gamma_s^{EQ,GHGEmission}$ | 0.0020 | $7.30 \times 10^{-4}$ |
| $TP^{Mean}$(Euros/año) | 4,241,700 | 1,740,600 |
| $TE^{Mean}$($CO_2$-eq Ton/año) | 292,440 | 292,780 |

Para la Case B, el valor de la brecha es 0,0020 con un beneficio total medio de 1.740.600 euros al año y emisiones medias de GEI de 292.780 toneladas de $CO_2$-eq por año. Al igual que el caso A, estos valores se pueden ser graficados en una curva de probabilidad acumulativa para conocer la probabilidad de que ocurran. Se puede notar que los valores medios de las emisiones GEI y de beneficios totales están fuera de los intervalos de las soluciones de ganancias y emisiones de GEI obtenidas con los valores más altos. Sin embargo, la probabilidad de que el beneficio medio y las emisiones de GEI se produzcan, se muestran en la **Fig. 4.13** y **Fig. 4.14 (Caso B)** respectivamente**. Fig. 4.13A** muestra la probabilidad acumulada del beneficio cuando se minimiza la brecha, mientras que la **Fig. 4.13B** muestra la probabilidad específica de cada escenario. El rango de beneficio total es de 1.500.000 a 1.930.000 euros al año con unan distribución de valor extremo, por lo tanto, la probabilidad de obtener al menos 1.740.600 euros es de 70%. Debe tenerse en cuenta que hay escenarios atípicos, que no mantienen la tendencia de la mayoría de los escenarios; en la **Fig. 4.13 B** se detalla este aspecto donde existe un escenario inferior con 500.000 euros al año aproximadamente, esto significa que existe un 99,99% de probabilidad de obtener al menos esa cantidad, pero la probabilidad de obtener exactamente 500.000 euros al año es prácticamente

inexistente. En la **Fig. 4.15 (Caso B),** se puede ver que las soluciones de beneficio obtenidas por la estrategia de solución multi escenario están muy lejos de los valores más altos para el beneficio en relación con la solución obtenida para el caso A, sin embargo, presenta soluciones más estables, es decir, la variación entre escenarios es mínima. La probabilidad específica de funciones objetivo económica y medioambiental, en ambos casos, se presenta en material suplementario (ver Anexos). Por otro lado, la probabilidad de las emisiones medias de GEI están trazadas en la **Fig. 4.14 (Caso B)**. El rango de emisiones de GEI para este caso es de 270.000 a 303.000 toneladas de $CO_2$-eq por año con una distribución de valores extremo, por lo tanto, la probabilidad de obtener al menos 292.780 toneladas de $CO_2$-eq por año es 62% aproximadamente. Por otro lado, las emisiones de GEI obtenidas para ambos casos son muy estrechas entre ellos, en la **Fig. 4.16** se presenta su comportamiento donde se puede observar que las soluciones para el caso B son más estables que el caso A porque la brecha entre la función objetiva para el caso B es menor que el caso A (0.0020 y 0.0035 respectivamente) y esto se refleja en aproximarse a la solución media para todos los escenarios.

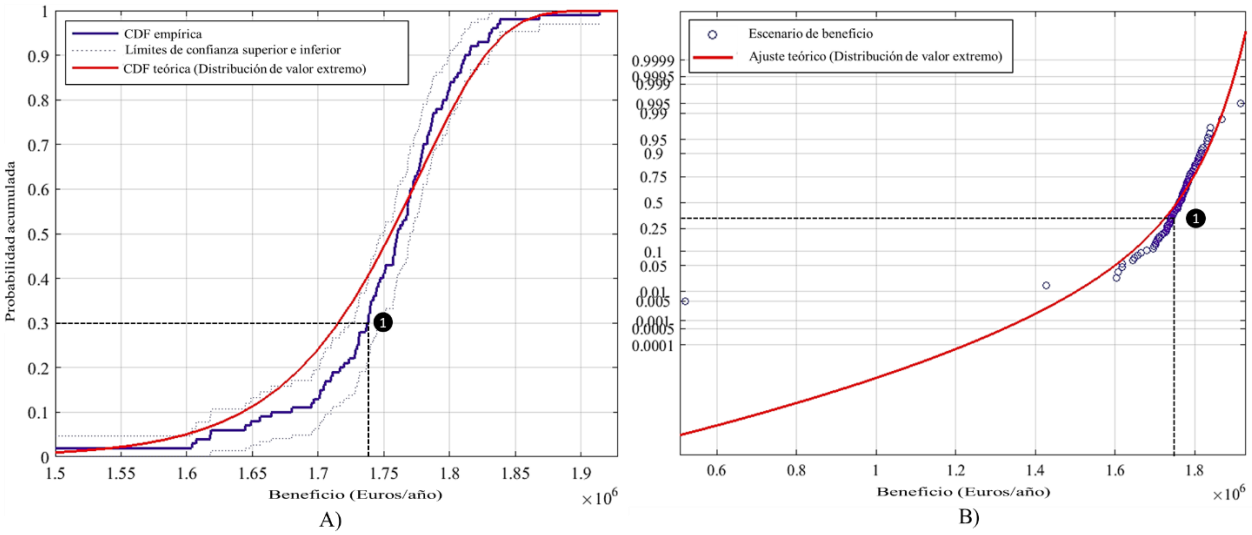



***Figura 4.13*** *Valores medios de beneficio para el Caso B: A) Probabilidad acumulada minimizando la brecha entre las funciones objetivas y B) Probabilidad para cada escenario.*

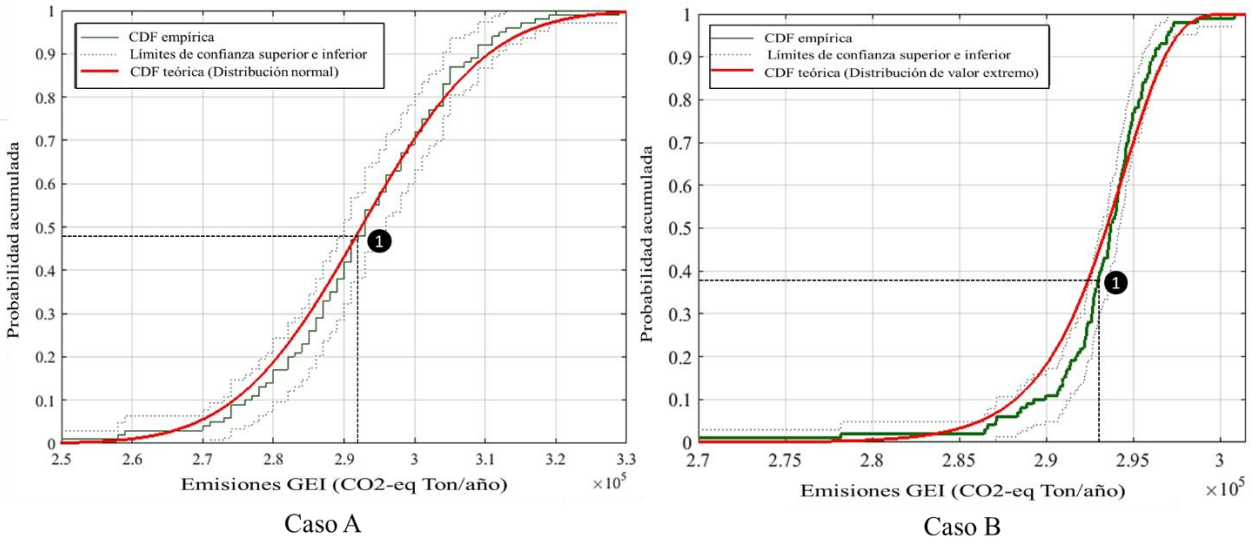



***Figura 4.14*** *Probabilidad acumulada de emisiones de GEI minimizando la brecha entre funciones objetivas.*

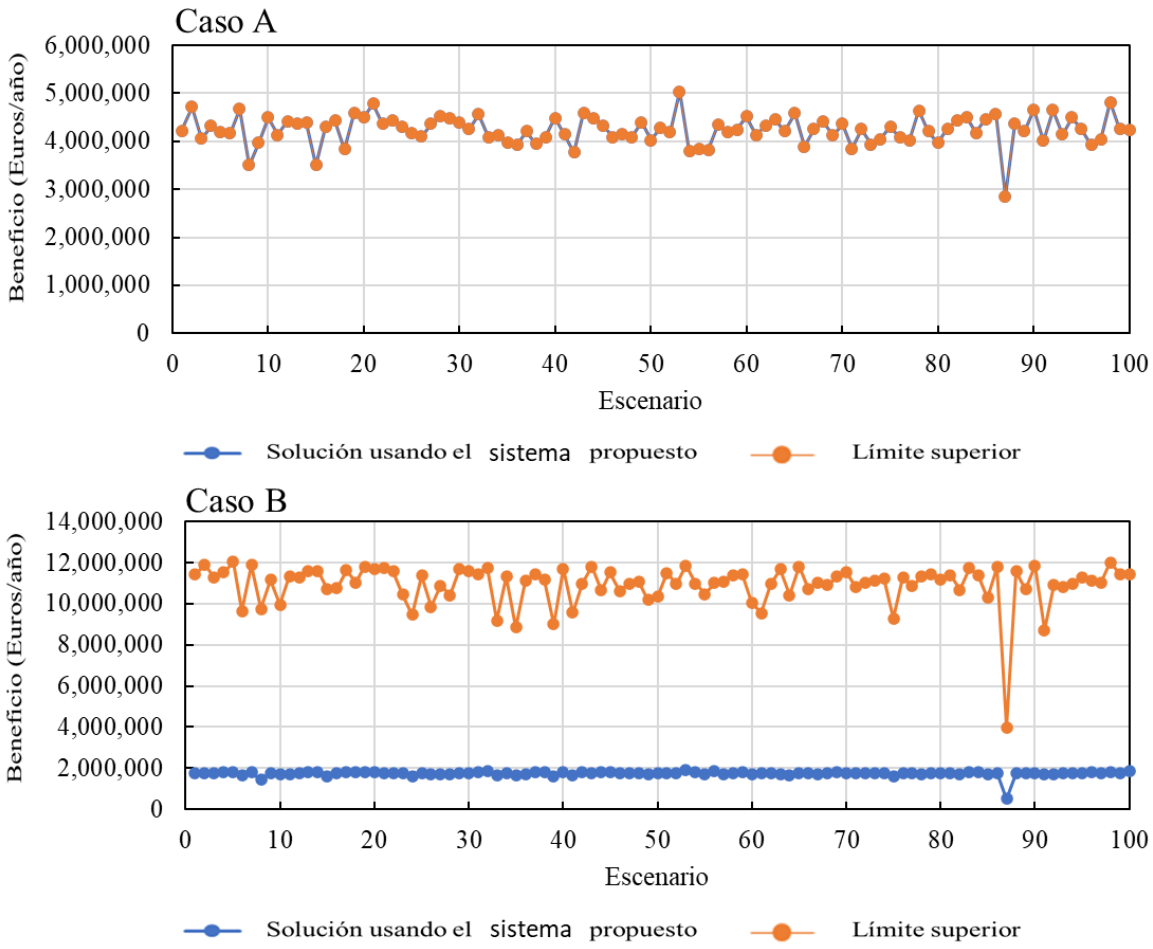



***Figura 4.15*** *Comparación de la solución de beneficios entre la solución de estrategia propuesta cuando se minimiza la función de objetivo del "gap" y la solución de límite superior.*

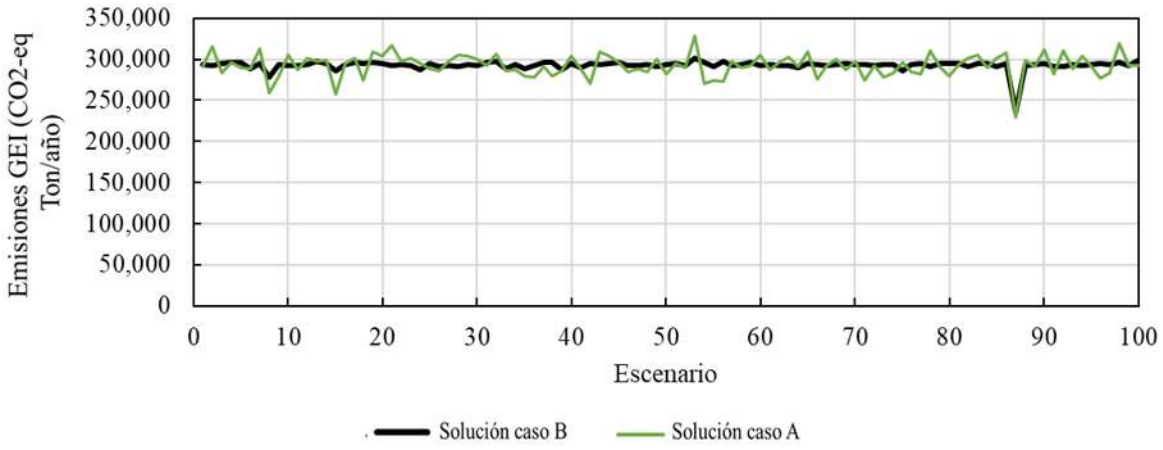



***Figura 4.16*** *Comparación de la solución de emisiones de GEI cuando se minimiza función objetiva "gap".*

Por lo tanto, en los casos presentados, la incertidumbre de la demanda presenta cambios más significativos que la incertidumbre asociada con la disponibilidad de biomasa, al menos para esta región geográfica. De acuerdo a la disuasión anterior, el caso A es el más factible para establecer una cadena de suministro de biogás. A pesar de que la brecha es mayor que en el caso B, los resultados muestran que para mantener prácticamente las mismas emisiones de GEI, en ambos casos, los beneficios económicos son mejores en el caso A que en el caso B. Estos beneficios se acercan al máximo beneficio que puede obtenerse, exclusivamente para el caso A. Entonces, el caso A podría utilizarse para diseñar una cadena de suministro de biogás factible para obtener los mejores caudales y la configuración tecnológica, tal como ya se ha estudiado en las secciones anteriores (Díaz, 2019). Además, el enfoque de optimización presentado en este trabajo se puede utilizar como una herramienta para las partes interesadas en proyectos de este tipo, especialmente para analizar la probabilidad de obtener al menos un cierto beneficio económico o ambiental que se tenga como objetivo.

## 4.3 Resultados y discusión del modelo estocástico para sustituir un combustible fósil

### *4.3.1 Caso de estudio*

El gas LP (GLP) es un producto de gas de refinamiento de petróleo que consiste en propano, algunos propilenos, butanos y otros hidrocarburos ligeros. Este combustible se almacena y vende en cilindros (vasos de presión moderada), en forma líquida (Raslavičius et al., 2014). México cuenta con una extensa red de oleoductos, que abarcan 1835 km de longitud, para importar GLP desde Texas y transportarlo a otras partes del país. En México, este combustible se utiliza en los sectores agrícola e industrial, pero del volumen total de GLP consumido en México (283.0 mil barriles por día en 2015), el sector residencial tiene una participación de 59.5%. En el sector residencial, el GLP se utiliza principalmente para calentar el agua y cocinar. A finales de 2015, la demanda total de combustibles en el sector residencial era de 305.9 mil barriles por día de equivalente de GLP. A partir de este volumen, el 55% fue GLP, la leña con 37,0%, y finalmente, gas natural con una cuota del 8,0% (debido a la falta de infraestructura) (SENER, 2016). La sustitución del GLP por otras fuentes de energía como la electricidad y el gas natural (NG) en el sector residencial es limitada debido a diferentes situaciones. En primer lugar, el precio de la electricidad es superior al GLP y la inversión en electrodomésticos que utilizan GLP representa un factor fuerte para migrar a esta alternativa. A continuación, la sustitución del GLP por gas natural depende de la existencia de infraestructura (tuberías) para distribuir NG (Gas Natural) a cada vivienda, los precios de ambos combustibles, y la preparación o capacidad económica de los usuarios para conectarse a la red NG y pagar una cuota mensual por el servicio; por lo tanto, debido

a la limitada red NG la sustitución de GLP por NG en México es baja y no tiene una perspectiva prometedora (COFECE, 2018). Por otro lado, el biogás es una valiosa fuente de energía producida a partir de materiales orgánicos biodegradables como residuos industriales, lodos de aguas residuales, estiércol animal y reside en la agricultura a través de la digestión anaeróbica, que puede utilizarse como fuente de energía térmica, energía eléctrica o productos químicos (Awe et al., 2017; Martín-Hernández et al., 2018; B. Zhang & Chen, 2017). Los principales productos de la digestión anaeróbica son el biogás rico en metano y los residuos de digestión ricos en nutrientes (digestato) que se pueden utilizar como fertilizante directamente o después del procesamiento (Timonen et al., 2019). Además, la digestión anaeróbica puede contribuir a mitigar los olores asociados con el almacenamiento y descomposición del estiércol y elimina patógenos que pueden suponer un riesgo significativo para la salud humana y animal, y reduce las emisiones de GEI liberadas a la atmósfera evitando las emisiones de metano de la descomposición natural durante el almacenamiento (Kaspersen et al., 2016; Scarlat et al., 2018b). Los principales componentes del biogás son $CH_4$ y $CO_2$, pero también contiene $H_2S$ y otros compuestos de azufre, compuestos halogenados, siloxanos, agua, amoníaco y otros compuestos orgánicos volátiles. Los efectos de estas impurezas en el biogás son la acumulación de agua en las tuberías, y formación de $SO_2$ y $SO_3$ durante la combustión, reducción del valor calorífico y, principalmente, corrosión en equipos (Ullah Khan et al., 2017). La eliminación de estos contaminantes, especialmente $H_2S$ y $CO_2$, mejorará significativamente la calidad del biogás para sus usos posteriores. Básicamente, hay dos pasos involucrados en el tratamiento del biogás; limpieza (eliminación de compuestos nocivos y tóxicos como $H_2S$) y la purificación (ajuste de $CO_2$ para aumentar el valor calorífico del biogás a un nivel óptimo). La selección de la tecnología adecuada depende de los requisitos específicos del biogás, específicas del sitio, circunstancias locales, etcétera. El biometano es el producto final, que está compuesto por $CH_4$ (95%–99%) y $CO_2$ (1%–5%), con poco o ningún rastro de $H_2S$ (Awe et al., 2017). Las medidas para obtener el producto final representan un desafío en términos de capital y costos de operación y consumo de energía que representan desventajas para introducir biogás en un mercado para competir con otros combustibles a pesar de los beneficios ambientales potenciales; aun así, un sistema eficaz de fijación de precios del carbono puede aumentar el costo/precio de las intensas tecnologías y actividades que emiten carbono, y al mismo tiempo puede proporcionar un incentivo financiero para que los consumidores y los productores inviertan en tecnologías para reducir las emisiones de GEI. Esto no sólo fomenta la adopción de tecnologías existentes con bajas emisiones de carbono, sino que también promueve indirectamente el desarrollo de otras nuevas (Baranzini et al., 2017).

Para demostrar la aplicabilidad de la formulación modelo propuesta, se han seleccionado 40 ciudades de México ubicadas en la región centro occidental. Las fuentes de biomasa se limitan a

tres: estiércol de vaca, residuos orgánicos y aguas residuales. El caso de estudio considera la implementación de tres tipos de biodigestores: planta de biogás de tipo tambor flotante de cámara, soporte de biogás de tipo tambor flotante digestor y planta de biogás de tipo doma fijo. Se seleccionaron cinco tecnologías de actualización para el biogás purificado: adsorción por oscilación a presión (PSA), lavado de agua a alta presión (HPWS), depuración física orgánica (OPS), proceso de lavado químico (CSP) y separación por membrana (MS). El GLP se toma como combustible fresco. En el material complementario (ver Anexos) se presenta información detallada sobre los parámetros económicos, ambientales y generales, la demanda de energía, digestato y disponibilidad de biomasa con sus respectivas referencias (Agency, 2009; BIRF et al., n.d.; INECC, 2014; Instituto Nacional de Estádistica y Geografía (México), 2016b, 2016c, 2016a; Scarlat et al., 2018a; SENER, 2014, 2016; Ullah Khan et al., 2017).

