

**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**Facultad de Ingeniería Química  
División de Estudios de Posgrado**



**Doctorado en Ciencias  
en Ingeniería Química**

**INCORPORACIÓN DE LA MATCHING LAW EN LA PLANIFICACIÓN  
ESTRATÉGICA DE CADENAS DE SUMINISTRO DE ENERGÍA**

**TESIS PRESENTADA POR:**

**M. C. ESBEYDI VILICAÑA GARCÍA**

**A la división de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química como  
requisito parcial para obtener el grado de**

**DOCTORA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. JOSÉ MARÍA PONCE ORTEGA**

**Morelia, Mich., Febrero 2023.**

## RESUMEN

En esta tesis se proponen diferentes modelos matemáticos de optimización para satisfacer las necesidades energéticas, considerando mayores ganancias y menores emisiones al ambiente. Se incluyen esquemas de incentivos económicos que buscan promover tecnologías limpias o mejorar objetivos ambientales dependiendo sea el caso. Además, se estudia el comportamiento de los involucrados a través de conocer las preferencias ante situaciones en las que se presentan diferentes opciones a elegir.

Las herramientas desarrolladas se han utilizado en diferentes casos de estudio para demostrar su aplicabilidad. Se ha comprobado, a través de los resultados obtenidos, que es factible incentivar los objetivos ambientales, mejorar las ganancias y reducir las emisiones al ambiente. Asimismo, es posible determinar cómo es que las condiciones que se plantean en los casos de estudio afectan a las preferencias de elección.

**Palabras clave:** Planificación; Cadenas de suministro; Esquema de incentivos; Comportamiento; Optimización.

## **ABSTRACT**

In this thesis, different mathematical optimization models are proposed to satisfy energy needs, considering higher profits and lower emissions to the environment. Economic incentive schemes that seek to promote clean technologies or improve environmental objectives, depending on the case, are included. In addition, the behavior of those involved is studied when determining preferences in situations in which there are different options to choose from.

The developed tools have been used in different case studies to demonstrate their applicability. It has been verified through the results that it is feasible to encourage environmental objectives, improve profits and reduce emissions into the environment. Likewise, it is possible to determine how the conditions that arise in the case studies affect choice preferences.

**Keywords:** Planning; Supply chains; Incentive scheme, Behavior; Optimization.

# ÍNDICE

## Página

### CAPÍTULO UNO

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 1.1 INTRODUCCIÓN            | 8  |
| 1.2 MARCO TEÓRICO           | 9  |
| 1.2.1 Matching law          | 9  |
| 1.2.2 Incentivos económicos | 12 |
| 1.3 ANTECEDENTES            | 14 |
| 1.4 OBJETIVOS               | 18 |
| 1.4.1 Objetivo general      | 18 |
| 1.4.2 Objetivos específicos | 19 |
| 1.5 JUSTIFICACIÓN           | 19 |
| 1.6 HIPÓTESIS               | 19 |
| 1.7 METODOLOGÍA             | 20 |

### CAPÍTULO DOS

#### INVOLUCRANDO INCENTIVOS ECONÓMICOS EN LA OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE METANOL CONSIDERANDO RECURSOS CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 2.a Resumen                    | 21 |
| 2.1 Planteamiento del problema | 22 |
| 2.2 Modelo                     | 23 |
| 2.3 Caso de estudio            | 34 |
| 2.4 Resultados                 | 38 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| 2.5 Nomenclatura ..... | 48 |
|------------------------|----|

## **CAPÍTULO TRES**

### **PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN INTENSIFICADA DE SILICIO GRADO SOLAR PARA GENERAR PANELES QUE INVOLUCREN EL COMPORTAMIENTO DE LA POBLACIÓN**

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 3.a Resumen .....                    | 58 |
| 3.1 Planteamiento del problema ..... | 59 |
| 3.2 Modelo .....                     | 61 |
| 3.3 Caso de estudio .....            | 72 |
| 3.4 Resultados.....                  | 77 |
| 3.5 Nomenclatura .....               | 82 |

## **CAPÍTULO CUATRO**

### **INVOLUCRANDO EL COMPORTAMIENTO DE LA POBLACIÓN EN LA PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS INTEGRADOS**