### *4.3.2 Resultados del caso*

El modelo fue codificado en el software GAMS (GAMS Development Corporation, 2013), donde el solucionador CPLEX se utilizó para resolver el problema de programación lineal de enteros mixtos asociado (MILP). El problema consiste en 1.110.112 variables continuas, 2240 variables binarias y 250.672 ecuaciones individuales. El modelo se resolvió 60 veces en un ordenador con procesador Intel® Core™ i7 a 2,5 Hz con 8 GB de RAM en 1,92 minutos de tiempo medio de CPU para cada solución (escenario) de caso práctico con una desviación estándar de 0,16 min. En esta sección, la discusión de los resultados se da de la siguiente manera.

La **Fig. 4.17** muestra los valores de referencia sin tener en cuenta los impuestos, los ingresos debidos a la generación de emisiones de GEI y la función multiobjetivo. El análisis corresponde a maximizar el beneficio de las ventas de biogás y GLP teniendo en cuenta que la demanda energética se satisface 10%, 20%, 50% y 100% para cada ciudad de la región geográfica estudiada por biogás o GLP. Para el caso del GLP, para obtener los ingresos anuales y las emisiones de GEI, la cantidad de biogás exigida por el mercado se fija a cero ($F_{k,m,p,t}^{Bgp_dem} = 0$), a continuación, sólo se activan las ecuaciones 3.67, 3.68, 3.74 y 3.80 en la formulación del modelo. En el caso del biogás, la cantidad de combustible fresco exigido en el mercado se fija a cero ($F_{p,t}^{FFuel_dem} = 0$) y luego se desactivan todas las ecuaciones relacionadas con el GLP. Los ingresos anuales por ventas de GLP son 29,66, 59,32, 148,30 y 296,59 millones de euros por el 10, 20, 50 y 100% de las demandas energéticas, respectivamente. El precio de venta del GLP en el mercado es de unos 18,47 euros por GJ (SENER, 2016) con un beneficio del 60% sobre el precio de venta. Respecto a los ingresos generados por las ventas de biogás, si se tiene en cuenta que el precio de venta del biogás es al menos de 18,47 euros por GJ para que el biogás sea competitivo en un mercado de GLP, la **Fig. 4.17** muestra que los beneficios anuales son de 27,69, 48,81, 49,30 y 176,21 millones de euros para la demanda

energética, respectivamente. Estos valores representan el 93,34%, 82,28%, 33,24% y 59,41% del beneficio anual obtenido por el GLP. Esto significa que satisfacer una pequeña demanda implica un mayor beneficio debido a que las tecnologías seleccionadas para producir y actualizar el biogás son menores y, por lo tanto, los costos de capital se minimizan. De lo contrario, los costos de capital aumentan a las tecnologías con una mayor capacidad, y los costos de transporte son más altos. Las emisiones de GEI para la cadena de suministro de biogás están de acuerdo con la declaración del problema. Para el GLP, las emisiones anuales de GEI son de 174,49, 348,99, 872,47 y 1744,95 kton de $CO_2$eq, respectivamente. Los valores mencionados anteriormente se tomarán como valores de referencia para analizar el comportamiento de la cadena de suministro de biogás para los casos propuestos con el fin de proponer una solución que haga competitivo el biogás en una bandeja de mercado de GLP para obtener los mejores beneficios económicos y medioambientales. Es necesario destacar que un análisis de la producción de digestato podría ser considerado en obras futuras ya que existe un exceso de este subproducto en todos los casos. La **Fig. 4.18** muestra el exceso de digestato producido cuando se satisface el 10%, 20%, 50% y 100% de la demanda de energía. Las cantidades de digestato son excesivas son 20.53, 37.48, 66.14 y 69.23 kton por año. La diferencia cuando la demanda de energía se satisface en 50% y 100% es pequeña alrededor de 3.09 kton (es decir, la biomasa tomada para producir biogás tiene un rendimiento diferente), y para satisfacer 100% la biomasa se elige con más rendimiento mientras que para 50% la biomasa se selecciona con menos rendimiento, y también debido a la disponibilidad de biomasa en cada ubicación. Cabe señalar que, si bien existe la producción de biogás, también se producirá digestato que podría conducir a una gestión difícil siempre que un mercado para este producto no sea lo suficientemente grande. Por lo tanto, es necesario analizar estrategias alternativas para una buena gestión de este subproducto.

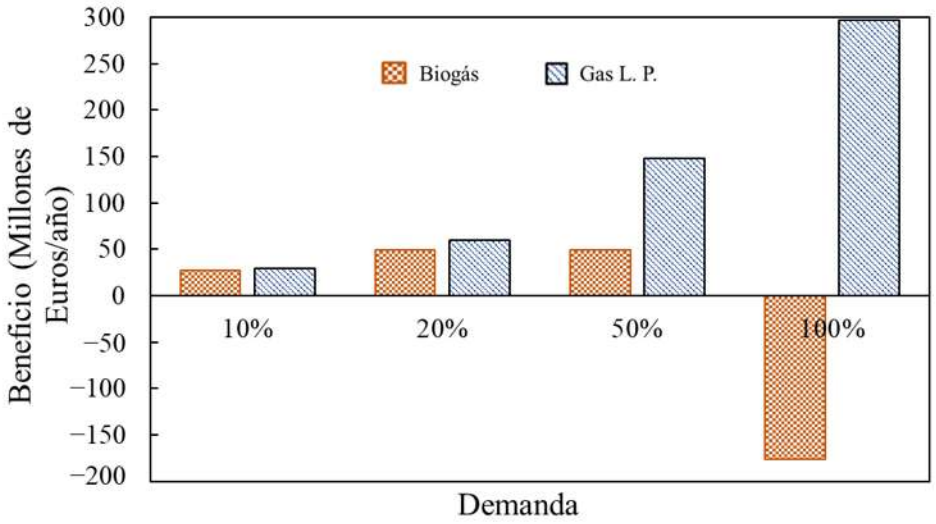



***Figura 4.17*** *Comparación de beneficios entre biogás y GLP para satisfacer las demandas energéticas de la región geográfica estudiada.*

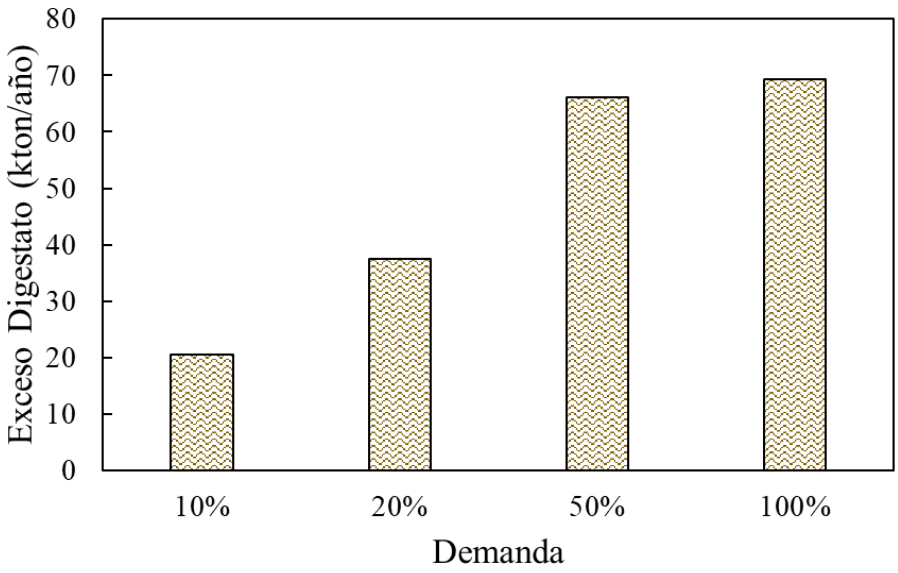



***Figura 4.18*** *Digestato generado en exceso por la cadena de suministro de biogás a diferentes demandas energéticas de la región geográfica estudiada.*

La **Fig. 4.19** presenta la solución para el caso 1, donde la función objetiva tiene en cuenta el impuesto sobre las emisiones de carbono (Ec. 3.82). El problema se resuelve para los diferentes costes del impuesto al carbono (**Tabla 3.1**) maximizando el beneficio para una satisfacción de la demanda energética del 10%, 20%, 50% y 100%. La columna azul representa el beneficio y la línea verde representa las emisiones de GEI. En este caso, la demanda de energía puede ser satisfecha

por el biogás y el GLP simultáneamente. Sin embargo, el objetivo es motivar la producción de biogás para disminuir las emisiones de GEI. Debido a que existe una competencia entre el biogás y el GLP, al principio el GLP es más atractivo económicamente que el biogás, entonces el impuesto al carbono estimula la producción de biogás hasta el punto de que el biogás sea más atractivo económicamente. Como se puede ver, para el 10% de la demanda de energía, el impuesto al carbono en el Escenario 1 (8,93 euros por tonelada de $CO_2$eq) no tiene influencia en la mitigación de las emisiones de GEI; por otra parte, cuando el impuesto al carbono aumenta en los escenarios 2 – 7 (8,93 a 100 euros por tonelada de $CO_2$eq) hay una disminución en el dióxido de carbono, pero los beneficios son menores. El comportamiento de tendencia afirma que para alcanzar una disminución de las emisiones de GEI, es necesario tener mayores impuestos al carbono y las emisiones anuales son 174.49, 74.75, 59.72, 14,76 y 46,21 kton de $CO_2$eq con beneficios anuales de 28,10, 27,38, 27,38, 27,18, 27,03, 27,07, 26,93 millones de euros, respectivamente, y estos valores representan el 0%, el 57%, el 66%, el 70%, el 74%, el 82% y el 91% (a partir del 10%) de demanda de energía remplazada por biogás. Cabe señalar que el porcentaje de biogás que puede sustituirse se calcula con respecto a la reducción de las emisiones de GEI, ya que el 100 % de la sustitución del biogás representa el valor mínimo de las emisiones (cero) de acuerdo con la forma en que se fijaron las emisiones de GEI en la sección anterior para ambos combustibles y, por lo tanto, la sustitución del biogás puede verse fácilmente por la línea verde (emisiones) de la **Fig. 4.19**. Para el 20%, el 50% y el 100% de la demanda de energía, es necesario utilizar valores más elevados de impuestos de carbono alcanzando un máximo del 81%, 57% y 40% de la demanda de energía sustituida por biogás, esto por los impuestos de carbono propuestos, y para estimular la producción de biogás es necesario tener valores de impuesto al carbono de 22,3, 28,57 y 36,61 euros por tonelada de $CO_2$eq. Sin embargo, el incentivo para reemplazar el GLP es pequeño porque cuando el porcentaje de demanda de energía aumenta la diferencia de beneficio entre el biogás y el GLP también se incrementa, como se muestra en la **Fig. 4.17**. Cabe señalar que el escenario 7 (100 euros por tonelada de $CO_2$eq), en el 10% de la demanda de energía, representará una buena configuración de la cadena de suministro de biogás ya que tiene una buena mitigación de emisiones de GEI aunque con bajos ingresos. Además, requiere un impuesto al carbono más grande, que es una penalización difícil de pagar, especialmente en países con bajos recursos económicos. En cuanto a las demandas energéticas superiores al 10%, la perspectiva es aún más difícil. Por lo tanto, el sistema de CT como procedimiento para estimular la competencia entre el biogás y el GLP se limita a las altas penalizaciones, — al menos así es como se presenta el caso.

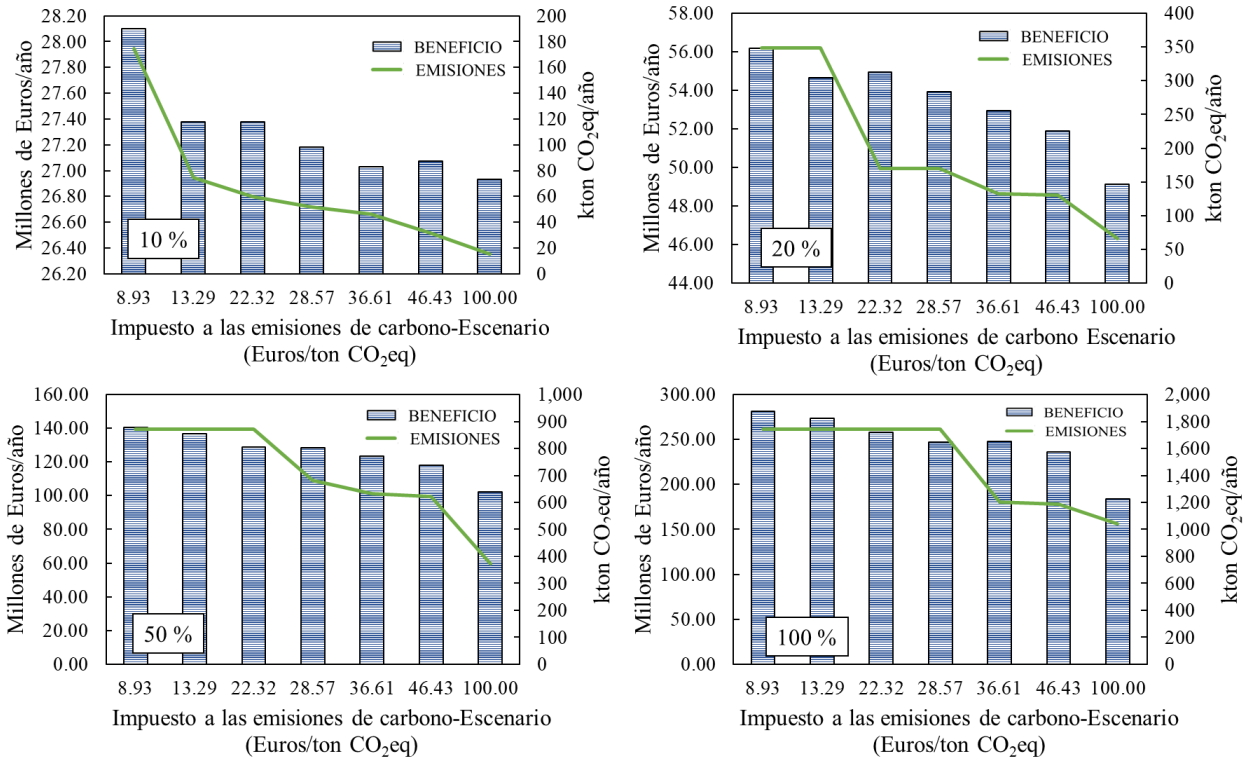



***Figura 4.19*** *Resultados del régimen de impuestos sobre las emisiones de carbono utilizando los escenarios de la Tabla 3.1 para satisfacer el 10 %, el 20 %, el 50 % y el 100 % de la demanda de energía (Caso 1).*

Para el caso 2, la **Fig. 4.20** presenta la solución cuando se considera CT (comercio de emisiones de carbono) en la función objetivo (Ec. 3.83). Al igual que en el caso 1, el problema se resuelve para los diferentes precios para el comercio de emisiones de carbono para el 10%, 20%, 50%, 100% de la demanda de energía como se muestra en la **Tabla 3.2**. La columna azul representa el beneficio, y la línea verde representa las emisiones de GEI. Para el 10% de la demanda de energía, cuando las emisiones de carbono tienen un precio entre 2,68 y 8,93 euros por tonelada de $CO_2$eq, para invertir en un proyecto de biogás no es conveniente, por lo que las emisiones de GEI permanecen en el valor máximo (es decir, el proyecto de biogás no es rentable porque los incentivos no son suficientes para dar competitividad al biogás frente a GLP (**Fig. 4.17**); cuando el precio es de13,39 euros por tonelada de $CO_2$eq, el beneficio se mantiene, pero las emisiones de GEI disminuyen a 74,75 kton de $CO_2$eq, lo que representa el 57% (del 10%) de demanda de energía sustituida por biogás. Para el 20% de la demanda de energía, los valores del comercio de emisiones de carbono inferiores a 26,78 euros por tonelada de $CO_2$eq no estimulan la producción de biogás porque si se incrementa la demanda de energía y se necesita una infraestructura importante para producir biogás, esto hace que el biogás sea menos competitivo con respecto al GLP. Del mismo modo, esto ocurre para el 50% y el 100% de la demanda de energía. Por otro lado, para reducir las

emisiones de GEI al valor mínimo (es decir, utilizar la producción máxima de biogás y evitar el uso de GLP), es necesario un precio por tonelada superior a 200 euros por tonelada de $CO_2$eq para satisfacer el 10% y el20% de los requisitos energéticos. Sin embargo, en este escenario (200 euros por tonelada de $CO_2$eq), el 67% y el 42% de la demanda de energía apenas se sustituyen por biogás cuando es necesario satisfacer el 50% y el 100% de las necesidades energéticas. En general, para estimular la producción de biogás, es necesario tener valores de comercio de emisiones de carbono de al menos 13,39, 26,78, 71,43 y 71,43 euros por tonelada de $CO_2$eq, para el 10%, 20%, 50% y 100% de la demanda de energía, respectivamente. Para lograr las emisiones mínimas, se requieren valores de negociación de emisiones de carbono superiores a 200 euros por tonelada de $CO_2$eq. Dado que el comercio de emisiones de carbono representa una bonificación económica, podría parecer que los valores más altos del comercio de carbono se obtienen fácilmente; Sin embargo, esto también está limitado por las políticas de cada país, donde la bonificación económica máxima mediante el ahorro de emisiones de GEI es de 110 euros por tonelada de $CO_2$eq, y, además, no todos los países tienen el potencial económico de ofrecer valores más altos de comercio de emisiones de carbono. Por lo tanto, es necesario desarrollar estrategias que conduzcan a la mitigación de las emisiones de GEI con incentivos económicos más bajos.

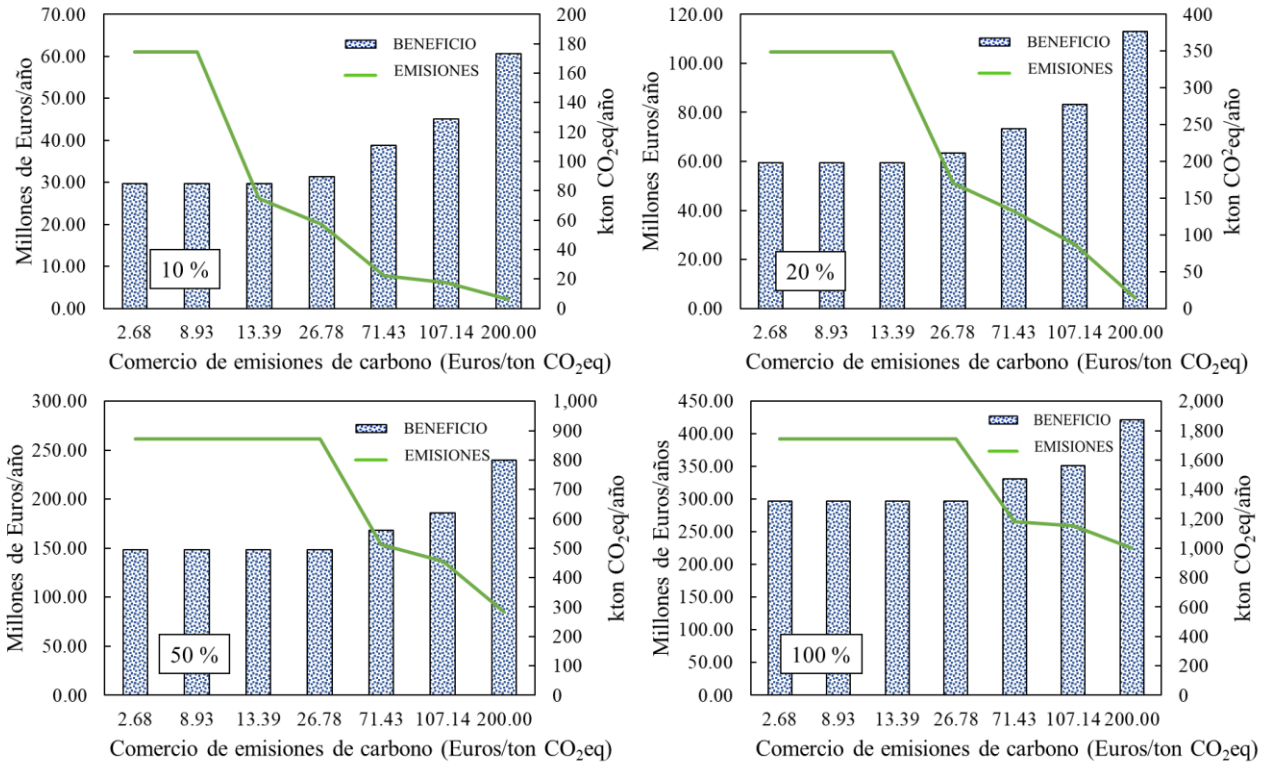



***Figura 4.20*** *Resultados para el comercio de emisiones de carbono utilizando los escenarios de la Tabla 3.2 para satisfacer el 10%, 20%, 50% y 100% de la demanda de energía (Caso 2).*

En ambos casos anteriores, el objetivo es estimular la producción de biogás mediante una bonificación económica o una sanción económica (es decir, tener un incentivo con el propósito de que los gobiernos o productores de GLP inviertan en un proyecto de biogás con beneficios económicos y ambientales). Entonces, el caso 1 y el caso 2 demuestran que es factible estimular la generación de biogás en competencia con el GLP porque los incentivos (impuestos o bonificaciones) conducen a que el biogás obtenga mayores beneficios que los obtenidos sin incentivos. Sin embargo, los incentivos dependen de las políticas ambientales de cada país, y estos incentivos podrían ser difíciles de implementar. Por lo tanto, en el caso 3, se espera que los valores de incentivo puedan mejorarse con respecto a los valores utilizados en los casos 1 y 2 utilizando un enfoque de formulación multiobjetivo para las funciones económicas y medioambientales (es decir, maximizar el beneficio y, al mismo tiempo, minimizar las emisiones de GEI y así encontrar un mejor valor de los incentivos).

La **Fig. 4.21** muestra los resultados de maximizar la solución en la formulación multiobjetivo ($FO$) presentada en la Ec. 3.84**.** La estrategia de solución fue encontrar el valor del parámetro $M_2$ que iguala la función ambiental en orden de magnitud al valor del beneficio máximo para cada porcentaje analizado. De acuerdo con las soluciones extremas obtenidas cuando el GLP sólo se vende (ver **Tabla 4.13**), $M_1 = 1\ y\ M_2 = 170$ (la explicación de cómo se obtienen estos parámetros se hace en la sección de formulación del modelo). Por lo tanto, dado que el término ambiental en la formulación es negativo, si se maximiza, entonces el beneficio se maximizará y las emisiones de GEI se minimizarán y, en consecuencia, el incentivo se puede calcular para obtener al menos el beneficio económico cuando sólo hay venta de GLP (es decir, para obtener el mismo beneficio económico con biogás). El beneficio económico máximo por GLP se puede ver en la **Fig. 4.17**. En el gráfico (**Fig. 4.21**) se presentan las soluciones obtenidas para cada porcentaje de la demanda de energía. La columna más clara representa el beneficio utilizando la formulación multiobjetivo con el beneficio obtenido por el comercio de carbono y las emisiones de GEI generadas están representadas por la línea verde discontinua. Para hacer una comparación con la metodología utilizada en el caso 2, los valores del beneficio y de las emisiones GEI se calcularon utilizando los valores de comercio de carbono calculados en el caso 2; En la figura, la columna oscura representa el beneficio y las emisiones de GEI están representadas por la línea continua.

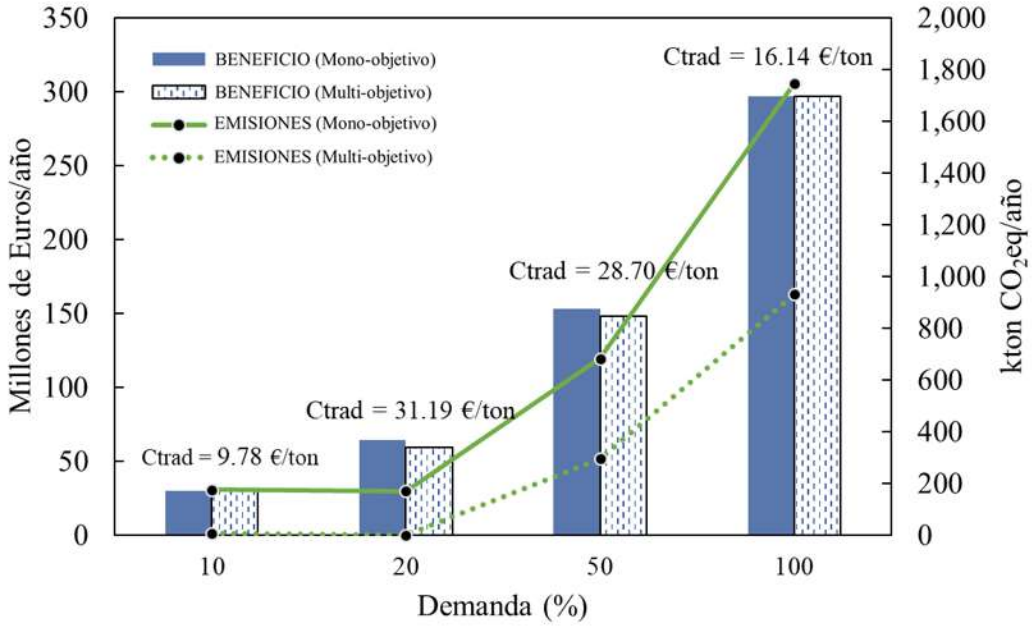



***Figura 4.21*** *Resultados para la formulación multiobjetivo mediante el comercio de emisiones de carbono (Caso 3).*

Los valores de beneficio anuales obtenidos por la maximización multiobjetivo $FO$ son 26,66, 59,32, 148,30 y 296,59 millones de euros con sus respectivas emisiones de GEI de 7.03, 0.37, 293.96 y 931.06 kton de $CO_2$eq para el 10%, 20%, 50% y 100% de la demanda de energía satisfecha. Los resultados desglosados se muestran en la **Tabla 4.13**, donde se presentan los ingresos por biogás y GLP, los costos de compra de biomasa, los costos de transporte, el capital y los costos operativos. Los beneficios anuales obtenidos, en comparación con el beneficios y emisiones GEI obtenidas cuando sólo se utiliza GLP para satisfacer la demanda de energía, son de la misma magnitud porque los valores del comercio de emisiones de carbono se obtienen para lograr al menos el beneficio del GLP. Para cada porcentaje de la demanda de energía, los valores de comercio de emisiones de carbono con la formulación multiobjetivo son 9,78, 31,19, 28,70 y 16,14 euros por tonelada de $CO_2$eq, respectivamente. En general, estos incentivos al carbono son inferiores a los valores que estimulan la producción de biogás en el caso 2, cuando los incentivos al carbono son al menos 13,39, 26,78, 74,43 y 74,43 euros por tonelada de $CO_2$eq con sus respectivas emisiones anuales de GEI de 74,75, 170,11, 512,95 y 1182,02 kton de $CO_2$eq (ver **Fig. 4.20**) para cada porcentaje de la demanda de energía. Por lo tanto, hay una reducción apreciable de los valores del comercio de emisiones de carbono y las emisiones de GEI. Sin embargo, es necesario comparar la solución obtenida por el caso 3 y el caso 2 de manera específica (es decir, utilizando los valores de comercio de emisiones de carbono obtenidos por el caso 3 en el caso 2). De esta manera, se puede analizar qué formulación es mejor.

***Tabla 4.13*** *Resultados desglosados para la formulación multiobjetivo.*

| | **Demanda (%)** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **10** | **20** | **50** | **100** |
| Beneficio total (€/año) | 29,658,797.20 | 59,316,072.60 | 148,289,586.00 | 296,584,072.00 |
| Ingresos totales | 50,823,297.20 | 111,023,472.60 | 233,047,986.00 | 406,027,972.00 |
| Cadena de suministro de biogás | 47,991,000.00 | 100,090,000 | 166,470,000.00 | 234,640,000.00 |
| Comercio de emisiones de carbono | 1,637,797.20 | 10,870,594.30 | 16,613,986.00 | 13,137,972.00 |
| Lpg | 1,194,500.00 | 62,878.30 | 49,964,000.00 | 158,250,000.00 |
| Coste total | 21,164,500.00 | 51,707,400.00 | 84,758,400.00 | 109,443,900.00 |
| Costo de la biomasa | 982,400.00 | 2,380,100.00 | 4,623,400.00 | 7,282,900.00 |
| Costo de transporte | 2,212,000.00 | 8,570,300.00 | 15,086,000.00 | 13,763,000.00 |
| Costo de capital | 5,752,100.00 | 15,178,000.00 | 22,704,000.00 | 28,561,000.00 |
| Costo operacional | 12,218,000.00 | 25,579,000.00 | 42,345,000.00 | 59,837,000.00 |
| Emisiones totales (Ton $CO_2$eq/año) | 7027.62 | 369.94 | 293,960.00 | 931,060.00 |
| Lpg | | | | |
| Beneficio total (a/año) | 29,658,797.16 | 59,317,594.32 | 148,293,985.8 | 296,587,971.60 |
| Emisiones totales (Ton $CO_2$eq/año) | 174,494.99 | 348,989.99 | 872,474.99 | 1,744,949.98 |

Utilizando los mismos valores de comercio de emisiones de carbono, tanto para el caso 2 como para el caso 3, la **Fig. 4.21** muestra que los valores de 9,78, 31,31, 28,70 y 16,14 euros por tonelada de $CO_2$eq dan beneficios anuales de 29,66, 64,34, 153,20 y 296,60 millones de euros y emisiones anuales de 174,50, 170,12, 681,57 y 1744,90 kton de $CO_2$eq al 10%, 20%, 50% y 100% de la demanda de energía, respectivamente (utilizando los valores de precios de carbono del caso 2). Por lo tanto, el gráfico ilustra la comparación entre el asunto 2 y el caso 3 y se observa una reducción considerable de las emisiones de GEI y valores de beneficio similares con la formulación multiobjetivo (caso 3). Los porcentajes de reducción de las emisiones de GEI son del 95,97%, 99,78%, 56,87% y 46,64%, mientras que los valores de beneficio en ambos casos son similares a una diferencia en porcentaje de 0,00%, 7,80%, 3,20% y 0,00%, respectivamente. Si bien existe una mayor reducción de las emisiones, más GLP se sustituye por biogás (es decir, los porcentajes de GLP sustituidos por biogás son del 95,97%, 99,78%, 56,87% y 46,64%), y entonces, en 10% y 20% de la demanda de energía, el biogás puede prácticamente abastecer toda la demanda, sin embargo, para el 50 y el 100% de la demanda, el biogás apenas alcanza la mitad de la demanda de energía porque la relación entre los ingresos por biogás y el costo total en la cadena de suministro de biogás cambia en función de la capacidad tecnológica utilizada para producir biogás (relación: 2,26, 1,93, 1,96 y 2,13, respectivamente). Por ejemplo, entre la demanda de energía del 50% y el 100%, la relación ingresos/costes es de 1,96 y 2,13, alcanzando el 56,87% y el 46,64% del GLP

sustituido porque el costo necesario para reemplazar el 50% o 100% aumenta considerablemente como muestra la **Fig. 4.17**. Por lo tanto, aumentar la demanda de energía significa que las tecnologías con más capacidad de producción, y mayores costos de transporte son necesarias, haciendo que la sustitución completa del biogás no sea rentable para el 50% y el 100% de la demanda de energía, al menos en el caso de estudio analizado por este trabajo. Sin embargo, los valores de la negociación de emisiones de carbono obtenidos por el enfoque multiobjetivo se encuentran dentro de los límites utilizados en todo el mundo (110 euros por tonelada de $CO_2$eq) y éstos representan al menos el 31% del límite máximo (tomando el valor máximo por el caso 3: 31.19 euros por tonelada de $CO_2$eq) lo que permite la ejecución de proyectos de energía renovable en países con menor potencial económico.

Por último, la formulación multiobjetivo del caso 3 demuestra que es una mejor manera de estimular la inversión de un proyecto de biogás que la formulación de un solo objetivo utilizando la monetización de las emisiones de carbono, ya que en la estrategia del impuesto sobre las emisiones de carbono el resultado del beneficio se ve más afectado que las emisiones de GEI y cuando se utiliza el comercio de emisiones de carbono, como en la estrategia del impuesto sobre las emisiones de carbono, se requiere un precio muy alto que será difícil de alcanzar por parte de algunos gobiernos. Además, el modelo puede proporcionar la configuración de la cadena de suministro: tipo de biomasa seleccionada, tipo de tecnologías de producción y purificación, y los caudales entre ubicaciones como ya se ha demostrado en las secciones anteriores.

# CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

En este capítulo se muestran las principales conclusiones respecto a los modelos propuestos y resultados obtenidos, así como recomendaciones y el trabajo futuro de esta línea de investigación.

En sustento a lo presentado en esta tesis, podemos concluir que la hipótesis postulada de que el desarrollo de modelos de optimización para la cadena de valor de biogás en México permitirá obtener información para asistir la mejor toma de decisiones que ayudará a disminuir el costo, el impacto ambiental y social asociado a la producción, distribución y generación de valor agregado de éste, queda corroborada. Por consiguiente, podemos afirmar que los tres modelos desarrollados dan una solución fehaciente y óptima para establecer proyectos de biogás en México, cada uno con sus particularidades. Las respectivas conclusiones quedan expuestas de la siguiente manera.

1. *Modelo determinista:* Se presentó una formulación de optimización MILP de una nueva superestructura para la cadena de suministro de biogás que implica la ubicación óptima y la selección de múltiples tecnologías de procesamiento y purificación para satisfacer las demandas de biogás y biofertilizantes. Sobre la base de la superestructura, se desarrolló una formulación de programación matemática para la maximización simultánea del beneficio anual total teniendo en cuenta los ingresos generados por la venta de productos, los costes de capital asociados al transporte y los costes fijos y variables, y el ahorro de emisiones de efecto invernadero generado por la cadena de suministro de biogás. Se resolvieron dos estudios de caso para la región geográfica de México con el fin de mostrar la aplicabilidad de la metodología propuesta. Uno corresponde exclusivamente a la venta de biogás purificado y el otro implica la venta de biogás no purificado y purificado. Dependiendo de las regulaciones de biogás, los resultados mostraron que las soluciones son económicamente superiores cuando se vende una parte del biogás no purificado, aunque el impacto ambiental aumenta, este aumento no es tan considerable. Además, los resultados mostraron que la implementación de la metodología de optimización propuesta produce importantes beneficios económicos y medioambientales debido al aumento simultáneo del beneficio anual total y el ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero. El enfoque presentado es general y se puede aplicar a cualquier caso de estudio, si la información requerida está disponible.

2. *Modelo estocástico:* Se presentó un modelo de optimización multiobjetivo para una cadena de suministro de biogás. El modelo propuesto se formuló con un enfoque multi escenario, que se reformula como un problema objetivo único utilizando una solución de estrategia multi escenario con un enfoque CVaR. Se presentó un caso de estudio con el propósito de explorar el impacto de la disponibilidad de biomasa y la demanda de biogás en los resultados económicos y ambientales para tratar de equilibrar las prioridades en las funciones objetivas económicas y ambientales, es decir, minimizar la insatisfacción entre ellas bajo criterios de igualdad. Los resultados obtenidos por la estrategia de solución, mostraron que la metodología de optimización propuesta produce beneficios económicos y ambientales, y la

información obtenida por gráficos de probabilidad acumulativa con el enfoque CVaR puede ser valioso para las partes interesadas a un proyecto de esta índole porque proporciona interpretaciones estadísticas a la solución compromiso resultante, por lo tanto, el enfoque propuesto puede ayudar a las partes interesadas a tomar una decisión sobre la implementación de proyectos de esta naturaleza. Las futuras obras podrían apuntar bajo este mismo enfoque a equilibrar las prioridades de las partes interesadas en el proveedor de materias primas, el transporte, los costos de capital y los clientes involucrados en la cadena de suministro de biogás con aspectos económicos, ambientales y sociales, y además podría ampliarse a otra medida de riesgo alternativa. Para abordar el problema de varios escenarios, es posible comparar el rendimiento y las soluciones obtenidas mediante enfoques paramétricos y no paramétricos basados en algoritmos de aprendizaje automático como análisis de componentes principales, vecinos más cercanos o máquinas vectoriales de soporte.

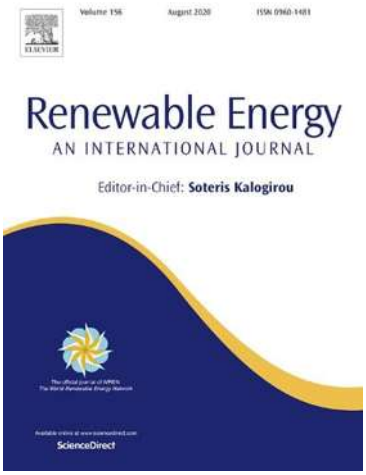
3. *Modelo para sustituir un combustible fósil:* Se presentó una formulación de optimización MILP para la cadena de suministro de biogás para analizar el rendimiento de invertir en un proyecto de biogás con el fin de disminuir las emisiones de GEI y obtener al menos beneficios equivalentes en comparación con el combustible utilizado actualmente en el mercado. La formulación del modelo propuesto se puede utilizar para resolver diferentes estudios de caso utilizando los datos apropiados y se puede utilizar como una herramienta de toma de decisiones. Se propuso un caso de estudio para una región geográfica en México para mostrar el efecto de la monetización de emisiones de carbono con la metodología propuesta. Los resultados demostraron que el impuesto sobre las emisiones de carbono o el comercio de emisiones de carbono son métodos útiles para estimular la inversión en un proyecto de biogás cuando está en competencia con los combustibles fósiles. Se ha demostrado que se requieren altos impuestos y bonificaciones por carbono para alcanzar al menos los mismos beneficios y luego hacer una reducción de las emisiones de GEI. Sin embargo, el uso de una formulación de optimización multiobjetivo conduce a obtener mejores soluciones utilizando valores más bajos de impuestos sobre las emisiones de carbono y el comercio de emisiones de carbono y alcanzando beneficios óptimos y una mayor reducción de las emisiones de GEI. Los trabajos futuros deberían considerar la comparación del análisis detallado de las emisiones iniciales de biogás en competencia con otros combustibles, a fin de demostrar las posibles ventajas de la energía renovable respecto a las fuentes de energía convencionales; en este trabajo, las emisiones, dentro de la cadena de producción, no se consideraron porque la principal contribución fue demostrar que una formulación de optimización multiobjetivo en combinación con los precios del carbono

conduce a mejores resultados para estimular la producción de energía renovable. Además, se podrían implementar enfoques de optimización, como con las técnicas de optimización estocástica, con el fin de estudiar la incertidumbre asociada con el modelo y evaluar los posibles beneficios sociales, económicos y ambientales.

Finalmente, de acuerdo al planteamiento del problema, se demostró que la generación de modelos matemáticos para la cadena de valor de biogás en México permite obtener información para asistir la mejor toma de decisiones que ayude a disminuir el costo, el impacto ambiental y social asociado a la producción, distribución y generación de valor agregado de éste. Además, se demostró que existe factibilidad para un proyecto que involucre la producción de biogás, siempre y cuando se optimice la selección de la tecnología para producirlo y purificarlo, se seleccionen las localidades apropiadas donde debe ser instalada una planta de biogás y a su vez, se consideren la cantidad y tipo de biomasa disponible a sus alrededores, y la necesidad energética de la zona geográfica. Si bien tomando las consideraciones anteriores son suficientes para determinar la factibilidad de la cadena de valor del biogás, como se demostró en los casos de estudio del modelo determinista, si se pretende obtener mejores beneficios o al menos tener una mejor certeza a la hora de platearse un proyecto como éste, existen alternativas de modelación y otros factores que pueden incluirse para una mejor proyección de los beneficios esperados. Estas alternativas son la generación de modelos tomando en cuenta la incertidumbre asociada a variables que tengan un impacto en el proceso y utilizando medidas de riesgo que garanticen una mejor toma de decisión, tal como se demostró en el caso del modelo estocástico. Otra alternativa es obtener una estimulación externa al mismo proceso como puede ser un subsidio gubernamental o la necesidad de remplazar un servicio, producto o proceso que necesite actualización, mejora o sustentabilidad, en este caso, quedó demostrado que el uso de impuestos sobre las emisiones de carbono o el comercio de emisiones de carbono son métodos útiles para estimular la inversión de este tipo de proyectos.