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 4.a Resumen .....                    | 88  |
| 4.1 Planteamiento del problema ..... | 89  |
| 4.2 Modelo .....                     | 91  |
| 4.3 Caso de estudio .....            | 103 |
| 4.4 Resultados.....                  | 105 |
| 4.5 Nomenclatura .....               | 119 |

## CAPÍTULO CINCO

### INTENSIFICACIÓN DEL PROCESO DE FRACTURACIÓN HIDRÁULICA INVOLUCRANDO ESQUEMAS DE INCENTIVOS Y EL USO DE LA MATCHING LAW

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 5.a Resumen .....                    | 122 |
| 5.1 Planteamiento del problema ..... | 123 |
| 5.2 Modelo .....                     | 125 |
| 5.3 Caso de estudio .....            | 140 |
| 5.4 Resultados.....                  | 145 |
| 5.5 Nomenclatura .....               | 160 |

## CAPÍTULO SEIS

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 6.1 CONCLUSIONES GENERALES ..... | 168 |
| 6.2 REFERENCIAS .....            | 172 |

## I. APÉNDICES

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 1. Artículos publicados ..... | 182 |
| 2. Artículo en proceso .....  | 189 |
| 3. Artículo en revisión ..... | 190 |
| 4. Capítulos de libros .....  | 191 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1. Superestructura propuesta .....                        | 24 |
| Figura 2.2. Distribución de la producción mundial de metanol ..... | 34 |

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.3. Ubicación de las ciudades consideradas .....                                                                          | 36 |
| Figura 2.4. Producción de gas natural para el escenario B (Maximizando profit promedio) .....                                     | 41 |
| Figura 2.5. Producción de metanol para el escenario B (Maximizando profit promedio) ...                                           | 41 |
| Figura 2.6. Comportamiento de los incentivos económicos al maximizar el profit promedio para el escenario B .....                 | 42 |
| Figura 2.7. Incentivos económicos generados cuando se restringe la importación un 25% para el escenario B .....                   | 43 |
| Figura 2.8. Producción de metanol cuando la importación está restringida en un 25% para el escenario B .....                      | 43 |
| Figura 2.9. Promedio de las ganancias (profit) .....                                                                              | 44 |
| Figura 2.10. Producción de las nuevas instalaciones de metanol con diferente restricción de importación para el escenario B ..... | 45 |
| Figura 2.11. Incentivos económicos utilizados con diferentes restricciones de importación para el escenario B .....               | 45 |
| Figura 2.12. Emisión de CO <sub>2e</sub> generado con diferentes restricciones de importación de metanol para el escenario B..... | 46 |
| Figura 2.13. Curva de Pareto.....                                                                                                 | 47 |
| Figura 2.14. Curva de Pareto de soluciones intermedias .....                                                                      | 48 |
| Figura 3.1. Descripción del planteamiento del problema .....                                                                      | 60 |
| Figura 3.2. Superestructura propuesta para la planificación de silicio .....                                                      | 61 |
| Figura 3.3. Escenarios propuestos .....                                                                                           | 75 |
| Figura 3.4. Comparación entre escenario A y B .....                                                                               | 80 |

|                                                                                                                                            | <b>Página</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Figura 3.5. Escenario C donde los incentivos se otorgan a los productores y al usuario final .....                                         | 81            |
| Figura 4.1. Descripción del problema .....                                                                                                 | 91            |
| Figura 4.2. Superestructura propuesta para integrar la matching law en los sistemas de energía .....                                       | 92            |
| Figura 4.3. Ubicación de las instalaciones en el caso de estudio considerado .....                                                         | 105           |
| Figura 4.4. Comparación de productos en cada refinería .....                                                                               | 109           |
| Figura 4.5. Comparación de bioproductos en cada biorefinería .....                                                                         | 110           |
| Figura 4.6. Respuesta de comportamiento a partir de la comparación entre gasolina y bioetanol .....                                        | 115           |
| Figura 4.7. Respuesta de comportamiento a partir de la comparación entre diésel y biodiesel.....                                           | 116           |
| Figura 4.8. Representación del enfoque multistakeholder .....                                                                              | 117           |
| Figura 4.9. Soluciones para el análisis de sensibilidad .....                                                                              | 118           |
| Figura 5.1. Descripción del planteamiento del problema .....                                                                               | 125           |
| Figura 5.2. Superestructura propuesta para intensificar la reutilización de agua en operaciones de fracturación hidráulica .....           | 126           |
| Figura 5.3. Programa de la fase de terminación en cada pozo para el caso de estudio abordado .....                                         | 143           |
| Figura 5.4a. Efecto de los incentivos sobre los costos y el agua dulce .....                                                               | 149           |
| Figura 5.4b. Acercamiento de la figura 32a. Efecto de los incentivos sobre los costos y el agua dulce .....                                | 150           |
| Figura 5.5. Incentivos obtenidos en el consumo de agua dulce en 70 escenarios mediante el uso de restricciones en incentivos máximos ..... | 151           |