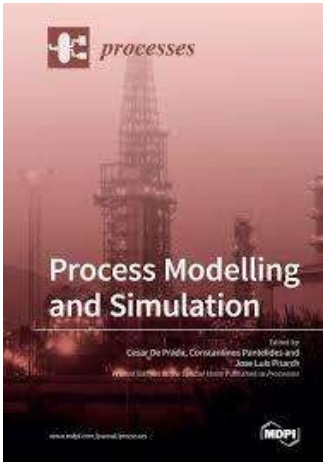
# REFERENCIAS

*Publicaciones generadas de la tesis:*




Díaz-Trujillo, L. A., & Nápoles-Rivera, F. (2019). Optimization of biogas supply chain in Mexico considering economic and environmental aspects. *Renewable Energy*, 139, 1227–1240. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.027

Díaz-Trujillo L.A., Fuentes-Cortés L.F., Nápoles-Rivera F. (2020) Economic and Environmental Optimization for a Biogas Supply Chain: A CVaR Approach Applied to Uncertainty of Biomass and Biogas-Demand. *Computers and Chemical Engineering*, 141. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107018.




Díaz-Trujillo, L.A.; Tovar-Facio, J.; Nápoles-Rivera, F.; Ponce-Ortega, J.M. Effective Use of Carbon Pricing on Climate Change Mitigation Projects: Analysis of the Biogas Supply Chain to Substitute Liquefied-Petroleum Gas in Mexico. *Processes* **2019**, *7*, 668. https://doi.org/10.3390/pr7100668

Abdelaziz, F. Ben. (2012). Solution approaches for the multiobjective stochastic programming. *European Journal of Operational Research*, *216*(1), 1–16. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.03.033

Agency, E. (2009). *Partial Financial Impact Assessment of the introduction of a Quality Protocol for the production and use of anaerobic digestate*. www.wrap.org.uk

Awe, O. W., Zhao, Y., Nzihou, A., Minh, D. P., & Lyczko, N. (2017). A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies. *Waste and Biomass Valorization*, *8*(2), 267–283. https://doi.org/10.1007/s12649-016-9826-4

Baranzini, A., van den Bergh, J. C. J. M., Carattini, S., Howarth, R. B., Padilla, E., & Roca, J. (2017). Carbon pricing in climate policy: seven reasons, complementary instruments, and political economy considerations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, *8*(4), e462. https://doi.org/10.1002/wcc.462

Bekkering, J., Broekhuis, A. A., & van Gemert, W. J. T. (2010). Optimisation of a green gas supply chain – A review. *Bioresource Technology*, *101*(2), 450–456. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.106

Bekkering, J., Hengeveld, E. J., van Gemert, W. J. T., & Broekhuis, A. A. (2015a). Designing a green gas supply to meet regional seasonal demand – An operations research case study. *Applied Energy*, *143*, 348–358. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.034

Bekkering, J., Hengeveld, E. J., van Gemert, W. J. T., & Broekhuis, A. A. (2015b). Will implementation of green gas into the gas supply be feasible in the future? *Applied Energy*, *140*, 409–417. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.071

Bing, X., Bloemhof-Ruwaard, J., Chaabane, A., & van der Vorst, J. (2015). Global reverse supply chain redesign for household plastic waste under the emission trading scheme. *Journal of Cleaner Production*, *103*, 28–39. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.02.019

BIRF, AIF, IFC, MIGA, & CIADI. (n.d.). *Banco Mundial*.

Börjesson, P., & Berglund, M. (2006). Environmental systems analysis of biogas systems—Part I: Fuel-cycle emissions. In *Biomass and Bioenergy* (Vol. 30). https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.11.014

Börjesson, P., & Berglund, M. (2007). Environmental systems analysis of biogas systems—Part II: The environmental impact of replacing various reference systems. *Biomass and Bioenergy*, *31*(5), 326–344. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.01.004

Brook, A., Kendrick, D., & Meeraus, A. (1988). GAMS, a User's Guide. *SIGNUM Newsl.*, *23*(3–4), 10–11. https://doi.org/10.1145/58859.58863

Cambero, C., & Sowlati, T. (2016). Incorporating social benefits in multi-objective optimization of forest-based bioenergy and biofuel supply chains. *Applied Energy*, *178*, 721–735. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.079

Cao, Y., Fuentes-Cortes, L. F., Chen, S., & Zavala, V. M. (2017). Scalable modeling and solution of

stochastic multiobjective optimization problems. *Computers & Chemical Engineering*, *99*, 185–197. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.01.021

Carl, J., & Fedor, D. (2016). Tracking global carbon revenues: A survey of carbon taxes versus cap-and-trade in the real world. *Energy Policy*, *96*, 50–77. https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2016.05.023

Carneiro, M. C., Ribas, G. P., & Hamacher, S. (2010). Risk Management in the Oil Supply Chain: A CVaR Approach. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *49*(7), 3286–3294. https://doi.org/10.1021/ie901265n

Chadwick, D., Sommer, S., Thorman, R., Fangueiro, D., Cardenas, L., Amon, B., & Misselbrook, T. (2011). Manure management: Implications for greenhouse gas emissions. *Animal Feed Science and Technology*, *166–167*, 514–531. https://doi.org/10.1016/J.ANIFEEDSCI.2011.04.036

Chen, L., Cong, R.-G., Shu, B., & Mi, Z.-F. (2017). A sustainable biogas model in China: The case study of Beijing Deqingyuan biogas project. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *78*, 773–779. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.027

Chinese, D., Patrizio, P., & Nardin, G. (2014). Effects of changes in Italian bioenergy promotion schemes for agricultural biogas projects: Insights from a regional optimization model. *Energy Policy*, *75*, 189–205. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.09.014

Chiu, F.-P., Kuo, H.-I., Chen, C.-C., & Hsu, C.-S. (2015). The energy price equivalence of carbon taxes and emissions trading—Theory and evidence. *Applied Energy*, *160*, 164–171. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.09.022

COFECE. (2018). Transición hacia Mercados Competidos de Energía: Gas LP. *Cuadernos de Promoción de La Competencia*.

Cui, L.-B., Fan, Y., Zhu, L., & Bi, Q.-H. (2014). How will the emissions trading scheme save cost for achieving China's 2020 carbon intensity reduction target? *Applied Energy*, *136*, 1043–1052. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.05.021

D., D. T., & G., B. L. (2009). Life-Cycle Analysis of Energy and Greenhouse Gas Emissions from Anaerobic Biodegradation of Municipal Solid Waste. *Journal of Environmental Engineering*, *135*(11), 1097–1105. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000098

Dal-Mas, M., Giarola, S., Zamboni, A., & Bezzo, F. (2011). Strategic design and investment capacity planning of the ethanol supply chain under price uncertainty. *Biomass and Bioenergy*, *35*(5), 2059–2071. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.060

de Gooyert, V., Rouwette, E., van Kranenburg, H., & Freeman, E. (2017). Reviewing the role of stakeholders in Operational Research: A stakeholder theory perspective. *European Journal of Operational Research*, *262*(2), 402–410. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.03.079

de Moraes Dutenkefer, R., de Oliveira Ribeiro, C., Morgado Mutran, V., & Eduardo Rego, E. (2018). The insertion of biogas in the sugarcane mill product portfolio: A study using the robust optimization approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *91*, 729–740. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.046

Delzeit, R., & Kellner, U. (2013). The impact of plant size and location on profitability of biogas plants in Germany under consideration of processing digestates. *Biomass and Bioenergy*, *52*, 43–53.

https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.02.029

Diaz-Barriga-Fernandez, A. D., Santibañez-Aguilar, J. E., Nápoles-Rivera, F., & Ponce-Ortega, J. M. (2018). Analysis of the financial risk under uncertainty in the municipal solid waste management involving multiple stakeholders. *Computers & Chemical Engineering*, *117*, 433–450. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.07.017

Díaz-Trujillo, L. A., & Nápoles-Rivera, F. (2019). Optimization of biogas supply chain in Mexico considering economic and environmental aspects. *Renewable Energy*, *139*, 1227–1240. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.027

Dowling, A. W., Ruiz-Mercado, G., & Zavala, V. M. (2016). A framework for multi-stakeholder decision-making and conflict resolution. *Computers & Chemical Engineering*, *90*, 136–150. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.03.034

Du, S., Tang, W., & Song, M. (2016). Low-carbon production with low-carbon premium in cap-and-trade regulation. *Journal of Cleaner Production*, *134*, 652–662. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.01.012

Energy Saving Trust. (2008). *Biogas*. http://www.energysavingtrust.org.uk/fleet/technology/alternativefuels/biogas/

Floudas, C. A. (2000). *Deterministic global optimization : theory, methods, and applications*. Kluwer Academic Publishers.

Fuentes-Cortés, L. F., Ma, Y., Ponce-Ortega, J. M., Ruiz-Mercado, G., & Zavala, V. M. (2018). Valuation of water and emissions in energy systems. *Applied Energy*, *210*, 518–528. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.030

Fuentes-Cortés, L. F., Ponce-Ortega, J. M., & Zavala, V. M. (2018). Balancing stakeholder priorities in the operation of combined heat and power systems. *Applied Thermal Engineering*, *128*, 480–488. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.052

Fuentes-Cortés, L. F., Serna-González, M., & Ponce-Ortega, J. M. (2017). Analysis of Carbon Policies in the Optimal Design of Domestic Cogeneration Systems Involving Biogas Consumption. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *5*(5), 4429–4442. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00524

GAMS Development Corporation. (2013). *General Algebraic Modelling System (GAMS)* (Release 24.2.1).

Gao, J., & You, F. (2018). A stochastic game theoretic framework for decentralized optimization of multi-stakeholder supply chains under uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.05.016

Garbs, M., & Geldermann, J. (2018). Analysis of selected economic and environmental impacts of long distance manure transports to biogas plants. *Biomass and Bioenergy*, *109*, 71–84. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.12.009

Gebreslassie, B. H., Yao, Y., & You, F. (2012). Design under uncertainty of hydrocarbon biorefinery supply chains: Multiobjective stochastic programming models, decomposition algorithm, and a Comparison between CVaR and downside risk. *AIChE Journal*, *58*(7), 2155–2179. https://doi.org/10.1002/aic.13844

Gonela, V. (2018). Stochastic optimization of hybrid electricity supply chain considering carbon emission schemes. *Sustainable Production and Consumption*, *14*, 136–151. https://doi.org/10.1016/J.SPC.2018.02.004

Gutierrez, E. C., Xia, A., & Murphy, J. D. (2016). Can slurry biogas systems be cost effective without subsidy in Mexico? *Renewable Energy*, *95*, 22–30. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.096

Hahn, H., Ganagin, W., Hartmann, K., & Wachendorf, M. (2014). Cost analysis of concepts for a demand oriented biogas supply for flexible power generation. *Bioresource Technology*, *170*, 211–220. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.085

Hardisty, P. E., Clark, T. S., & Hynes, R. G. (2012). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation: A Comparative Analysis of Australian Energy Sources. In *Energies* (Vol. 5, Issue 4). https://doi.org/10.3390/en5040872

Havukainen, J., Uusitalo, V., Niskanen, A., Kapustina, V., & Horttanainen, M. (2014). Evaluation of methods for estimating energy performance of biogas production. *Renewable Energy*, *66*, 232–240. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.011

INECC. (2014). Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México. In *Coordinación General de Cambio Climático y Desarro.llo Bajo en Carbono*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf

INEGI. (2009). *Estados Unidos Mexicanos, Censo Agropecuario 2007, VIII Censo Agricola, Ganadero y Forestal*.

INEGI. (2014). *Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos*.

Instituto Nacional de Estádistica y Geografía (México). (2016a). *Anuario estadístico y geográfico de Guanajuato 2016*.

Instituto Nacional de Estádistica y Geografía (México). (2016b). *Anuario estadístico y geográfico de Jalisco 2016*.

Instituto Nacional de Estádistica y Geografía (México). (2016c). *Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo 2016*.

Iván, V.-R., José, M.-R., Melitón, E.-J., & Agustina, O.-S. (2014). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica Parte I: excretas de ganado bovino y porcino. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, *15*(3), 429–436. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1405-7743(14)70352-X

Iván, V.-R., Melitón, E.-J., José, M.-R., & Agustina, O.-S. (2015). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos urbanos. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, *16*(3), 471–478. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.012

Jensen, I. G., Münster, M., & Pisinger, D. (2017). Optimizing the supply chain of biomass and biogas for a single plant considering mass and energy losses. *European Journal of Operational Research*, *262*(2), 744–758. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.03.071

Jensen, I. G., & Skovsgaard, L. (2017). The impact of CO2-costs on biogas usage. *Energy*, *134*, 289–300. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.019

JIA, X., & JIA, R. (2017). Improve efficiency of biogas feedback supply chain in rural china. *Acta Mathematica Scientia*, *37*(3), 768–785. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0252-9602(17)30036-X

Jiang, J., Xie, D., Ye, B., Shen, B., & Chen, Z. (2016). Research on China's cap-and-trade carbon emission trading scheme: Overview and outlook. *Applied Energy*, *178*, 902–917. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.06.100

Kaspersen, B. S., Christensen, T. B., Fredenslund, A. M., Møller, H. B., Butts, M. B., Jensen, N. H., & Kjaer, T. (2016). Linking climate change mitigation and coastal eutrophication management through biogas technology: Evidence from a new Danish bioenergy concept. *Science of The Total Environment*, *541*, 1124–1131. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.015

Khishtandar, S. (2019). Simulation based evolutionary algorithms for fuzzy chance-constrained biogas supply chain design. *Applied Energy*, *236*, 183–195. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.092

Li, W., & Jia, Z. (2017). Carbon tax, emission trading, or the mixed policy: which is the most effective strategy for climate change mitigation in China? *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *22*(6), 973–992. https://doi.org/10.1007/s11027-016-9710-3

Liang, Q.-M., Yao, Y.-F., Zhao, L.-T., Wang, C., Yang, R.-G., & Wei, Y.-M. (2014). Platform for China Energy & Environmental Policy Analysis: A general design and its application. *Environmental Modelling & Software*, *51*, 195–206. https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2013.09.032

Lyng, K.-A., Stensgård, A. E., Hanssen, O. J., & Modahl, I. S. (2018). Relation between greenhouse gas emissions and economic profit for different configurations of biogas value chains: A case study on different levels of sector integration. *Journal of Cleaner Production*, *182*, 737–745. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.126

Markowski, M., Białobrzewski, I., Zieliński, M., Dębowski, M., & Krzemieniewski, M. (2014). Optimizing low-temperature biogas production from biomass by anaerobic digestion. *Renewable Energy*, *69*, 219–225. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.039

Martín-Hernández, E., Sampat, A. M., Zavala, V. M., & Martín, M. (2018). Optimal integrated facility for waste processing. *Chemical Engineering Research and Design*, *131*, 160–182. https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2017.11.042

Mayerle, S. F., & Neiva de Figueiredo, J. (2016). Designing optimal supply chains for anaerobic bio-digestion/energy generation complexes with distributed small farm feedstock sourcing. *Renewable Energy*, *90*, 46–54. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.022

Miltner, M., Makaruk, A., & Harasek, M. (2017). Review on available biogas upgrading technologies and innovations towards advanced solutions. *Journal of Cleaner Production*, *161*, 1329–1337. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.045

Mirkouei, A., Haapala, K. R., Sessions, J., & Murthy, G. S. (2017). A review and future directions in techno-economic modeling and optimization of upstream forest biomass to bio-oil supply chains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *67*, 15–35.

https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.053

Møller, J., Boldrin, A., & Christensen, T. (2009). Anaerobic digestion and digestate use: Accounting of greenhouse gases and global warming contribution. In *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* (Vol. 27). https://doi.org/10.1177/0734242X09344876

Montingelli, M. E., Benyounis, K. Y., Quilty, B., Stokes, J., & Olabi, A. G. (2016). Optimisation of biogas production from the macroalgae Laminaria sp. at different periods of harvesting in Ireland. *Applied Energy*, *177*, 671–682. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.150

Moro, A., & Lonza, L. (2018). Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *64*, 5–14. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.012

Nevzorova, T., & Kutcherov, V. (2019). Barriers to the wider implementation of biogas as a source of energy: A state-of-the-art review. *Energy Strategy Reviews*, *26*, 100414. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100414

Newell, R. G., Jaffe, A. B., & Stavins, R. N. (2006). The effects of economic and policy incentives on carbon mitigation technologies. *Energy Economics*, *28*(5–6), 563–578. https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2006.07.004

Othman, M. N., Lim, J. S., Theo, W. L., Hashim, H., & Ho, W. S. (2017). Optimisation and targeting of supply-demand of biogas system through gas system cascade analysis (GASCA) framework. *Journal of Cleaner Production*, *146*, 101–115. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.057

Otoma, S., & Diaz, R. (2017). Life-cycle greenhouse gas emissions and economic analysis of alternative treatments of solid waste from city markets in Vietnam. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, *19*(1), 70–87. https://doi.org/10.1007/s10163-015-0380-0

Paolini, V., Petracchini, F., Segreto, M., Tomassetti, L., Naja, N., & Cecinato, A. (2018). Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, *53*(10), 899–906. https://doi.org/10.1080/10934529.2018.1459076

Pathak, D. S., Jain, N., Bhatia, A., Mohanty, S., & Gupta, N. (2008). Global warming mitigation potential of biogas plants in India. In *Environmental monitoring and assessment* (Vol. 157). https://doi.org/10.1007/s10661-008-0545-6

Patrizio, P., Leduc, S., Chinese, D., & Kraxner, F. (2017). Internalizing the external costs of biogas supply chains in the Italian energy sector. *Energy*, *125*, 85–96. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.033

Pérez, I., Garfí, M., Cadena, E., & Ferrer, I. (2014). Technical, economic and environmental assessment of household biogas digesters for rural communities. *Renewable Energy*, *62*, 313–318. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.017

Preston, T. R., & Rodriguez, L. (2007). *Biodigester Installation Manual*. http://www.fao.org/WAICENT/FAOIN-FO/AGRICULT/AGA/AGA/FRG/Recycle/biodigester

PROFECO. (2008). Gas L.P. en el Súper. In *PROFECO Informa* (pp. 13–15).

Qiu, Y., Qiao, J., & Pardalos, P. M. (2017). A branch-and-price algorithm for production routing problems with carbon cap-and-trade. *Omega*, *68*, 49–61. https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2016.06.001

Raslavičius, L., Keršys, A., Mockus, S., Keršienė, N., & Starevičius, M. (2014). Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *32*, 513–525. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.052

Rockafellar, R. T., & Uryasev, S. (2002). Conditional value-at-risk for general loss distributions. *Journal of Banking & Finance*, *26*(7), 1443–1471. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-4266(02)00271-6

Sampat, A. M., Martin, E., Martin, M., & Zavala, V. M. (2017). Optimization formulations for multi-product supply chain networks. *Computers & Chemical Engineering*, *104*, 296–310. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.04.021

Scarlat, N., Dallemand, J.-F., & Fahl, F. (2018a). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, *129*, 457–472. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006

Scarlat, N., Dallemand, J.-F., & Fahl, F. (2018b). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, *129*, 457–472. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.03.006

SEMARNAT, & CONAGUA. (2014). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potibilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Diciembre 2014*.

SENER. (2014). *Prospectiva de Gas Natural y Gas L.P 2014-2028*.