|                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.6. Incentivos obtenidos en el consumo de agua dulce con 30 escenarios usando restricción en incentivos máximos .....     | 152 |
| Figura 5.7. Incentivos obtenidos en el consumo de agua dulce con 10 escenarios usando restricción en incentivos máximos .....     | 153 |
| Figura 5.8. Incentivos obtenidos en el consumo de agua dulce con 10 escenarios al no usar restricción en incentivos máximos ..... | 154 |
| Figura 5.9. Preferencia de los tratamientos para 70 escenarios .....                                                              | 155 |
| Figura 5.10. Preferencia de los tratamientos para 30 escenarios .....                                                             | 156 |
| Figura 5.11. Preferencia de tratamiento al usar restricción en incentivos máximos.....                                            | 157 |
| Figura 5.12. Preferencia de tratamiento al no utilizar restricción en incentivos máximos..                                        | 159 |

## **ÍNDICE DE TABLAS**

|                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 2.1. Relación de ciudades consideradas en los diferentes conjuntos .....                     | 37  |
| Tabla 2.2. Resultados del escenario A.....                                                         | 38  |
| Tabla 3.1. Ciudades que producen la materia prima requerida .....                                  | 73  |
| Tabla 3.2. Ciudades seleccionadas para instalar las planas de producción de Si <sub>GS</sub> ..... | 73  |
| Tabla 3.3. Ciudades propuestas para instalar paneles solares.....                                  | 74  |
| Tabla 3.4 Costos de producción de la materia prima y los procesos en todos los escenarios .....    | 77  |
| Tabla 4.1. Tipo de combustible preferido .....                                                     | 108 |
| Tabla 4.2. Incentivos y castigos económicos para refinerías.....                                   | 111 |
| Tabla 4.3. Incentivos económicos y castigos para biorefinerías .....                               | 112 |
| Tabla 4.4. Emisiones objetivo y propuestas para productos de combustibles fósiles .....            | 113 |
| Tabla 4.5. Emisiones objetivo y propuestas para bioproductos .....                                 | 113 |

|                                                                                            | <b>Página</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Tabla 4.6. Valor adimensional para parámetros .....                                        | 114           |
| Tabla 5.1. Datos en relación al agua requerida para perforación y al agua de retorno ..... | 141           |
| Tabla 5.2. Eficiencias para las unidades de tratamiento consideradas .....                 | 142           |
| Tabla 5.3. Costos relacionados con el tratamiento .....                                    | 144           |
| Tabla 5.4. Costos de transporte de diferentes rutas .....                                  | 144           |
| Tabla 5.5. Estadísticas del modelo para cada caso .....                                    | 146           |
| Tabla 5.6. Tiempo promedio de CPU para cada caso .....                                     | 146           |
| Tabla 5.7. Comparación entre no usar incentivos y usar incentivos para 10 escenarios ...   | 147           |
| Tabla 5.8. Incentivos considerados para cada caso .....                                    | 150           |
| Tabla 5.9. Información considerada para las unidades de tratamiento.....                   | 156           |

**PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA  
DE SISTEMAS ENERGÉTICOS  
OPTIMIZANDO EL  
COMPORTAMIENTO  
POBLACIONAL**

# CAPÍTULO UNO

## 1.1 INTRODUCCIÓN

Se ha observado que en los últimos años el acceso a los recursos naturales cada vez es más limitado, en especial para la producción de energía a través de la quema de combustibles. Esto ha motivado a desarrollar y proponer alternativas para el mejor aprovechamiento de lo que aún se tiene disponible. Es importante destacar la dificultad que implica satisfacer en su totalidad las demandas de energéticos a través sólo de biocombustibles o sólo de combustibles fósiles, principalmente por la variación en la capacidad de los diferentes subsectores energéticos para pasar de los combustibles fósiles a las energías renovables. El enfoque que se busca es que ambas partes se complementen en donde los recursos se aprovechen en su mayor totalidad, tratando de generar la menor cantidad de desechos y de emisiones.