SENER. (2016). *L.P. Gas Outlook 2016 - 2030*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/236867/LPGas_Outlook_2016-2030_P.compressed.pdf

Skovsgaard, L., & Jacobsen, H. K. (2017). Economies of scale in biogas production and the significance of flexible regulation. *Energy Policy*, *101*, 77–89. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.021

Stürmer, B. (2017). Feedstock change at biogas plants – Impact on production costs. *Biomass and Bioenergy*, *98*, 228–235. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.01.032

Svanberg, M., Finnsgård, C., Flodén, J., & Lundgren, J. (2017). Analyzing animal waste-to-energy supply chains: The case of horse manure. *Renewable Energy*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.002

Teymoori Hamzehkolaei, F., & Amjady, N. (2018). A techno-economic assessment for replacement of conventional fossil fuel based technologies in animal farms with biogas fueled CHP units. *Renewable Energy*, *118*, 602–614. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.054

Timonen, K., Sinkko, T., Luostarinen, S., Tampio, E., & Joensuu, K. (2019). LCA of anaerobic digestion: Emission allocation for energy and digestate. *Journal of Cleaner Production*, *235*, 1567–1579. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.06.085

Toledo-Cervantes, A., Estrada, J. M., Lebrero, R., & Muñoz, R. (2017). A comparative analysis of biogas upgrading technologies: Photosynthetic vs physical/chemical processes. *Algal Research*, *25*, 237–243. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.05.006

Topaloglou, N., Vladimirou, H., & Zenios, S. A. (2002). CVaR models with selective hedging for international asset allocation. *Journal of Banking & Finance*, *26*(7), 1535–1561. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-4266(02)00289-3

Tovar-Facio, J., Eljack, F., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2017). Optimal Design of Multiplant Cogeneration Systems with Uncertain Flaring and Venting. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *5*(1), 675–688. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02033

Tovar-Facio, J., Fuentes-Cortes, L. F., & Ponce-Ortega, J. M. (2019). Carbon Price Evaluation in Power Systems for Flaring Mitigation. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d7.0282

Ullah Khan, I., Hafiz Dzarfan Othman, M., Hashim, H., Matsuura, T., Ismail, A. F., Rezaei-DashtArzhandi, M., & Wan Azelee, I. (2017). Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage. *Energy Conversion and Management*, *150*, 277–294. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.08.035

Uryasev, S. (2000). Conditional value-at-risk: optimization algorithms and applications. *Proceedings of the IEEE/IAFE/INFORMS 2000 Conference on Computational Intelligence for Financial Engineering (CIFEr) (Cat. No.00TH8520)*, 49–57. https://doi.org/10.1109/CIFER.2000.844598

Vac, S.-C., Popita, G., Frunzeti, N., & Popovici, A. (2013). Evaluation of Greenhouse Gas Emission from Animal Manure Using the Closed Chamber Method for Gas Fluxes. In *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* (Vol. 41). https://doi.org/10.15835/nbha4129259

Wen, M., Han, Q., Yang, Y., & Kang, R. (2017). Uncertain optimization model for multi-echelon spare parts supply system. *Applied Soft Computing*, *56*, 646–654. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.07.057

Wheeler, J., Páez, M. A., Guillén-Gosálbez, G., & Mele, F. D. (2018). Combining multi-attribute decision-making methods with multi-objective optimization in the design of biomass supply chains. *Computers & Chemical Engineering*, *113*, 11–31. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.02.010

World Bank and Ecofys. (2018). State and trends of carbon pricing 2018 (May). *The World Bank, Washington, DC, USA*. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1292-7

World LP Gas Association. (2007). *LP Gas: An Energy Solution For A Low Carbon World*.

Wu, J., Wu, Z., Wu, F., Tang, H., & Mao, X. (2018). CVaR risk-based optimization framework for renewable energy management in distribution systems with DGs and EVs. *Energy*, *143*, 323–336. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.083

Xu, Xiaoyan, Xu, X., & He, P. (2016). Joint production and pricing decisions for multiple products with cap-and-trade and carbon tax regulations. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 4093–4106. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.08.081

Xu, Xinsheng, Meng, Z., & Shen, R. (2015). A cooperation model based on CVaR measure for a two-stage supply chain. *International Journal of Systems Science*, *46*(10), 1865–1873. https://doi.org/10.1080/00207721.2013.837543

Yasar, A., Nazir, S., Rasheed, R., Tabinda, A. B., & Nazar, M. (2017). Economic review of different

designs of biogas plants at household level in Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *74*, 221–229. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.128

Yu, M., Cruz, J. M., & Li, D. "Michelle." (2018). The sustainable supply chain network competition with environmental tax policies. *International Journal of Production Economics*. https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2018.08.005

Zaefferer, M., Gaida, D., & Bartz-Beielstein, T. (2016). Multi-fidelity modeling and optimization of biogas plants. *Applied Soft Computing*, *48*, 13–28. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.05.047

Zakeri, A., Dehghanian, F., Fahimnia, B., & Sarkis, J. (2015). Carbon pricing versus emissions trading: A supply chain planning perspective. *International Journal of Production Economics*, *164*, 197–205. https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2014.11.012

Zavala, V. M., & Flores-Tlacuahuac, A. (2012). Stability of multiobjective predictive control: A utopia-tracking approach. *Automatica*, *48*(10), 2627–2632. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.06.066

Zhang, B., & Chen, B. (2017). Sustainability accounting of a household biogas project based on emergy. *Applied Energy*, *194*, 819–831. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.05.141

Zhang, F., Johnson, D., Johnson, M., Watkins, D., Froese, R., & Wang, J. (2016). Decision support system integrating GIS with simulation and optimisation for a biofuel supply chain. *Renewable Energy*, *85*, 740–748. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.041

Zhang, Q., Hu, J., & Lee, D.-J. (2016). Biogas from anaerobic digestion processes: Research updates. *Renewable Energy*, *98*, 108–119. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.029

Zhang, Y., & Jiang, Y. (2017). Robust optimization on sustainable biodiesel supply chain produced from waste cooking oil under price uncertainty. *Waste Management*, *60*, 329–339. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.004

# ANEXOS

A continuación, se presenta información complementaria para la comprensión del trabajo presentado.

# A.1 Modelo de la cadena de suministro (multi escenario)

*A.1.1 Balances de masa y restricciones*

**Disponibilidad de biomasa antes de procesarla**

$$\sum_{l} F^{Bm}_{i,f,l,t,s} \leq \vartheta^{Bm}_{i,f,t,s} \qquad \forall\, (i \in I, f \in F, t \in T, s \in S) \tag{1}$$

**Balances de masa después de procesar la biomasa**

$$F^{Bm_Total}_{i,l,t,s} = \sum_{f} F^{Bm}_{i,f,l,t,s} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, t \in T, s \in S) \tag{2}$$

$$F^{Bm_Total}_{i,l,t,s} = \sum_{j} F^{Bm_conv}_{i,l,j,t,s} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, t \in T, s \in S) \tag{3}$$

.

**Balances de masa después de generar biogás**

$$F^{Bg_Total}_{i,l,t,s} = \sum_{j} F^{Bg}_{i,l,j,t,s} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, t \in T, s \in S) \tag{4}$$

$$F^{Bg_Total}_{i,l,t,s} = \sum_{m} F^{Bg}_{i,l,m,t,s} + \sum_{p} F^{Bg_dem}_{i,l,p,t,s} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, t \in T, s \in S) \tag{5}$$

$$F^{Fr_Total}_{i,l,t,s} = \sum_{j} F^{Fr}_{i,l,j,t,s} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, t \in T, s \in S) \tag{6}$$

$$F^{Fr_Total}_{i,l,t,s} = \sum_{q} F^{Fr_dem}_{i,l,q,t,s} \qquad \forall\, (i \in I, l \in L, t \in T, s \in S) \tag{7}$$

**Balances de masa antes de purificar biogás**

$$F^{Bg_conv_Total}_{i,m,t,s} = \sum_{l} F^{Bg}_{i,l,m,t,s} \qquad \forall\, (i \in I, m \in M, t \in T, s \in S) \tag{8}$$

$$F^{Bg_conv_Total}_{i,m,t,s} = \sum_{k} F^{Bg_conv}_{i,m,k,t,s} \qquad \forall\, (i \in I, m \in M, t \in T, s \in S) \tag{9}$$

**Balances de masa después de purificar biogás**

$$F^{Bgp_Total}_{k,m,t,s} = \sum_{i} F^{Bgp}_{i,m,k,t,s} \qquad \forall\, (k \in K, m \in M, t \in T, s \in S) \tag{10}$$

$$F_{k,m,t,s}^{Bgp_Total} = \sum_{p} F_{k,m,p,t,s}^{Bgp_dem} \qquad \forall (k \in K, m \in M, t \in T, s \in S) \tag{11}$$

**Balances en mercados**

$$F_{i,p,t,s}^{Bg_dem_Total} = \sum_{l} F_{i,l,p,t,s}^{Bg_dem} \qquad \forall (i \in I, p \in P, t \in T, s \in S) \tag{12}$$

$$F_{k,p,t,s}^{Bgp_dem_Total} = \sum_{m} F_{k,m,p,t,s}^{Bgp_dem} \qquad \forall (k \in K, p \in P, t \in T, s \in S) \tag{13}$$

$$F_{i,q,t,s}^{Fr_dem_Total} = \sum_{l} F_{i,l,q,t,s}^{Fr_dem} \qquad \forall (i \in I, q \in Q, t \in T, e \in S) \tag{14}$$

**Rendimiento de productos**

$$F_{i,l,j,t,s}^{Bg} = \chi_{i,j}^{Bg} \times F_{i,l,j,t,s}^{Bm_conv} \qquad \forall (i \in I, l \in L, j \in J, t \in T, s \in S) \tag{15}$$

$$F_{i,l,j,t,s}^{Fr} = \chi_{i,j}^{Fr} \times F_{i,l,j,t,s}^{Bm_conv} \qquad \forall (i \in I, l \in L, j \in J, t \in T, s \in S) \tag{16}$$

$$F_{i,m,k,t,s}^{Bgp} = \chi_{i,k}^{Bgp} \times F_{i,m,k,t,s}^{Bg_conv} \qquad \forall (i \in I, m \in M, k \in K, t \in T, s \in S) \tag{17}$$

**Capacidades de equipo**

$$\gamma_{j}^{Bg_min} \times y_{j,l} \leq \sum_{i} F_{i,l,j,t,s}^{Bg} \leq \gamma_{j}^{Bg_max} \times y_{j,l,s} \qquad \forall (l \in L, j \in J, t \in T, s \in S) \tag{18}$$

$$\gamma_{j}^{Fr_min} \times y_{j,l} \leq \sum_{i} F_{i,l,j,t,s}^{Fr} \leq \gamma_{j}^{Fr_max} \times y_{j,l,s} \qquad \forall (l \in L, j \in J, t \in T, s \in S) \tag{19}$$

$$\gamma_{k}^{Bgp_min} \times y_{k,m} \leq \sum_{i} F_{i,m,k,t,s}^{Bgp} \leq \gamma_{k}^{Bgp_max} \times y_{k,m,s} \qquad \forall (m \in M, k \in K, t \in T, s \in S) \tag{20}$$

**Mínima y máxima demanda de productos**

$$\eta_{a,p,t,s}^{Bg_min} \leq \sum_{i} \sum_{l} F_{i,l,p,t,s}^{Bg_{dem}} \leq \eta_{a,p,t,s}^{Bg_max} \qquad \forall (a \in A, p \in P, t \in T, s \in S) \tag{21}$$

$$\eta_{b,p,t,s}^{Bgp_min} \leq \sum_{k} \sum_{m} F_{k,m,p,t,s}^{Bgp_{dem}} \leq \eta_{b,p,t,s}^{Bgp_max} \qquad \forall (b \in B, p \in P, t \in T, s \in S) \tag{22}$$

$$\eta_{o,q,t,s}^{Fr_min} \leq \sum_{i}\sum_{l} F_{i,l,q,t,s}^{Fr_dem} - \sum_{i}\sum_{l}\sum_{j} F_{i,l,j,t,s}^{Fr_excess} \leq \eta_{o,q,t,s}^{Fr_max} \qquad \forall\, (o \in O, q \in Q, t \in T, s \in S) \tag{23}$$

**Existencia de tecnologías de producción y purificación**

$$\sum_{j} y_{j,l,s} = 1 \qquad \forall\, (l \in L\,, s \in S) \tag{24}$$

$$\sum_{k} y_{k,m,s} = 1 \qquad \forall\, (m \in M, s \in S) \tag{25}$$

*A1.2 Modelo económico*

**Ingresos asociados a la venta de productos**

$$BgRevenue_s = \sum_{i}\sum_{l}\sum_{p}\sum_{t} (R_{i,p,t}^{Bg} \times F_{i,l,p,t,s}^{Bg_dem}) \qquad \forall\, s \in S \tag{26}$$

$$PBgRevenue_s = \sum_{k}\sum_{m}\sum_{p}\sum_{t} \left(R_{k,p,t}^{Bgp} \times F_{k,m,p,t,s}^{Bgp_dem}\right) \qquad \forall\, s \in S \tag{27}$$

$$BioferRevenue_s = \sum_{i}\sum_{l}\sum_{q}\sum_{t} (R_{i,q,t}^{Fr} \times F_{i,l,q,t,s}^{Fr_dem}) \qquad \forall\, s \in S \tag{28}$$

**Costo asociado a la adquisición de la biomasa**

$$PurchBmCost_s = \sum_{i}\sum_{f}\sum_{l}\sum_{t} \left(C_{i,f,t}^{Bm} \times F_{i,f,l,t,s}^{Bm}\right) \qquad \forall\, s \in S \tag{29}$$

**Costos asociados al transporte de biomasa, biogás y fertilizante**

$$\begin{aligned} TransCost_s = & \sum_{i}\sum_{f}\sum_{l}\sum_{t} \left(C_{i,f,l,t}^{Trans,Bm} \times F_{i,f,l,t,s}^{Bm}\right) \\ & + \sum_{i}\sum_{l}\sum_{m}\sum_{t} \left(C_{i,l,m,t}^{Trans,Bg} \times F_{i,l,m,t,s}^{Bg}\right) \\ & + \sum_{i}\sum_{l}\sum_{p}\sum_{t} \left(C_{i,l,p,t}^{Trans,Bg} \times F_{i,l,p,t,s}^{Bg_dem}\right) \\ & + \sum_{k}\sum_{m}\sum_{p}\sum_{t} \left(C_{k,m,p,t}^{Trans,Bgp} \times F_{k,m,p,t,s}^{Bgp_dem}\right) \\ & + \sum_{i}\sum_{l}\sum_{q}\sum_{t} \left(C_{i,l,q,t}^{Trans,Fr} \times F_{i,l,q,t,s}^{Fr_dem}\right) \qquad \forall\, s \in S \end{aligned} \tag{30}$$

**Costos fijos asociados a las tecnologías de producción y purificación**

$$FixedCost_s = \sum_j \sum_l \sum_t \left(K_{j,t} \times C_{j,l}^{Fix,Prod_tech} \times y_{j,l}\right) + \sum_k \sum_m \sum_t \left(K_{k,t} \times C_{k,m}^{Fix,Pur_tech} \times y_{k,m}\right) \quad \forall s \in S \tag{31}$$

$$K_{j,t} = \left[\frac{\left(1+\alpha_j\right)^N \times \alpha_j}{\left(1+\alpha_j\right)^N - 1}\right];\ K_{k,t} = \left[\frac{(1+\alpha_k)^N \times \alpha_k}{(1+\alpha_k)^N - 1}\right] \quad \forall (j \in J, k \in K, t \in T) \tag{32}$$

**Costos variables asociados a las tecnologías de producción y purificación**

$$VarCost_s = \sum_i \sum_l \sum_j \sum_t \left(C_{l,j,t}^{Var,Prod_tech} \times F_{i,l,j,t,s}^{Bm_conv}\right) + \sum_i \sum_m \sum_k \sum_t \left(C_{m,k,t}^{Var,Pur_tech} \times F_{i,m,k,t,s}^{Bg_conv}\right) \quad \forall s \in S \tag{33}$$

*A1.3 Modelo ambiental*

**Emisiones asociadas al transporte de biomasa y productos**

$$\begin{aligned} TransEmissions_s = & \sum_i \sum_f \sum_l \sum_t \left(E_{i,f,l}^{Trans,Bm} \times F_{i,f,l,t,s}^{Bm}\right) \\ & + \sum_i \sum_l \sum_m \sum_t \left(E_{i,l,m}^{Trans,Bg} \times F_{i,l,m,t,s}^{Bg}\right) \\ & + \sum_i \sum_l \sum_p \sum_t \left(E_{i,l,p}^{Trans,Bg} \times F_{i,l,p,t,s}^{Bg_dem}\right) \\ & + \sum_k \sum_m \sum_p \sum_t \left(E_{k,m,p}^{Trans,Bgp} \times F_{k,m,p,t,s}^{Bgp_dem}\right) \\ & + \sum_i \sum_l \sum_q \sum_t \left(E_{i,l,q}^{Trans,Fr} \times F_{i,l,q,t,s}^{Fr_dem}\right) \quad \forall s \in S \end{aligned} \tag{34}$$

**Emisiones a asociadas a la conversión de biomasa y biogás**

$$\begin{aligned} ConvEmissions_s = & \sum_i \sum_l \sum_j \sum_t \left(E_{i,j}^{Bm_conv} \times F_{i,l,j,t,s}^{Bm_conv}\right) \\ & + \sum_i \sum_m \sum_k \sum_t \left(E_{i,k}^{Bg_conv} \times F_{i,m,k,t,s}^{Bg_conv}\right) \quad \forall s \in S \end{aligned} \tag{35}$$

**Emisiones asociadas al uso final de productos**

$$UseEmissions_s = \sum_i \sum_l \sum_p \sum_t \left(E_i^{Use,Bg} \times F_{i,l,p,t,s}^{Bg_dem}\right) + \sum_k \sum_m \sum_p \sum_t \left(E_k^{Use,Bgp} \times F_{k,m,p,t,s}^{Bgp_dem}\right) + \sum_i \sum_l \sum_q \sum_t \left(E_i^{Use,Fr} \times F_{i,l,q,t,s}^{Fr_dem}\right) \quad \forall s \in S \tag{36}$$

*A1.4 Funciones objetivo*

**Beneficio Total**

$$TotalProfit_s = BgRevenue_s + PBgRevenue_s + BioferRevenue_s - (PurchBmCost_s + TransCost_s + FixedCost_s + VarCost_s) \quad \forall s \in S \tag{37}$$

**Emisiones Totales**

$$TotalEmission_s = TransEmissions_s + ConvEmissions_s + UseEmissions_s \quad \forall s \in S \tag{38}$$

**Funciones objetivo**

$$Objetivefuntions = \left\{ \text{Max.} \frac{1}{S} \sum_s TotalProfit_s \,;\, \text{Min.} \frac{1}{S} \sum_s TotalEmission_s \right\} \tag{39a}$$

s.t. (1) to (38) (39b)

# A2. DATOS MODELO DETERMINISTA

**Tabla A2.1.** Distancia entre ciudad/localidad para el modelo.

| Ciudad/Localidad (km) | Ciudades donde se puede instalar una planta de biogás | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | MOREL | LAPIE | LEON | GUADA | ARAND | SANME |
| AGUIL | 270 | 266 | 462 | 342 | 314 | 347 |
| APATZ | 187 | 251 | 379 | 366 | 332 | 365 |
| ARTEA | 279 | 343 | 614 | 458 | 425 | 458 |
| COALC | 327 | 297 | 520 | 320 | 344 | 443 |
| COTIJ | 249 | 128 | 244 | 180 | 210 | 185 |
| LAHUA | 149 | 265 | 341 | 380 | 152 | 380 |
| HUETA | 206 | 375 | 401 | 490 | 457 | 504 |
| MOREL | 0 | 175 | 199 | 289 | 255 | 302 |
| LAPIE | 175 | 0 | 113 | 169 | 79.3 | 146 |
| PURUA | 94.7 | 90 | 158 | 236 | 159 | 236 |
| TANHU | 172 | 37.9 | 142 | 127 | 93.6 | 127 |
| TEPAL | 232 | 223 | 446 | 265 | 271 | 304 |
| ZAMOR | 174 | 52.7 | 52.7 | 168 | 134 | 167 |
| ABASO | 165 | 68.7 | 68.7 | 217 | 126 | 209 |
| SANMI | 188 | 201 | 121 | 339 | 232 | 231 |
| MANUE | 220 | 57.3 | 57.2 | 208 | 59.2 | 95.1 |
| DOLOR | 203 | 206 | 110 | 328 | 215 | 220 |
| LEON | 197 | 113 | 0 | 221 | 98.5 | 114 |
| PENJA | 184 | 48.1 | 126 | 179 | 106 | 166 |
| PURIS | 232 | 78.4 | 39.9 | 190 | 60.6 | 77.8 |
| SALVA | 92 | 198 | 168 | 332 | 229 | 271 |
| SANFE | 230 | 210 | 99 | 295 | 204 | 187 |
| SANLU | 279 | 292 | 174 | 394 | 279 | 287 |
| SILAO | 166 | 146 | 34.6 | 252 | 139 | 145 |
| VALLE | 88 | 124 | 110 | 272 | 157 | 213 |
| YURIR | 63.7 | 189 | 146 | 303 | 207 | 250 |
| ACATI | 295 | 174 | 170 | 60.9 | 78.6 | 75.5 |
| ARAND | 253 | 79.6 | 97.2 | 129 | 0 | 57.9 |
| ATOTO | 217 | 69.7 | 142 | 96.7 | 42.5 | 75.5 |
| LABAR | 194 | 72.7 | 169 | 102 | 68.9 | 102 |
| DEGOL | 194 | 19.5 | 128 | 161 | 60.7 | 128 |
| ENCAR | 272 | 180 | 83.1 | 176 | 108 | 68.7 |
| GUADA | 287 | 166 | 219 | 0 | 128 | 125 |
| JESUS | 258 | 63.5 | 113 | 154 | 22.5 | 82.6 |
| SANME | 287 | 146 | 84.9 | 123 | 56.7 | 0 |
| TAMAZ | 328 | 207 | 381 | 164 | 203 | 286 |
| TEPAT | 270 | 123 | 151 | 75.6 | 58.1 | 55.5 |
| TOMAT | 662 | 541 | 594 | 377 | 503 | 500 |
| ZAPOP | 294 | 173 | 226 | 10.5 | 135 | 132 |
| ZAPOT | 269 | 148 | 190 | 35.4 | 98.5 | 95.5 |

**Table A2.2.** Disponibilidad de biomasa para la región geográfica seleccionada como caso de estudio

| | Ciudad | Excretas | kg/mes Residuos Orgánicos | Aguas Residuales |
|---|---|---|---|---|
| MICHOACÁN DE OCAMPO | AGUILILLA | 8732340 | 225000 | 0 |
| | APATZINGÁN | 6159330 | 2700000 | 0 |
| | ARTEAGA | 11132610 | 210000 | 0 |
| | COALCOMÁN DE VÁZQUEZ PALLARES | 10339320 | 210000 | 13478400 |
| | COTIJA | 3154410 | 210000 | 12960000 |
| | LA HUACANA | 7260330 | 225000 | 16588800 |
| | HUETAMO | 12624600 | 450000 | 0 |
| | MORELIA | 3838560 | 2100000 | 623790720 |
| | LA PIEDAD | 3428220 | 1500000 | 103420800 |
| | PURUÁNDIRO | 3072600 | 480000 | 0 |
| | TANHUATO | 17134050 | 180000 | 0 |
| | TEPALCATEPEC | 6769830 | 540000 | 0 |
| | ZAMORA | 1544010 | 2550000 | 144633600 |
| GUANAJUATO | ABASOLO | 3971100 | 450000 | 31622400 |
| | SAN MIGUEL DE ALLENDE | 8532750 | 1350000 | 46656000 |
| | MANUEL DOBLADO | 6664950 | 255000 | 9072000 |
| | DOLORES HIDALGO CUNA DE LA INDEPENDENCIA NAL. | 11913690 | 1050000 | 45100800 |
| | LEÓN | 10622640 | 14595000 | 813006720 |
| | PÉNJAMO | 8624940 | 2955000 | 570240 |
| | PURÍSIMA DEL RINCÓN | 3556890 | 73950 | 0 |
| | SALVATIERRA | 7106250 | 900000 | 20736000 |
| | SAN FELIPE | 14414430 | 900000 | 51425280 |
| | SAN LUIS DE LA PAZ | 10578780 | 975000 | 42042240 |
| | SILAO | 3714510 | 1776600 | 55676160 |
| | VALLE DE SANTIAGO | 3370950 | 1800000 | 28512000 |
| | YURIRIA | 2104500 | 420000 | 31104000 |
| JALISCO | ACATIC | 15432300 | 375000 | 18144000 |
| | ARANDAS | 11460090 | 1050000 | 52358400 |
| | ATOTONILCO EL ALTO | 5855550 | 507600 | 35251200 |
| | LA BARCA | 3034860 | 1200000 | 0 |
| | DEGOLLADO | 6258390 | 330000 | 0 |
| | ENCARNACIÓN DE DÍAZ | 18311790 | 405000 | 0 |
| | GUDALAJARA | 56310 | 28483950 | 41472000 |
| | JESÚS MARÍA | 4366020 | 345000 | 2073600 |
| | SAN MIGUEL EL ALTO | 17818620 | 300000 | 4665600 |
| | TAMAZULA DE GORDIANO | 6418080 | 487200 | 0 |
| | TEPATITLÁN DE MORELOS | 19803300 | 1800000 | 123379200 |
| | TOMATLÁN | 20470470 | 450000 | 22291200 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| ZAPOPAN | 5460570 | 22387650 | 3209155200 |
| ZAPOTLANEJO | 8675910 | 795000 | 18144000 |

**Table A3.3.** Posible demanda de biogás no purificado para la región geográfica seleccionada como caso de estudio.

| Fracción | 0.59 | 0.15 | 0.14 | 0.1 | 0.02 |
|---|---|---|---|---|---|
| $Nm^3$/mes | RESIDENCIAL | SERVICIOS | TRANSPORTE | INDUSTRIAL | AGRICULTURA |
| AGUILILLA | 389.164595 | 98.9401513 | 92.3441412 | 65.9601009 | 13.1920202 |
| APATZINGÁN | 3274.74308 | 832.561801 | 777.057681 | 555.041201 | 111.00824 |
| ARTEAGA | 565.273001 | 143.713475 | 134.132577 | 95.8089832 | 19.1617966 |
| COALCOMÁN DE VÁZQUEZ PALLARES | 470.950187 | 119.733098 | 111.750892 | 79.8220655 | 15.9644131 |
| COTIJA | 485.606737 | 123.45934 | 115.228717 | 82.3062265 | 16.4612453 |
| LA HUACANA | 874.362787 | 222.295624 | 207.475916 | 148.197083 | 29.6394165 |
| HUETAMO | 1042.24923 | 264.978617 | 247.313376 | 176.652411 | 35.3304822 |
| MORELIA | 20038.5168 | 5094.53817 | 4754.90229 | 3396.35878 | 679.271756 |
| LA PIEDAD | 2647.933 | 673.203305 | 628.323085 | 448.802203 | 89.7604407 |
| PURUÁNDIRO | 401.012399 | 101.952305 | 95.1554844 | 67.9682032 | 13.5936406 |
| TANHUATO | 391.998876 | 99.6607311 | 93.0166824 | 66.4404874 | 13.2880975 |
| TEPALCATEPEC | 608.783038 | 154.775349 | 144.456992 | 103.183566 | 20.6367131 |
| ZAMORA | 5009.98667 | 1273.72543 | 1188.8104 | 849.150284 | 169.830057 |
| ABASOLO | 2565.62461 | 652.277443 | 608.79228 | 434.851629 | 86.9703257 |
| SAN MIGUEL DE ALLENDE | 4845.81326 | 1231.98642 | 1149.85399 | 821.324281 | 164.264856 |
| MANUEL DOBLADO | 1094.93719 | 278.373862 | 259.815604 | 185.582574 | 37.1165149 |
| DOLORES HIDALGO CUNA DE LA INDEPENDENCIA NAL. | 4289.09612 | 1090.44817 | 1017.75162 | 726.965444 | 145.393089 |
| LEÓN | 44512.163 | 11316.6516 | 10562.2082 | 7544.43441 | 1508.88688 |
| PÉNJAMO | 4245.5885 | 1079.38691 | 1007.42778 | 719.591271 | 143.918254 |
| PURÍSIMA DEL RINCÓN | 2250.0463 | 572.045669 | 533.909291 | 381.363779 | 76.2727558 |
| SALVATIERRA | 2830.7025 | 719.670126 | 671.692118 | 479.780084 | 95.9560168 |
| SAN FELIPE | 3189.30909 | 810.841293 | 756.785207 | 540.560862 | 108.112172 |
| SAN LUIS DE LA PAZ | 3412.57116 | 867.602836 | 809.762647 | 578.401891 | 115.680378 |
| SILAO | 5345.17815 | 1358.9436 | 1268.34736 | 905.962399 | 181.19248 |
| VALLE DE SANTIAGO | 4022.89036 | 1022.76874 | 954.584154 | 681.845824 | 136.369165 |
| YURIRIA | 1967.09165 | 500.108047 | 466.767511 | 333.405365 | 66.681073 |
| ACATIC | 697.154952 | 177.242784 | 165.426599 | 118.161856 | 23.6323713 |
| ARANDAS | 2497.06462 | 634.846937 | 592.523808 | 423.231292 | 84.6462583 |
| ATOTONILCO EL ALTO | 1958.38047 | 497.89334 | 464.70045 | 331.928893 | 66.3857786 |
| LA BARCA | 2106.52185 | 535.556402 | 499.852642 | 357.037601 | 71.4075203 |
| DEGOLLADO | 695.50354 | 176.822934 | 165.034738 | 117.881956 | 23.5763912 |
| ENCARNACIÓN DE DÍAZ | 1734.14461 | 440.884223 | 411.491941 | 293.922815 | 58.7845631 |
| GUDALAJARA | 47280.5113 | 12020.469 | 11219.1044 | 8013.64599 | 1602.7292 |
| JESÚS MARÍA | 630.418475 | 160.275883 | 149.590825 | 106.850589 | 21.3701178 |
| SAN MIGUEL EL ALTO | 1067.26555 | 271.338698 | 253.249452 | 180.892466 | 36.1784931 |
| TAMAZULA DE GORDIANO | 1243.28665 | 316.089826 | 295.017171 | 210.726551 | 42.1453101 |
| TEPATITLÁN DE MORELOS | 4576.09531 | 1163.41406 | 1085.85313 | 775.609375 | 155.121875 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| TOMATLÁN | 1160.00367 | 294.916187 | 275.255108 | 196.610791 | 39.3221583 |
| ZAPOPAN | 43139.806 | 10967.7473 | 10236.5641 | 7311.83152 | 1462.3663 |
| ZAPOTLANEJO | 2218.68835 | 564.073309 | 526.468422 | 376.048873 | 75.2097745 |

**Table A2.4.** Posible demanda de biogás purificado para la región geográfica seleccionada como caso de estudio.

| Fracción | 0.59 | 0.15 | 0.14 | 0.1 | 0.02 |
|---|---|---|---|---|---|
| $Nm^3$/mes | RESIDENCIAL | SERVICIOS | TRANSPORTE | INDUSTRIAL | AGRICULTURA |
| AGUILILLA | 232.937462 | 59.2213887 | 55.2732961 | 39.4809258 | 7.89618515 |
| APATZINGÁN | 1960.12266 | 498.33627 | 465.113852 | 332.22418 | 66.444836 |
| ARTEAGA | 338.348503 | 86.0208059 | 80.2860855 | 57.3472039 | 11.4694408 |
| COALCOMÁN DE VÁZQUEZ PALLARES | 281.890857 | 71.667167 | 66.8893559 | 47.7781113 | 9.55562227 |
| COTIJA | 290.663648 | 73.8975375 | 68.971035 | 49.265025 | 9.853005 |
| LA HUACANA | 523.356572 | 133.056756 | 124.186305 | 88.7045037 | 17.7409007 |
| HUETAMO | 623.846291 | 158.604989 | 148.031323 | 105.73666 | 21.1473319 |
| MORELIA | 11994.2084 | 3049.37501 | 2846.08334 | 2032.91667 | 406.583334 |
| LA PIEDAD | 1584.94067 | 402.951017 | 376.087616 | 268.634011 | 53.7268022 |
| PURUÁNDIRO | 240.029056 | 61.0243363 | 56.9560472 | 40.6828908 | 8.13657817 |
| TANHUATO | 234.633942 | 59.6526972 | 55.6758508 | 39.7684648 | 7.95369297 |
| TEPALCATEPEC | 364.39177 | 92.6419755 | 86.4658438 | 61.761317 | 12.3522634 |
| ZAMORA | 2998.76606 | 762.398151 | 711.571608 | 508.265434 | 101.653087 |
| ABASOLO | 1535.67434 | 390.425681 | 364.397302 | 260.283787 | 52.0567575 |
| SAN MIGUEL DE ALLENDE | 2900.4988 | 737.414949 | 688.253953 | 491.609966 | 98.3219932 |
| MANUEL DOBLADO | 655.383077 | 166.622816 | 155.514628 | 111.081877 | 22.2163755 |
| DOLORES HIDALGO CUNA DE LA INDEPENDENCIA NAL. | 2567.27148 | 652.696138 | 609.183062 | 435.130759 | 87.0261517 |
| LEÓN | 26643.0976 | 6773.66888 | 6322.09095 | 4515.77925 | 903.15585 |
| PÉNJAMO | 2541.22965 | 646.075335 | 603.003646 | 430.71689 | 86.1433781 |
| PURÍSIMA DEL RINCÓN | 1346.78252 | 342.402335 | 319.575513 | 228.268224 | 45.6536447 |
| SALVATIERRA | 1694.33875 | 430.76409 | 402.046484 | 287.17606 | 57.435212 |
| SAN FELIPE | 1908.98549 | 485.335293 | 452.979607 | 323.556862 | 64.7113724 |
| SAN LUIS DE LA PAZ | 2042.62072 | 519.310351 | 484.689661 | 346.206901 | 69.2413802 |
| SILAO | 3199.3975 | 813.406144 | 759.179068 | 542.270763 | 108.454153 |
| VALLE DE SANTIAGO | 2407.93197 | 612.186095 | 571.373688 | 408.124063 | 81.6248126 |
| YURIRIA | 1177.41784 | 299.343519 | 279.387284 | 199.562346 | 39.9124692 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ACATIC | 417.287459 | 106.090032 | 99.0173632 | 70.726688 | 14.1453376 |
| ARANDAS | 1494.63724 | 379.992518 | 354.659683 | 253.328345 | 50.665669 |
| ATOTONILCO EL ALTO | 1172.20369 | 298.017888 | 278.150029 | 198.678592 | 39.7357184 |
| LA BARCA | 1260.87486 | 320.561404 | 299.190644 | 213.707603 | 42.7415206 |
| DEGOLLADO | 416.298994 | 105.838727 | 98.7828121 | 70.5591515 | 14.1118303 |
| ENCARNACIÓN DE DÍAZ | 1037.9856 | 263.894643 | 246.301667 | 175.929762 | 35.1859524 |
| GUDALAJARA | 28300.1138 | 7194.94417 | 6715.28123 | 4796.62945 | 959.32589 |
| JESÚS MARÍA | 377.341827 | 95.9343629 | 89.5387387 | 63.9562419 | 12.7912484 |
| SAN MIGUEL EL ALTO | 638.820003 | 162.411865 | 151.584407 | 108.274577 | 21.6549153 |
| TAMAZULA DE GORDIANO | 744.178787 | 189.197997 | 176.584797 | 126.131998 | 25.2263996 |
| TEPATITLÁN DE MORELOS | 2739.05705 | 696.370437 | 649.945741 | 464.246958 | 92.8493916 |
| TOMATLÁN | 694.329119 | 176.524352 | 164.756062 | 117.682902 | 23.5365803 |
| ZAPOPAN | 25821.6627 | 6564.8295 | 6127.1742 | 4376.553 | 875.3106 |
| ZAPOTLANEJO | 1328.01298 | 337.630418 | 315.121724 | 225.086945 | 45.0173891 |

**Table A2.5**. Demanda de biofertilizante para el caso de estudio.

| Ciudad/Localidad | Area de cultivo (hectareas) | Fertilizante (ton/mes) |
|---|---|---|
| AGUILILLA | 8872 | 61.79 |
| APATZINGÁN | 12695 | 88.41 |
| ARTEAGA | 5201 | 36.22 |
| COALCOMÁN DE VÁZQUEZ PALLARES | 5956 | 41.48 |
| COTIJA | 2813 | 19.59 |
| LA HUACANA | 11567 | 80.55 |
| HUETAMO | 12550 | 87.40 |
| MORELIA | 9289 | 64.69 |
| LA PIEDAD | 5153 | 35.89 |
| PURUÁNDIRO | 22160 | 154.33 |
| TANHUATO | 12138 | 84.53 |
| TEPALCATEPEC | 23049 | 160.52 |
| ZAMORA | 11154 | 77.68 |
| ABASOLO | 35054 | 244.12 |
| SAN MIGUEL DE ALLENDE | 15979 | 111.28 |
| MANUEL DOBLADO | 19869 | 138.37 |
| DOLORES HIDALGO CUNA DE LA INDEPENDENCIA NAL. | 16743 | 116.60 |
| LEÓN | 17186 | 119.69 |
| PÉNJAMO | 67750 | 471.82 |
| PURÍSIMA DEL RINCÓN | 10083 | 70.22 |

| | | |
|---|---|---|
| SALVATIERRA | 16578 | 115.45 |
| SAN FELIPE | 42034 | 292.73 |
| SAN LUIS DE LA PAZ | 12265 | 85.42 |
| SILAO | 10226 | 71.22 |
| VALLE DE SANTIAGO | 39090 | 272.23 |
| YURIRIA | 13779 | 95.96 |
| ACATIC | 7970 | 55.50 |
| ARANDAS | 14526 | 101.16 |
| ATOTONILCO EL ALTO | 16281 | 113.38 |
| LA BARCA | 38341 | 267.01 |
| DEGOLLADO | 7855 | 54.70 |
| ENCARNACIÓN DE DÍAZ | 22945 | 159.79 |
| GUDALAJARA | 0 | 0.00 |
| JESÚS MARÍA | 9995 | 69.61 |
| SAN MIGUEL EL ALTO | 5329 | 37.11 |
| TAMAZULA DE GORDIANO | 10699 | 74.51 |
| TEPATITLÁN DE MORELOS | 19728 | 137.39 |
| TOMATLÁN | 9963 | 69.38 |
| ZAPOPAN | 7263 | 50.58 |
| ZAPOTLANEJO | 8023 | 55.87 |

# A3. DATOS MODELO ESTOCÁSTICO

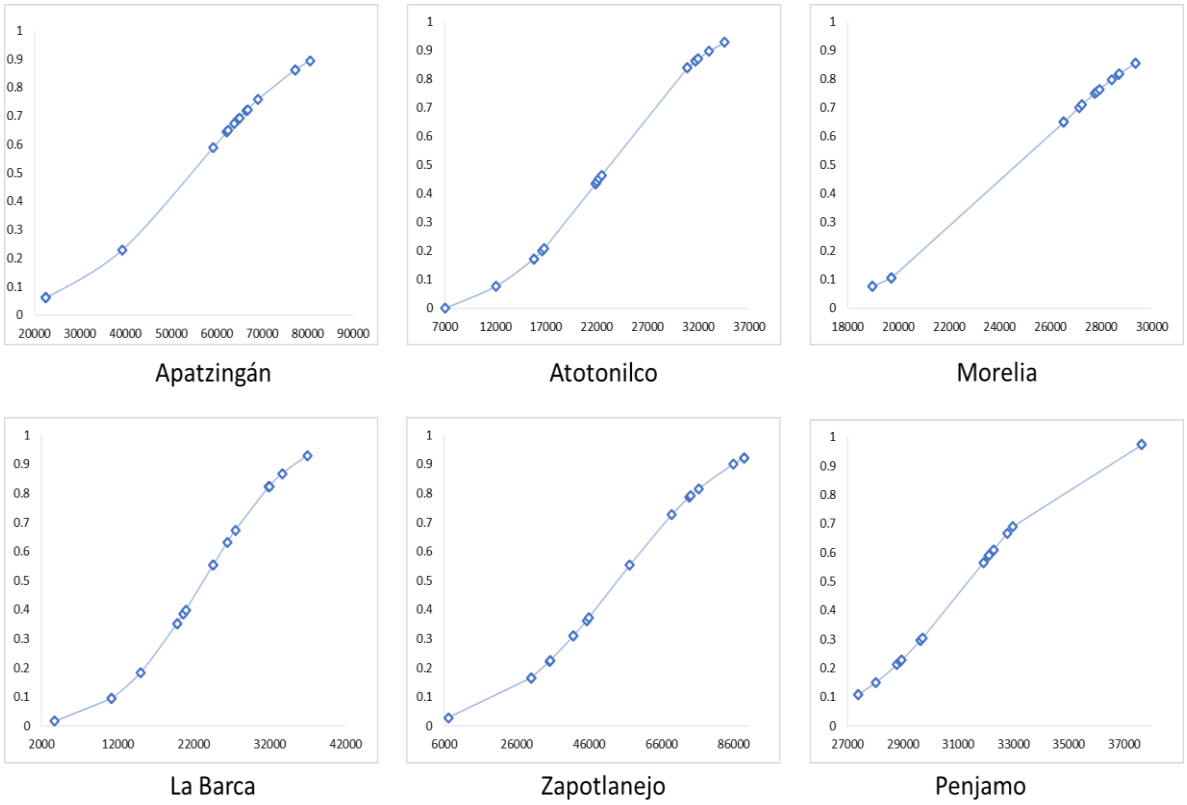



**Fig. A3.1.** Comportamiento de los datos históricos de la disponibilidad de biomasa.

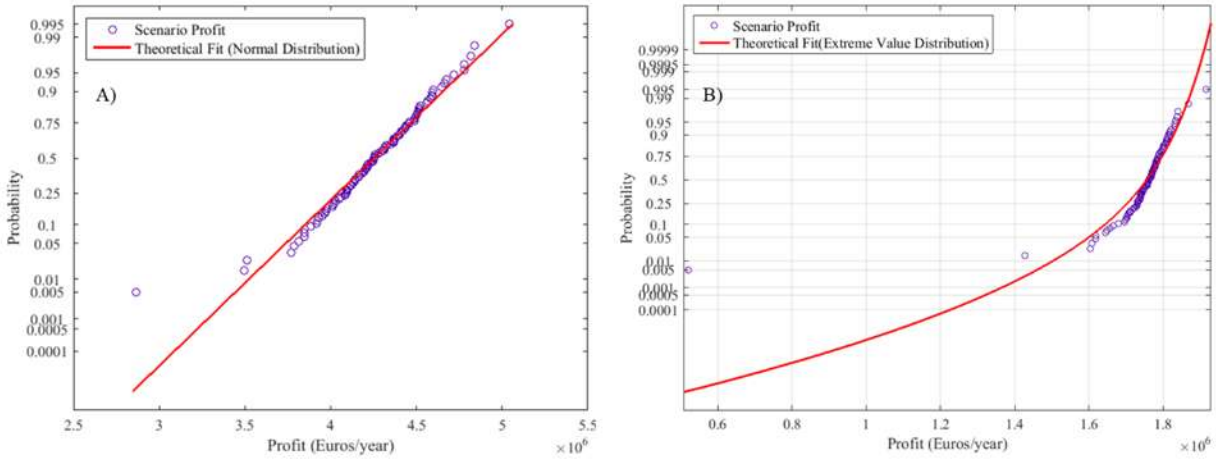



**Fig. A3.2.** Probabilidad específica de escenarios minimzando la insatisfacción para el beneficio: A) Caso A y B) Caso B