Los combustibles fósiles comprenden el 80% de la demanda actual de energía primaria a nivel mundial y el sistema energético es la fuente de casi dos tercios de las emisiones de CO<sub>2</sub> [1]. Se espera que el consumo mundial de biocombustibles continúe en aumento, primordialmente en los países en desarrollo. Las políticas de apoyo nacionales y la demanda de combustibles impulsarán en gran parte la evolución futura de los mercados de biocombustibles [2].

El acceso restringido a los combustibles fósiles convencionales de manera global, así como el aumento de la presión política sobre la reducción de carbono emitido, son factores impulsores detrás de los combustibles alternativos. La correcta planificación de los recursos existentes es punto clave para el mejor aprovechamiento. Tal es el caso del gas *shale*, si bien es un recurso descubierto relativamente nuevo, se han presentado diversas problemáticas que se han tenido que solucionar para su correcto manejo. La producción de gas *shale* consume un gran volumen de agua dulce y si no se realiza bajo buenas prácticas puede contaminar el medio marino ya que para la fracturación se utilizan mucho químicos de los cuales algunos son tóxicos y cancerígenos [3]. El gas *shale* se está convirtiendo en la fuente más importante

de gas natural en América del Norte, y la sustitución del carbón por gas natural está reduciendo emisiones de CO<sub>2</sub> y mejorando la calidad del aire [4].

Se ha demostrado que las decisiones que los encargados toman afectan directamente todo el sistema energético [5], desde políticas públicas, costos, regulaciones. Es por ello que es importante estudiar la respuesta de los consumidores ante las condiciones que el tomador de decisiones impone. Anteriormente, dichas regulaciones se aplicaban a la sociedad como mandatos; sin embargo, se ha demostrado que a través de incentivos económicos se presenta mejor respuesta [6]. Además de que es posible modificar el comportamiento de los involucrados a través de incentivos económicos. La correcta solución radica en los objetivos a cumplir.

La presente tesis está articulada como a continuación se describe. Se explica un marco teórico con los conceptos más importantes a abordar. Después se destacan los trabajos relacionados al desarrollo de la tesis como antecedentes. Se incluyen objetivos, justificación y la metodología que se siguió de manera general en los capítulos. Posteriormente, se presentan cuatro capítulos en los que se plantean diferentes problemáticas y se muestra el modelo matemático para la obtención de resultados óptimos. Finalmente, se redactan las conclusiones del trabajo.

## **1.2 MARCO TEÓRICO**

### **1.2.1 Matching law**

El comportamiento de la población en diversas circunstancias no ha sido abordado de manera adecuada. Considerar el comportamiento humano es especialmente importante debido a la alta dependencia que tiene con el sistema energético, ya que la demanda de cada tipo de energía depende de la preferencia del usuario final (población). Es posible modificar ciertos aspectos a los que el consumidor responderá de acuerdo a las necesidades que el gobierno considere pertinentes. Los analistas han estado interesados en los determinantes ambientales de por qué los comportamientos se asignan a alternativas de elección particulares durante algún tiempo. La Matching law es una herramienta analítica en la descripción de las interacciones comportamiento-entorno [7]. Las fuentes de recompensa relativamente densas presentarán índices de comportamiento relativamente más altos (es decir, los organismos

demuestran preferencia por los eventos/entornos más reforzadores); de esta manera, el comportamiento coincide con la recompensa. Para explicar la Matching law se utilizó un experimento con palomas en programas de intervalos de variables concurrentes. A las palomas se les presentaron dos botones, cada uno de los cuales tenía una tasa de recompensa de comida diferente. Las palomas tendían a morder o seleccionar el botón que producía la recompensa más rápido y con mayor frecuencia que el otro botón. Y la proporción de su velocidad coincidió con la proporción de las velocidades de recompensa en los dos botones. Los animales pueden no parecer apropiados para relacionarse con el comportamiento humano, pero diferentes estudios han demostrado que este comportamiento particular de recompensa y castigo puede vincularse con las personas, como lo muestran Reed y Kaplan [8]. Las implicaciones de la Matching law con respecto al poder de cambiar las contingencias de favorecer una alternativa de respuesta (por ejemplo, comportamiento problemático) a otra (por ejemplo, comportamientos deseados) ofrecen esperanza en el tratamiento de comportamientos problemáticos, así como en la adquisición de habilidades socialmente importantes. [8]. Así, en esta tesis se propone implementar un modelo matemático que involucre el comportamiento a través de la Matching law y la planificación de los diferentes casos de estudio.

Se ha demostrado que los seres humanos distribuyen su comportamiento entre alternativas de acuerdo con el principio de matching [9]. La Matching law afirma que un individuo distribuirá su comportamiento entre alternativas en la misma proporción en que se han obtenido recompensas para estas alternativas [10]. La Matching law es una declaración matemática sobre el comportamiento adaptativo en entornos que continuamente brindan oportunidades de elección [11]. Las simulaciones de redes sociales hacen posible un análisis de cómo las características sociales centrales pueden cambiar la efectividad de la solución de un problema, como la fuerza de la influencia social en la formación de preferencias, la distribución de gustos y la topología de la red social [12].

Involucrar el comportamiento junto con las cadenas de suministro puede mejorar el desempeño [13]. El comportamiento estratégico del cliente en ocasiones impone restricciones sobre cómo se deben asignar las ganancias entre las partes de la cadena de suministro, donde el enfoque está en cómo diseñar una relación contractual entre el minorista y el proveedor para maximizar la eficiencia de la cadena de suministro [14]. Otro tema

relacionado es el contagio de la cadena de suministro, que se refiere a la propagación de comportamientos entre empresas de una relación dentro de la cadena de suministro; dicho esto, las personas que están a cargo pueden influir estratégicamente en el comportamiento [15]. La interacción estratégica entre períodos puede ser ventajosa para el desempeño general de la cadena de suministro y, más específicamente, los inventarios estratégicos empoderan a los compradores, es decir, cambian la participación justa de las ganancias a su favor [16].

Las ventajas de utilizar una herramienta como la matching law en problemas de ingeniería asociados a la planificación de los sistemas energéticos, pueden enlistarse de la siguiente manera:

- La matching law es una herramienta analítica robusta que permite cuantificar la preferencia de las personas ante diferentes opciones que se les presente.
- Escalar los análisis de matching para todos los miembros de una población puede beneficiar a quienes desean aplicar los análisis cuantitativos del comportamiento a las decisiones políticas.
- Cuantificar la proporción de la población para la cual diferentes resultados probablemente sirvan como incentivos puede ayudar a identificar la efectividad condicional de dichos incentivos para diversas personas y en distintos contextos
- Comprender la eficacia de los resultados ante distintos escenarios podría ayudar a la política y regulación que están diseñadas para cambiar el comportamiento de una población a través de cambios.
- Se pueden utilizar cualquier tipo de incentivos, sólo es cuestión de adecuar las ecuaciones.
- Los objetivos establecidos pueden ser variados.

Sin embargo, también existen desventajas de este tipo de metodología:

- El modelo de programación es altamente no lineal.
- El modelo matemático resultante es muy sensible ante variaciones en los valores de los parámetros, problemas con muchas ecuaciones resulta complicado computacionalmente hablando resolver.
- Difícil llegar a soluciones a cortos tiempos, tarda mucho en converger cuando el modelo matemático es muy grande.

- Se necesita gran cantidad de datos para la resolución de los problemas.
- Se hacen suposiciones en relación de que un individuo marca el comportamiento de todos los individuos de forma colectiva.

### **1.2.2 Incentivos económicos**

Un incentivo económico puede llegar a ser cualquier cosa que motiva a una persona a hacer algo. Si se trata de economía, se refiere a las motivaciones financieras para que las personas tomen ciertas acciones. Existen los incentivos intrínsecos y extrínsecos. Los primeros se refieren a la motivación de una persona de llegar a hacer algo por sí mismo, sin ningún tipo de presión o recompensa externa, por el simple hecho de tener sentimiento de realización personal y satisfacción por haber obtenido sus objetivos. En cambio, los incentivos extrínsecos están relacionados a obtener una recompensa material (dinero) por realizar una tarea, o amenazar con algún castigo por no realizarlo. Por definición, todos los incentivos económicos son motivadores extrínsecos.