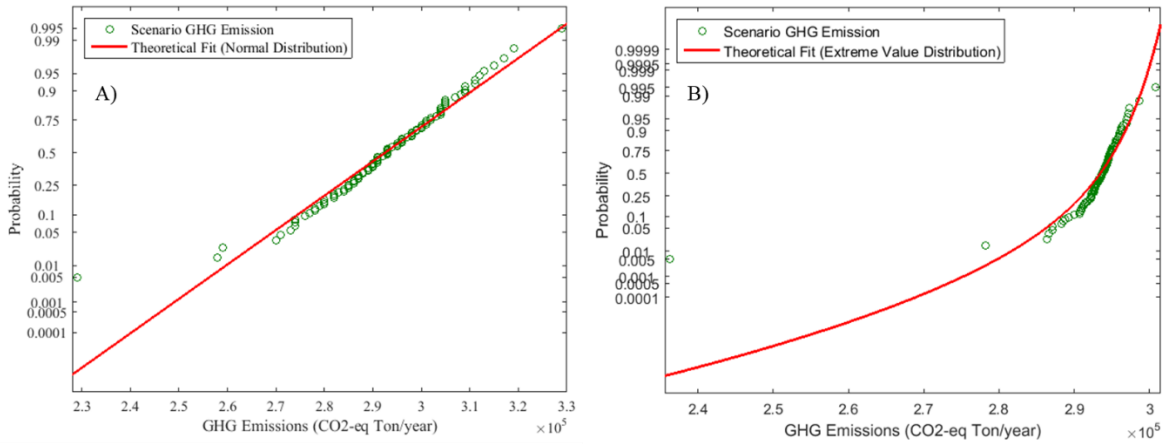



**Fig. A3.3.** Probabilidad específica de escenarios minimizando la insatisfacción por las emisiones de GEI: A) Caso A y B) Caso B

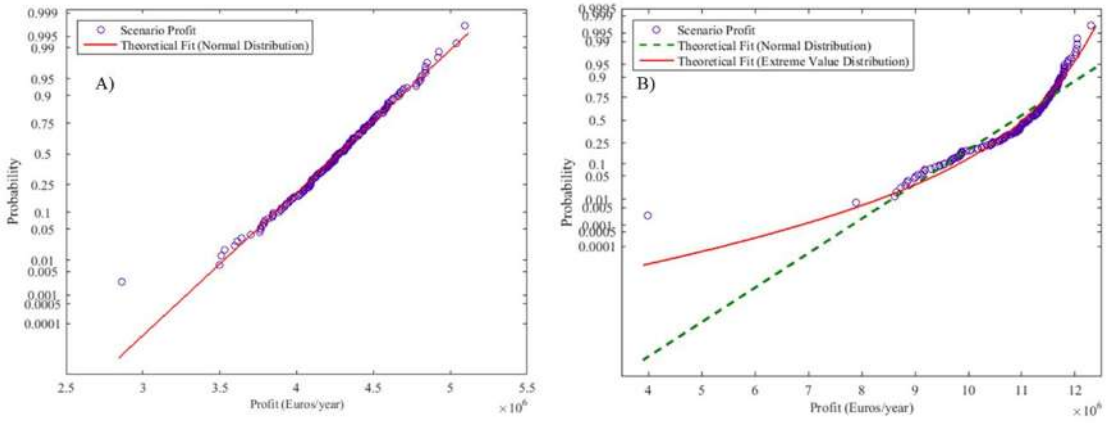



**Fig. A3.4.** Probabilidad específica de escenarios minimizando la función objetivo para obtener los mayores valores de beneficio: A) Caso A y B) Caso B

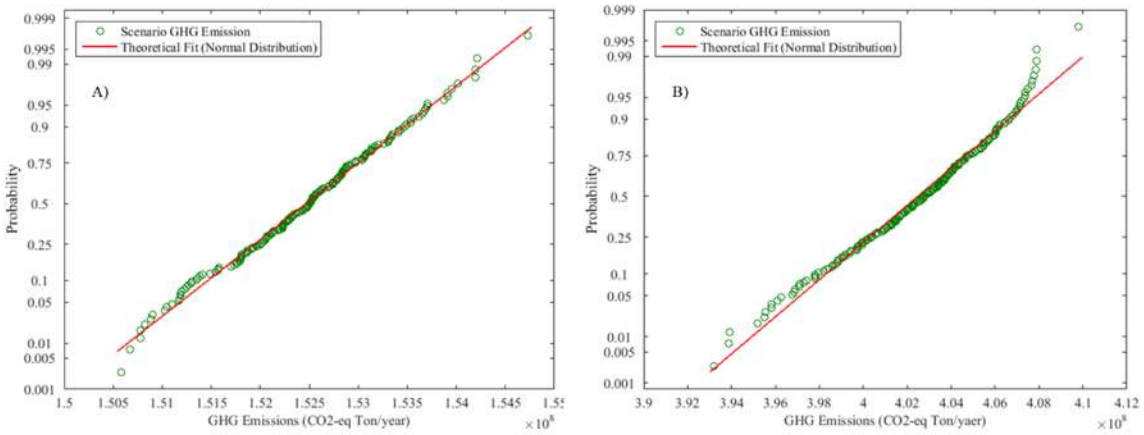



**Fig. A3.5.** Probabilidad específica de escenarios minimizando la función objetivo para obtener los mayores valores de emisión de GEI: A) Caso A y B) Caso B

**Table A3.1.** Parámetros estadísticos (desviación estándar) para la biomasa

| | Ton/mes | Excretas | % DE | Residuos Orgánicos | %DE | Aguas Residuales | % DE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Michoacán | AGUILILLA | 11146.57 | 27.04 | 206.25 | 38.20 | 0.00 | 30.00 |
| | APATZINGÁN | 13064.35 | 34.94 | 2962.50 | 13.32 | 0.00 | 30.00 |
| | ARTEAGA | 15069.20 | 23.08 | 382.50 | 30.00 | 0.00 | 30.00 |
| | COALCOMÁN DE VÁZQUEZ PALLARES | 11537.15 | 30.69 | 345.00 | 30.00 | 13478.40 | 30.00 |
| | COTIJA | 4567.29 | 22.43 | 350.18 | 30.00 | 12960.00 | 30.00 |
| | LA HUACANA | 15459.95 | 34.46 | 270.00 | 26.06 | 16588.80 | 30.00 |
| | HUETAMO | 16008.21 | 21.55 | 480.00 | 11.12 | 0.00 | 30.00 |
| | MORELIA | 5825.68 | 16.82 | 19595.85 | 13.09 | 623790.72 | 30.00 |
| | LA PIEDAD | 2803.70 | 26.12 | 1762.50 | 12.77 | 103420.80 | 30.00 |
| | PURUÁNDIRO | 3959.88 | 10.65 | 690.00 | 35.14 | 0.00 | 30.00 |
| | TANHUATO | 17000.00 | 35.00 | 187.50 | 8.00 | 0.00 | 30.00 |
| | TEPALCATEPEC | 14022.53 | 34.32 | 498.75 | 16.54 | 0.00 | 30.00 |
| | ZAMORA | 2896.26 | 22.63 | 2625.00 | 3.30 | 144633.60 | 30.00 |
| Guanajuato | ABASOLO | 3674.34 | 10.94 | 623.59 | 20.32 | 31622.40 | 30.00 |
| | SAN MIGUEL DE ALLENDE | 7149.23 | 20.94 | 1289.70 | 10.13 | 46656.00 | 30.00 |
| | MANUEL DOBLADO | 5765.55 | 20.61 | 351.38 | 29.26 | 9072.00 | 30.00 |
| | DOLORES HIDALGO CUNA DE LA INDEPENDENCIA NAL. | 6887.62 | 31.30 | 1200.00 | 10.21 | 45100.80 | 30.00 |
| | LEÓN | 15611.22 | 26.85 | 16860.83 | 11.95 | 813006.72 | 30.00 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | PÉNJAMO | 6786.93 | 27.13 | 1995.00 | 35.07 | 570.24 | 30.00 |
| | PURÍSIMA DEL RINCÓN | 3951.14 | 21.63 | 670.84 | 35.00 | 0.00 | 30.00 |
| | SALVATIERRA | 5266.51 | 35.00 | 904.13 | 20.00 | 20736.00 | 30.00 |
| | SAN FELIPE | 14000.00 | 35.00 | 785.93 | 31.05 | 51425.28 | 30.00 |
| | SAN LUIS DE LA PAZ | 8643.46 | 22.87 | 931.43 | 13.05 | 42042.24 | 30.00 |
| | SILAO | 7393.51 | 33.04 | 1906.65 | 12.02 | 55676.16 | 30.00 |
| | VALLE DE SANTIAGO | 5252.83 | 24.46 | 1654.20 | 9.70 | 28512.00 | 30.00 |
| | YURIRIA | 3765.24 | 29.01 | 438.23 | 4.80 | 31104.00 | 30.00 |
| Jalisco | ACATIC | 15400.00 | 25.00 | 341.47 | 30.00 | 18144.00 | 30.00 |
| | ARANDAS | 18158.95 | 33.90 | 1087.50 | 26.11 | 52358.40 | 30.00 |
| | ATOTONILCO EL ALTO | 6265.87 | 35.34 | 884.40 | 28.95 | 35251.20 | 30.00 |
| | LA BARCA | 6058.17 | 43.32 | 1087.50 | 11.95 | 0.00 | 30.00 |
| | DEGOLLADO | 6996.53 | 34.94 | 356.25 | 13.81 | 0.00 | 30.00 |
| | ENCARNACIÓN DE DÍAZ | 24024.59 | 33.31 | 566.33 | 20.90 | 0.00 | 30.00 |
| | GUDALAJARA | 364.58 | 30.00 | 26531.93 | 8.62 | 41472.00 | 30.00 |
| | JESÚS MARÍA | 8121.77 | 36.81 | 221.55 | 37.54 | 2073.60 | 30.00 |
| | SAN MIGUEL EL ALTO | 15162.75 | 26.80 | 290.63 | 6.45 | 4665.60 | 30.00 |
| | TAMAZULA DE GORDIANO | 11058.18 | 40.00 | 437.55 | 35.00 | 0.00 | 30.00 |
| | TEPATITLÁN DE MORELOS | 35097.13 | 32.04 | 1875.00 | 4.62 | 123379.20 | 30.00 |
| | TOMATLÁN | 46511.09 | 29.65 | 645.00 | 23.49 | 22291.20 | 30.00 |
| | ZAPOPAN | 20894.60 | 35.00 | 22003.16 | 4.18 | 3209155.20 | 30.00 |
| | ZAPOTLANEJO | 14242.69 | 40.00 | 885.00 | 12.74 | 18144.00 | 30.00 |