El tipo más común de sistema de incentivos económicos es la nómina: un cheque de pago motiva a las personas a presentarse a trabajar y realizar sus funciones. Sin embargo, también existen otros tipos de estructuras de incentivos económicos [17].

1. Incentivos Fiscales. También llamados “beneficios fiscales”, son reducciones en los impuestos que hace el gobierno para fomentar el gasto en ciertos artículos o actividades. Los incentivos fiscales a menudo se citan como una excelente manera de fomentar el desarrollo económico. Un ejemplo de un incentivo fiscal corporativo es un gobierno que otorga exenciones fiscales a una empresa importante a cambio de que construya una oficina o planta en su ciudad. Este tipo de incentivo fiscal estimula la economía en esa zona al facultar a la empresa a proporcionar puestos de trabajo, así como a poner bienes o servicios a la venta.
2. Incentivos Financieros. Es un término más amplio que abarca cualquier beneficio monetario otorgado a un consumidor, empleador, corporación u organización para incentivarlos a hacer algo que de otro modo no harían. Para los empleados, un incentivo financiero podría incluir opciones sobre acciones o comisiones que fomenten ciertos tipos de trabajo. Para los clientes, un ejemplo de un incentivo financiero es un descuento, que fomenta más gastos con el pretexto de ahorrar.

3. Subsidios. Son programas de incentivos del gobierno que proporcionan cantidades fijas de dinero a las empresas para ayudarlas a crecer. Los subsidios agrícolas son comunes en los Estados Unidos, donde el gobierno federal otorga a los agricultores miles de millones de dólares tanto para cultivar más ciertos productos como para reducir su producción en épocas de excedentes. Evidentemente no son el único tipo de subsidio del gobierno de EUA, otros subsidios gubernamentales incluyen: petróleo, etanol, exportación, medio ambiente, vivienda y atención médica.
4. Reembolsos de impuestos. Las devoluciones de impuestos son incentivos para tomar ciertas acciones, como invertir en energía solar. En el caso de las devoluciones de impuestos de energía renovable, un gobierno estatal o local ofrece una cierta cantidad de dinero a los consumidores para comprar métodos más ecológicos para generar electricidad. Por ejemplo, una ciudad podría ofrecer a cualquier propietario que pague por instalar paneles solares en su techo un cheque por \$1,000.
5. Incentivos negativos. Castigan financieramente a las personas por realizar ciertas acciones. Esta es una forma de incentivar acciones específicas sin hacerlas obligatorias. Por ejemplo, en EUA la Ley del Cuidado de Salud a Bajo Precio se diseñó con un incentivo económico negativo incorporado llamado "mandato individual", que penaliza a cualquiera que no compre un seguro médico con una multa monetaria en el momento de la declaración de impuestos.

Los encargados de aplicar las políticas disponen de dos amplios tipos de instrumentos para modificar los hábitos de consumo y producción de la sociedad. Pueden usar enfoques regulatorios tradicionales (enfoques de comando y control) que establecen estándares específicos que deben cumplir los generadores de contaminación, o pueden usar incentivos económicos o políticas basadas en el mercado que dependan del mismo entorno para corregir el comportamiento del productor y el consumidor [18]. La definición de incentivos económicos es muy amplia y considera cualquier instrumento que proporcione incentivos continuos, financieros o de otro tipo para estimular a las partes responsables a reducir sus emisiones de contaminantes o hacer que sus productos sean menos contaminantes. En esencia, con los incentivos, las fuentes consideran que cada unidad de contaminación tiene un costo, mientras que con enfoques regulatorios más tradicionales, la contaminación puede ser gratuita o casi gratuita una vez que se han cumplido las normas. Estos incentivos brindan

recompensas monetarias o casi-monetarias por contaminar menos e imponen costos de varios tipos por contaminar más, proporcionando así la motivación necesaria a los contaminadores. Tal enfoque puede influir en el comportamiento contaminante de las pequeñas empresas, granjas y consumidores, todos los cuales son difíciles de abordar a través de las medidas tradicionales de mando y control. Los incentivos también se pueden utilizar para motivar a los contaminadores a mejorar los requisitos reglamentarios existentes [19].

### **1.3 ANTECEDENTES**

La quema de combustibles fósiles ha sido estudiada bajo numerosos escenarios debido al enorme impacto sobre el medio ambiente por las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas que dicho proceso ha generado. Los biocombustibles producidos a partir de recursos renovables, como plantas o desechos orgánicos, pueden ayudar a minimizar la quema de combustibles fósiles y mitigar la generación de emisiones de CO<sub>2</sub>, así como la dependencia de los combustibles fósiles [20]. Sin embargo, los combustibles fósiles y los biocombustibles tienen ventajas y desventajas; por ejemplo, las emisiones de CO<sub>2</sub> para el biodiesel son casi el 20% de las emisiones para el diésel de petróleo [21], también el consumo de agua para la producción de diésel [22] alcanza el 0.2% del agua requerida para la producción de biodiesel de soya [23]. A corto plazo, las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía están influenciadas por factores como el clima, los precios del combustible y las interrupciones en la generación de electricidad. Las emisiones de CO<sub>2</sub> están influenciadas por políticas para fomentar tecnologías de baja emisión, nuevas tecnologías que reducen costos y mejoran la eficiencia, ganancias de eficiencia del lado de la demanda y tendencias económicas como el perfil cambiante de las industrias manufactureras, el Producto Interno Bruto (PIB) y la población [24].

Es necesario un cambio amplio en el sistema energético mundial [25] y todos los sectores energéticos deberían encontrar formas de reducir y mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> para un mejor futuro [26]. Un impuesto al carbono puede reducir el uso de energía de origen fósil, mejorar la eficiencia energética y promover el desarrollo de energías renovables [27]. La fuga de carbono se refiere a la situación en la que, debido a los costos relacionados con las políticas climáticas, la industria de uso intensivo de energía puede trasladarse de países con controles

de carbono a países que no los tienen, y exportar sus productos de uso intensivo de energía a los países restringidos [28]. Es bien sabido que establecer un precio para la contaminación promueve a las empresas contaminantes a reducir sus emisiones mediante la compra de bienes y servicios de reducción [29]. Se han desarrollado programas para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y promover el desempeño ambiental sostenible para combustibles y biocombustibles [30], así como la utilización de la captura de carbono [31]. La comunidad mundial debe esperar el desarrollo de los países haciendo un mejor uso de los recursos. La solución se basa tanto en el aumento de los precios de los combustibles como en políticas gubernamentales (incluso globales) más eficaces que proporcionen más incentivos para las tecnologías de energía renovable y/o más impuestos sobre el consumo de combustibles fósiles [32].

Proporcionar incentivos económicos es un enfoque común para aumentar la motivación y el desempeño [33]. Por lo tanto, el desempeño de la empresa puede ser más efectivo si los incentivos se basan en una combinación de resultados financieros a corto plazo e indicadores de desempeño a largo plazo de la calidad del trabajo [34]. Los economistas suelen considerar que no se puede esperar un comportamiento apropiado de los sujetos a menos que se introduzca un esquema de pago basado en el desempeño [35], estas interacciones impactan en múltiples servicios (producción de alimentos y fibras, secuestro de carbono, provisión de agua dulce, hábitat para los habitantes locales, especies nativas), lo que tiene importantes implicaciones políticas [36]. Los incentivos económicos se han utilizado bajo diferentes conceptos, por ejemplo, para apoyar el crecimiento económico regional y evitar las importaciones [37]. Otro uso es el desarrollo de planes para la conservación del agua que establecen objetivos de reducción del uso y promueven acciones específicas de conservación del agua al incentivar a los usuarios [38]. La lógica de otorgar incentivos es para que el medio ambiente no se deteriore, al no utilizar agua dulce o al tratar el agua contaminada, es decir, se pretende que los incentivos se utilicen para mejoras ambientales. Se han desarrollado trabajos donde se demuestra que desde la perspectiva de la protección del medio ambiente ecológico, no solo se deben cobrar impuestos sobre los productos energéticos sino también sobre los recursos naturales como el recurso hídrico [39].