**Table A3.2.** Límite inferior y superior para el caso de estudio

| | Beneficio | | | | Emisiones GEI | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Caso A | | | Caso B | Caso A | | Caso B | |
| Escenario | UB | LB | UP | LB | UB | LB | UP | LB |
| 1 | 4,220,000 | -14,451,776,009 | 11,422,432 | -14,451,776,009 | 151,835,227 | 0 | 402,714,516 | 0 |
| 2 | 4,720,000 | -14,402,191,184 | 11,922,716 | -14,402,191,184 | 151,234,860 | 0 | 401,500,194 | 0 |
| 3 | 4,060,000 | -14,502,445,062 | 11,262,385 | -14,502,445,062 | 151,911,995 | 0 | 403,955,391 | 0 |
| 4 | 4,320,000 | -14,619,402,693 | 11,518,615 | -14,619,402,693 | 153,454,154 | 0 | 406,819,659 | 0 |
| 5 | 4,190,000 | -14,451,250,404 | 12,041,155 | -14,451,250,404 | 150,774,290 | 0 | 402,701,644 | 0 |
| 6 | 4,170,000 | -14,171,278,423 | 9,652,090 | -14,171,278,423 | 151,187,034 | 0 | 395,830,736 | 0 |
| 7 | 4,670,000 | -14,550,150,897 | 11,878,020 | -14,550,150,897 | 152,555,702 | 0 | 405,123,697 | 0 |
| 8 | 3,510,000 | -14,317,817,605 | 9,736,716 | -14,317,817,605 | 151,794,451 | 0 | 399,432,732 | 0 |
| 9 | 3,970,000 | -14,493,870,763 | 11,173,536 | -14,493,870,763 | 151,250,440 | 0 | 403,745,408 | 0 |
| 10 | 4,500,000 | -14,377,563,128 | 9,964,078 | -14,377,563,128 | 152,096,387 | 0 | 400,896,160 | 0 |
| 11 | 4,130,000 | -14,355,030,711 | 11,334,885 | -14,355,030,711 | 152,533,782 | 0 | 400,344,073 | 0 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 12 | 4,420,000 | -14,459,977,076 | 11,301,275 | -14,459,977,076 | 152,742,814 | 0 | 402,915,325 | 0 |
| 13 | 4,370,000 | -14,647,560,510 | 11,568,750 | -14,647,560,510 | 153,425,579 | 0 | 407,509,238 | 0 |
| 14 | 4,390,000 | -14,558,913,840 | 11,594,330 | -14,558,913,840 | 152,711,594 | 0 | 405,338,300 | 0 |
| 15 | 3,500,000 | -14,661,721,029 | 10,700,210 | -14,661,721,029 | 153,914,000 | 0 | 407,856,027 | 0 |
| 16 | 4,300,000 | -14,477,775,360 | 10,759,656 | -14,477,775,360 | 153,490,393 | 0 | 403,350,104 | 0 |
| 17 | 4,430,000 | -14,573,569,454 | 11,634,524 | -14,573,569,454 | 152,780,965 | 0 | 405,697,213 | 0 |
| 18 | 3,840,000 | -14,559,963,069 | 11,047,286 | -14,559,963,069 | 151,570,799 | 0 | 405,363,995 | 0 |
| 19 | 4,590,000 | -14,641,411,677 | 11,795,610 | -14,641,411,677 | 152,478,235 | 0 | 407,358,655 | 0 |
| 20 | 4,500,000 | -14,564,518,647 | 11,700,398 | -14,564,518,647 | 153,672,840 | 0 | 405,475,560 | 0 |
| 21 | 4,780,000 | -14,405,948,281 | 11,723,192 | -14,405,948,281 | 152,389,952 | 0 | 401,591,517 | 0 |
| 22 | 4,370,000 | -14,451,504,817 | 11,570,543 | -14,451,504,817 | 152,267,952 | 0 | 402,707,875 | 0 |
| 23 | 4,440,000 | -14,399,387,253 | 10,449,530 | -14,399,387,253 | 152,974,729 | 0 | 401,430,356 | 0 |
| 24 | 4,300,000 | -14,091,140,973 | 9,456,911 | -14,091,140,973 | 150,782,851 | 0 | 393,868,433 | 0 |
| 25 | 4,170,000 | -14,518,778,935 | 11,370,667 | -14,518,778,935 | 151,919,836 | 0 | 404,355,404 | 0 |
| 26 | 4,100,000 | -14,307,449,581 | 9,839,533 | -14,307,449,581 | 152,499,887 | 0 | 399,178,821 | 0 |
| 27 | 4,370,000 | -14,383,669,246 | 10,891,935 | -14,383,669,246 | 152,869,503 | 0 | 401,045,425 | 0 |
| 28 | 4,520,000 | -14,314,477,918 | 10,428,216 | -14,314,477,918 | 151,794,019 | 0 | 399,350,944 | 0 |
| 29 | 4,490,000 | -14,480,605,185 | 11,692,241 | -14,480,605,185 | 152,008,091 | 0 | 403,420,537 | 0 |
| 30 | 4,400,000 | -14,418,707,882 | 11,605,905 | -14,418,707,882 | 152,282,974 | 0 | 401,904,622 | 0 |
| 31 | 4,260,000 | -14,579,728,606 | 11,459,126 | -14,579,728,606 | 151,860,044 | 0 | 405,848,049 | 0 |
| 32 | 4,560,000 | -14,662,713,697 | 11,764,423 | -14,662,713,697 | 153,473,435 | 0 | 407,880,337 | 0 |
| 33 | 4,090,000 | -14,160,184,401 | 9,190,985 | -14,160,184,401 | 153,323,952 | 0 | 395,559,045 | 0 |
| 34 | 4,120,000 | -14,435,131,099 | 11,324,495 | -14,435,131,099 | 151,544,598 | 0 | 402,306,886 | 0 |
| 35 | 3,980,000 | -14,189,106,811 | 8,839,383 | -14,189,106,811 | 152,120,292 | 0 | 396,273,719 | 0 |
| 36 | 3,920,000 | -14,375,250,600 | 11,125,036 | -14,375,250,600 | 150,884,806 | 0 | 400,840,424 | 0 |
| 37 | 4,210,000 | -14,603,396,921 | 11,409,257 | -14,603,396,921 | 154,013,885 | 0 | 406,427,681 | 0 |
| 38 | 3,950,000 | -14,589,857,295 | 11,154,257 | -14,589,857,295 | 153,340,602 | 0 | 406,096,099 | 0 |
| 39 | 4,090,000 | -14,092,832,208 | 8,993,080 | -14,092,832,208 | 150,903,923 | 0 | 393,910,006 | 0 |
| 40 | 4,490,000 | -14,529,462,410 | 11,697,701 | -14,529,462,410 | 152,455,586 | 0 | 404,617,040 | 0 |
| 41 | 4,140,000 | -14,212,185,710 | 9,562,556 | -14,212,185,710 | 152,740,860 | 0 | 396,832,547 | 0 |
| 42 | 3,770,000 | -14,549,032,299 | 10,971,589 | -14,549,032,299 | 152,453,929 | 0 | 405,096,303 | 0 |
| 43 | 4,600,000 | -14,485,866,937 | 11,798,973 | -14,485,866,937 | 152,291,878 | 0 | 403,549,396 | 0 |
| 44 | 4,490,000 | -14,536,794,543 | 10,640,496 | -14,536,794,543 | 152,432,652 | 0 | 404,796,603 | 0 |
| 45 | 4,320,000 | -14,586,388,027 | 11,526,985 | -14,586,388,027 | 152,191,656 | 0 | 406,011,137 | 0 |
| 46 | 4,090,000 | -14,425,424,790 | 10,631,115 | -14,425,424,790 | 152,781,161 | 0 | 402,069,180 | 0 |
| 47 | 4,160,000 | -14,398,277,541 | 10,967,066 | -14,398,277,541 | 152,328,475 | 0 | 401,404,349 | 0 |
| 48 | 4,090,000 | -14,481,417,697 | 11,085,541 | -14,481,417,697 | 153,306,154 | 0 | 403,440,435 | 0 |
| 49 | 4,400,000 | -14,317,802,816 | 10,186,203 | -14,317,802,816 | 152,486,922 | 0 | 399,432,370 | 0 |
| 50 | 4,020,000 | -14,455,143,806 | 10,350,341 | -14,455,143,806 | 153,306,804 | 0 | 402,782,541 | 0 |
| 51 | 4,290,000 | -14,508,014,501 | 11,492,072 | -14,508,014,501 | 153,037,679 | 0 | 404,091,785 | 0 |
| 52 | 4,190,000 | -14,407,866,687 | 10,963,293 | -14,407,866,687 | 153,062,195 | 0 | 401,639,012 | 0 |
| 53 | 5,040,000 | -14,394,512,344 | 11,856,716 | -14,394,512,344 | 152,225,605 | 0 | 401,310,971 | 0 |
| 54 | 3,790,000 | -14,586,355,556 | 10,988,530 | -14,586,355,556 | 153,209,469 | 0 | 406,010,342 | 0 |
| 55 | 3,850,000 | -14,331,364,421 | 10,462,486 | -14,331,364,421 | 151,732,671 | 0 | 399,764,491 | 0 |
| 56 | 3,820,000 | -14,657,626,534 | 11,018,682 | -14,657,626,534 | 152,193,689 | 0 | 407,755,753 | 0 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 57 | 4,340,000 | -14,383,895,879 | 11,095,443 | -14,383,895,879 | 152,831,735 | 0 | 401,050,976 | 0 |
| 58 | 4,200,000 | -14,471,784,080 | 11,401,464 | -14,471,784,080 | 152,845,231 | 0 | 403,202,770 | 0 |
| 59 | 4,240,000 | -14,594,091,930 | 11,448,278 | -14,594,091,930 | 152,485,067 | 0 | 406,199,804 | 0 |
| 60 | 4,520,000 | -14,365,017,017 | 10,053,630 | -14,365,017,017 | 152,790,561 | 0 | 400,588,636 | 0 |
| 61 | 4,130,000 | -14,458,144,289 | 9,535,848 | -14,458,144,289 | 153,648,509 | 0 | 402,870,425 | 0 |
| 62 | 4,320,000 | -14,417,671,900 | 10,969,527 | -14,417,671,900 | 152,699,141 | 0 | 401,878,225 | 0 |
| 63 | 4,460,000 | -14,380,414,963 | 11,665,964 | -14,380,414,963 | 151,165,570 | 0 | 400,966,899 | 0 |
| 64 | 4,210,000 | -14,252,007,495 | 10,422,246 | -14,252,007,495 | 151,175,589 | 0 | 397,814,144 | 0 |
| 65 | 4,590,000 | -14,507,196,188 | 11,795,298 | -14,507,196,188 | 151,875,170 | 0 | 404,071,745 | 0 |
| 66 | 3,890,000 | -14,492,463,906 | 10,707,165 | -14,492,463,906 | 152,536,152 | 0 | 403,710,954 | 0 |
| 67 | 4,250,000 | -14,385,605,063 | 11,034,647 | -14,385,605,063 | 151,414,093 | 0 | 401,094,003 | 0 |
| 68 | 4,410,000 | -14,433,058,889 | 10,897,726 | -14,433,058,889 | 152,759,404 | 0 | 402,241,686 | 0 |
| 69 | 4,120,000 | -14,563,615,842 | 11,320,399 | -14,563,615,842 | 153,619,487 | 0 | 405,453,451 | 0 |
| 70 | 4,370,000 | -14,480,138,091 | 11,514,833 | -14,480,138,091 | 152,291,074 | 0 | 403,409,098 | 0 |
| 71 | 3,850,000 | -14,436,732,439 | 10,825,040 | -14,436,732,439 | 152,551,862 | 0 | 402,346,102 | 0 |
| 72 | 4,250,000 | -14,408,900,556 | 11,007,285 | -14,408,900,556 | 152,316,749 | 0 | 401,650,053 | 0 |
| 73 | 3,930,000 | -14,482,233,752 | 11,134,272 | -14,482,233,752 | 151,925,461 | 0 | 403,460,420 | 0 |
| 74 | 4,050,000 | -14,465,459,165 | 11,253,142 | -14,465,459,165 | 151,487,167 | 0 | 403,049,614 | 0 |
| 75 | 4,310,000 | -14,063,036,530 | 9,296,632 | -14,063,036,530 | 152,141,229 | 0 | 393,186,284 | 0 |
| 76 | 4,080,000 | -14,462,051,935 | 11,286,948 | -14,462,051,935 | 151,997,056 | 0 | 402,966,171 | 0 |
| 77 | 4,010,000 | -14,504,200,124 | 10,860,191 | -14,504,200,124 | 152,941,301 | 0 | 403,998,372 | 0 |
| 78 | 4,640,000 | -14,295,556,312 | 11,323,098 | -14,295,556,312 | 150,582,994 | 0 | 398,886,585 | 0 |
| 79 | 4,210,000 | -14,511,106,023 | 11,408,950 | -14,511,106,023 | 152,745,244 | 0 | 404,167,496 | 0 |
| 80 | 3,970,000 | -14,518,994,370 | 11,171,774 | -14,518,994,370 | 151,384,271 | 0 | 404,360,680 | 0 |
| 81 | 4,270,000 | -14,509,486,737 | 11,384,478 | -14,509,486,737 | 152,856,297 | 0 | 404,127,840 | 0 |
| 82 | 4,430,000 | -14,306,551,077 | 10,675,030 | -14,306,551,077 | 152,250,501 | 0 | 399,143,535 | 0 |
| 83 | 4,510,000 | -14,531,563,945 | 11,717,641 | -14,531,563,945 | 152,604,545 | 0 | 404,668,506 | 0 |
| 84 | 4,180,000 | -14,527,677,489 | 11,385,175 | -14,527,677,489 | 152,239,383 | 0 | 404,573,328 | 0 |
| 85 | 4,460,000 | -14,329,398,826 | 10,287,775 | -14,329,398,826 | 152,687,701 | 0 | 399,714,945 | 0 |
| 86 | 4,580,000 | -14,499,516,521 | 11,787,291 | -14,499,516,521 | 152,526,936 | 0 | 403,883,671 | 0 |
| 87 | 2,860,000 | -14,144,074,701 | 3,990,461 | -14,144,074,701 | 152,228,487 | 0 | 395,165,382 | 0 |
| 88 | 4,380,000 | -14,422,212,041 | 11,581,949 | -14,422,212,041 | 151,968,077 | 0 | 401,990,500 | 0 |
| 89 | 4,210,000 | -14,486,212,708 | 10,692,345 | -14,486,212,708 | 151,188,900 | 0 | 403,557,864 | 0 |
| 90 | 4,660,000 | -14,522,021,673 | 11,866,099 | -14,522,021,673 | 151,862,712 | 0 | 404,434,818 | 0 |
| 91 | 4,010,000 | -14,291,010,036 | 8,727,504 | -14,291,010,036 | 152,313,270 | 0 | 398,763,370 | 0 |
| 92 | 4,650,000 | -14,346,251,580 | 10,922,456 | -14,346,251,580 | 152,145,198 | 0 | 400,129,341 | 0 |
| 93 | 4,140,000 | -14,456,350,351 | 10,822,441 | -14,456,350,351 | 152,867,049 | 0 | 402,824,512 | 0 |
| 94 | 4,500,000 | -14,413,283,785 | 10,962,351 | -14,413,283,785 | 152,521,872 | 0 | 401,771,535 | 0 |
| 95 | 4,260,000 | -14,493,071,777 | 11,263,532 | -14,493,071,777 | 152,913,675 | 0 | 403,712,702 | 0 |
| 96 | 3,920,000 | -14,525,423,170 | 11,120,506 | -14,525,423,170 | 152,135,191 | 0 | 404,518,120 | 0 |
| 97 | 4,030,000 | -14,454,167,180 | 11,020,086 | -14,454,167,180 | 152,061,725 | 0 | 402,773,075 | 0 |
| 98 | 4,820,000 | -14,604,705,479 | 12,022,160 | -14,604,705,479 | 152,820,875 | 0 | 406,459,728 | 0 |
| 99 | 4,250,000 | -14,403,389,741 | 11,443,701 | -14,403,389,741 | 152,016,116 | 0 | 401,524,596 | 0 |
| 100 | 4,240,000 | -14,741,142,941 | 11,439,714 | -14,741,142,941 | 154,212,211 | 0 | 409,801,053 | 0 |

# A4. DATOS DEL MODELO DE SUSTIUCIÓN DE COMBUSTIBLE FÓSIL

**Table A4.1.** Capacidad, costo de capital y rendimiento de las tecnologías de producción de biogás.

| No. | Capacidad ($Nm^3$/mes) | Tecnología A | Tecnología B | Tecnología C |
|---|---|---|---|---|
| | | Costo de capital (€) | | |
| 1 | 35000 | 86100 | 96950 | 70350 |
| 2 | 90000 | 221400 | 249300 | 180900 |
| 3 | 180000 | 442800 | 498600 | 361800 |
| 4 | 1000000 | 2460000 | 2770000 | 2010000 |
| 5 | 1400000 | 3444000 | 3878000 | 2814000 |
| 6 | 1800000 | 4428000 | 4986000 | 3618000 |
| 7 | 2000000 | 4920000 | 5540000 | 4020000 |
| | | Rendimiento ($Nm^3$ $ton^{-1}$) | | |
| | | Excretas | Residuos Orgánicos | Aguas Residuales |
| | | 80 | 103 | 40 |

**Table A4.2.** Capacidad, costo de capital y rendimiento de tecnologías de purificación para el biogás.

| No. | Capacidad ($Nm^3$/mes) | PSA | HPWS | OPS | CSP | MS |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Costo de capital (€) | | | | |
| 1 | 20000 | 152777.778 | 33888.8889 | 133333.333 | 291666.667 | 183333.333 |
| 2 | 50000 | 381944.444 | 84722.2222 | 333333.333 | 729166.667 | 458333.333 |
| 3 | 100000 | 763888.889 | 169444.444 | 666666.667 | 763888.889 | 347222.222 |
| 4 | 600000 | 1833333.33 | 1666666.67 | 2000000 | 2166666.67 | 1833333.33 |
| 5 | 800000 | 2444444.44 | 2222222.22 | 2666666.67 | 2888888.89 | 2444444.44 |
| 6 | 1000000 | 3055555.56 | 2777777.78 | 3333333.33 | 3611111.11 | 3055555.56 |
| 7 | 1200000 | 3666666.67 | 3333333.33 | 4000000 | 4333333.33 | 3666666.67 |
| | | Rendimiento ($Nm^3$ $Nm^{-3}$) | | | | |
| | | 0.65 | 0.68 | 0.60 | 0.62 | 0.65 |

**Table A4.3.** Parámetros económicos para el caso de estudio

| Parámetro | Tipo | Valor | Unidades |
|---|---|---|---|
| $C_{i,f,t}^{Bm}$ | Excretas<br>Residuos orgánicos<br>Aguas residuales | 1 | € ton$^{-1}$ |
| $C_{j,l}^{Fix,Prod_tech}$ | Ver Tabla A4.1 | - | € |
| $C_{k,m}^{Fix,Pur_tech}$ | Ver Tabla A4.2 | - | € |
| $C_{i,f,l,t}^{Trans,Bm}$<br>$C_{i,l,m,t}^{Trans,Bg}$<br>$C_{i,l,p,t}^{Trans,Bg}$<br>$C_{k,m,p,t}^{Trans,Bgp}$<br>$C_{i,l,q,t}^{Trans,Fr}$ | Todo | 0.00875 | € km$^{-1}$ ton$^{-1}$ or € km$^{-1}$ Nm$^{-3}$ |
| $C_{l,j,t}^{Var,Prod_tech}$ | Floating Drum<br>Floating Drum Biogas Holder<br>Fixed Dome | 0.2<br>0.18<br>0.24 | € Nm$^{-3}$ |
| $C_{m,k,t}^{Var,Pur_tech}$ | PSA<br>HPWS<br>OPS<br>CSP<br>MS | 0.4<br>0.13<br>0.11<br>0.17<br>0.12 | € Nm$^{-3}$ |
| $N$ | | 10 | Years |
| $R_{k,p,t}^{Bgp}$ | - | 18.47 | € GJ$^{-1}$ |
| $R_{p,t}^{FFuel}$ | - | *18.47. | € GJ$^{-1}$ |
| $R_{i,q,t}^{Fr}$ | Excretas<br>Residuos orgánicos<br>Aguas residuales | 5.6 | € ton$^{-1}$ |
| $\alpha$ | Todo | 0.10 | - |

* el beneficio económico es el 60% del precio (i.e., 11.08 € GJ$^{-1}$)

**Table A4.4.** Parámetros ambientales y generales para el caso de estudio

| Parámetro | Valor | Unidades |
|---|---|---|
| $E^{Use,FFuel}$ | 0.0652 | Ton $CO_2$eq GJ$^{-1}$ |
| $H^{Bgp}$ | 50 | GJ ton$^{-1}$ |
| $H^{FFuel}$ | 46.1 | GJ ton$^{-1}$ |
| $\rho^{Bg_N}$ | 0.00080 | ton m$^{-3}$ |

**Table A4.5.** Demandas y disponibilidad para el caso de estudio

| Ciudad | Energía (GJ /mes) | Digestato Ton/mes | Disponibilidad de biomasa (Ton/mes) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Excretas | Residuos orgánicos | Aguas Residuales |
| Aguililla | 4332.76 | 61.79 | 8732.34 | 225.00 | 0 |
| Apatzingán | 36459.34 | 88.41 | 6159.33 | 2700.00 | 0 |
| Arteaga | 6293.46 | 36.22 | 11132.61 | 210.00 | 0 |
| Coalcomán de Vázquez Pallares | 5243.32 | 41.48 | 10339.32 | 210.00 | 13478.4 |
| Cotija | 5406.5 | 19.59 | 3154.41 | 210.00 | 12960 |
| La Huacana | 9734.71 | 80.55 | 7260.33 | 225.00 | 16588.8 |
| Huetamo | 11603.88 | 87.40 | 12624.60 | 450.00 | 0 |
| Morelia | 223098.74 | 64.69 | 3838.56 | 2100.00 | 623790.72 |
| La Piedad | 29480.75 | 35.89 | 3428.22 | 1500.00 | 103420.8 |
| Puruándiro | 4464.67 | 154.33 | 3072.60 | 480.00 | 0 |
| Tanhuato | 4364.32 | 84.53 | 17134.05 | 180.00 | 0 |
| Tepalcatepec | 6777.88 | 160.52 | 6769.83 | 540.00 | 0 |
| Zamora | 55778.66 | 77.68 | 1544.01 | 2550.00 | 144633.6 |
| Abasolo | 25866.94 | 244.12 | 3971.10 | 450.00 | 31622.4 |
| San Miguel de Allende | 48856.08 | 111.28 | 8532.75 | 1350.00 | 46656 |
| Manuel Doblado | 11039.29 | 138.37 | 6664.95 | 255.00 | 9072 |
| Dolores Hidalgo Cuna de la Independencia Nac. | 43243.19 | 116.60 | 11913.69 | 1050.00 | 45100.8 |
| León | 448777.06 | 119.69 | 10622.64 | 14595.00 | 813006.72 |
| Pénjamo | 42804.54 | 471.82 | 8624.94 | 2955.00 | 570.24 |
| Purísima del Rincón | 22685.24 | 70.22 | 3556.89 | 73.95 | 0 |
| Salvatierra | 28539.49 | 115.45 | 7106.25 | 900.00 | 20736 |
| San Felipe | 32155 | 292.73 | 14414.43 | 900.00 | 51425.28 |
| San Luis de la Paz | 34405.96 | 85.42 | 10578.78 | 975.00 | 42042.24 |
| Silao | 53890.74 | 71.22 | 3714.51 | 1776.60 | 55676.16 |
| Valle de Santiago | 40559.27 | 272.23 | 3370.95 | 1800.00 | 28512 |
| Yuriria | 19832.46 | 95.96 | 2104.50 | 420.00 | 31104 |
| Acatic | 6120.62 | 55.50 | 15432.30 | 375.00 | 18144 |
| Arandas | 21922.79 | 101.16 | 11460.09 | 1050.00 | 52358.4 |
| Atotonilco el Alto | 17193.46 | 113.38 | 5855.55 | 507.60 | 35251.2 |
| La Barca | 18494.05 | 267.01 | 3034.86 | 1200.00 | 0 |
| Degollado | 6106.12 | 54.70 | 6258.39 | 330.00 | 0 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Encarnación de Díaz | 15224.79 | 159.79 | 18311.79 | 405.00 | 0 |
| Guadalajara | 415095.74 | 0.00 | 56.31 | 28483.95 | 41472 |
| Jesús María | 5534.71 | 69.61 | 4366.02 | 345.00 | 2073.6 |
| San Miguel el Alto | 9369.98 | 37.11 | 17818.62 | 300.00 | 4665.6 |
| Tamazula de gordiano | 10915.34 | 74.51 | 6418.08 | 487.20 | 0 |
| Tepatitlán de Morelos | 40175.49 | 137.39 | 19803.30 | 1800.00 | 123379.2 |
| Tomatlán | 10184.17 | 69.38 | 20470.47 | 450.00 | 22291.2 |
| Zapopan | 378742.73 | 50.58 | 5460.57 | 22387.65 | 3209155.2 |
| Zapotlanejo | 19478.81 | 55.87 | 8675.91 | 795.00 | 18144 |

**Table A4.6. T**ecnologías seleccionadas para el 10% de la demanda energética en el caso de estudio

| Ciudad | Tecnología de Producción | Tecnología de purificación |
|---|---|---|
| Aguililla | Tech.C1 | HPWS1 |
| Apatzingán | Tech.C3 | HPWS4 |
| Arteaga | Tech.C1 | HPWS2 |
| Coalcomán de Vázquez Pallares | Tech.A3 | HPWS3 |
| Cotija | Tech.C1 | HPWS2 |
| La Huacana | Tech.C2 | HPWS2 |
| Huetamo | Tech.C2 | HPWS3 |
| Morelia | Tech.C6 | MS7 |
| La Piedad | Tech.C3 | HPWS3 |
| Puruándiro | Tech.C1 | HPWS2 |
| Tanhuato | Tech.C1 | HPWS1 |
| Tepalcatepec | Tech.C2 | HPWS2 |
| Zamora | Tech.C7 | HPWS4 |
| Abasolo | Tech.C3 | HPWS3 |
| San Miguel de Allende | Tech.B4 | HPWS4 |
| Manuel Doblado | Tech.A3 | HPWS3 |
| Dolores Hidalgo Cuna de la Independencia Nac. | Tech.B4 | HPWS4 |
| León | Tech.C7 | MS7 |
| Pénjamo | Tech.B4 | HPWS4 |
| Purísima del Rincón | Tech.C5 | HPWS6 |
| Salvatierra | Tech.C3 | HPWS3 |
| San Felipe | Tech.B4 | HPWS4 |
| San Luis de la Paz | Tech.B4 | HPWS4 |
| Silao | Tech.B4 | HPWS4 |
| Valle de Santiago | Tech.B4 | HPWS4 |
| Yuriria | Tech.C3 | HPWS3 |
| Acatic | Tech.A3 | HPWS3 |

| | | |
|---|---|---|
| Arandas | Tech.C3 | HPWS3 |
| Atotonilco el Alto | Tech.C3 | HPWS3 |
| La Barca | Tech.A3 | HPWS3 |
| Degollado | Tech.C3 | HPWS3 |
| Encarnación de Díaz | Tech.C3 | HPWS3 |
| Guadalajara | Tech.C7 | MS7 |
| Jesús María | Tech.C1 | HPWS1 |
| San Miguel el Alto | Tech.C2 | HPWS2 |
| Tamazula de gordiano | Tech.C2 | HPWS3 |
| Tepatitlán de Morelos | Tech.C3 | HPWS4 |
| Tomatlán | Tech.C2 | HPWS2 |
| Zapopan | Tech.C7 | MS7 |
| Zapotlanejo | Tech.C6 | MS7 |