Dado que se trata del uso de incentivos para mejorar el sistema en estudio, es importante conocer el comportamiento de quienes participan en estos esquemas donde también existe la posibilidad de elegir. Es posible predecir el comportamiento de elección mediante una concatenación particular de escalas subjetivas [40]. Distintas leyes estudian el comportamiento de las personas, entre ellas se encuentra la matching law. La matching law es una teoría de la elección, una elección no es ni una decisión interna ni un resultado aislado de un proceso de decisión interno; más bien, una elección es una tasa de eventos abiertos que se distribuyen en el tiempo. El principio de matching es una aproximación para la respuesta de estado estacionario bajo el control del estímulo [41] y proporciona una descripción posterior razonable de la relación entre la asignación de respuesta y las entradas ambientales en una variedad de condiciones [42]. Puede entenderse en términos de dos funciones: una es cómo el comportamiento determina las recompensas; el otro es cómo las recompensas determinan el comportamiento [43]. Se ha demostrado que el comportamiento tiene un enorme impacto en las decisiones de planificación en las cadenas de suministro, especialmente cuando esas decisiones están relacionadas con inversiones a largo plazo [44]. Las interacciones de comportamiento entre las empresas intermediarias tienen un impacto importante en toda la cadena de suministro [45]. Incluir la distribución del comportamiento de acuerdo con la matching law en problemas más complejos como la planificación brinda otro enfoque para resolver problemas a gran escala [46]. Estudiar la preferencia de los involucrados en la planificación de problemas ayuda a predecir cuál será su comportamiento y cómo influye en todo el sistema. Es importante destacar que al utilizar la matching law, debe aplicarse en situaciones frecuentes, donde los incentivos/castigos económicos se cedan de forma continua (cada semana, cada mes, dependiendo sea el caso). Además, la relación presenta problemas al ser aplicada a problemas de gran escala de importancia social, es decir, matching law estima el comportamiento individual. Es por ello que es indispensable que el problema que se pretende resolver, se presenten varias opciones entre las cuales elegir. Una vez planteada la situación a abordar, se deben elegir las variables de forma correcta; es decir, que tengan impacto en los resultados finales. Así mismo, se requiere involucrar incentivos/castigos económicos que promuevan o estimulen el comportamiento de los que forman parte del sistema en estudio. Sin embargo, no es adecuado aplicar la matching law

cuando no es posible identificar los objetivos de forma clara y/o no se pueden presentar diferentes opciones a elegir.

Considerar el comportamiento de la población a través de la matching law permite al productor conocer las preferencias de los usuarios ante diversas propuestas y así poder predecir cuál será la reacción de todo el sistema ante la decisión que se tome. De esta forma, se ayuda al tomador de decisiones a determinar qué producto será el más atractivo para los consumidores; además, la matching law permite al gobierno conocer y comprender oportunamente el comportamiento de las personas ante diferentes problemáticas como el uso de energías alternativas y esto ayuda a la elección final del consumidor. Los casos de estudio que se abordaron en esta tesis, se acoplaron para poder ser utilizados, es decir, los modelos matemáticos se desarrollaron en función de los intereses ambientales y económicos requeridos. Para resolver el problema es importante identificar las variables a mejorar, se deben proponer objetivos que se tienen que cumplir para que en base a eso, los participantes tengan estímulo económico y los resultados obtenidos sean mejores. Sin embargo, Los resultados están relacionadas a la cantidad de incentivo que se propone, sin ser necesariamente el valor óptimo de incentivo. Además de que los resultados que se presentan son propiamente para los parámetros utilizados. Es importante comentar que la matching law se ha utilizado especialmente en problemas sociales, relacionado a cómo los humanos reaccionan en un partido de beisbol, las decisiones que se tomarían en una partida de ajedrez, la manera en responder exámenes bajo estímulos; en cuestión de animales, los caminos que estos elegirían de acuerdo a los incentivos que se les presenten en un laberinto. En cuestiones ingenieriles no se le ha dado especial interés; es por ello la novedad de la tesis propuesta, utilizar herramientas de comportamiento en problemas aplicados a ingeniería donde los involucrados en el sistema de estudio provocan cambios de acuerdo a los incentivos y/o castigos que se otorgan. Además, los analistas de comportamiento pueden usar técnicas de ciencia de datos para extender los análisis cuantitativos de comportamiento de nivel individual al nivel de población centrado en dominios de relevancia social. [47] Aunque la matching law explica muy bien la elección en una variedad de contextos, se desconoce la generalidad de la matching law para todos los individuos de una población. Es decir, ningún estudio conocido ha utilizado la matching law para describir el comportamiento individual de todos los individuos de una población. Esto se debe probablemente a que los datos de cada

individuo de la población históricamente no han estado disponibles o porque las limitaciones de tiempo y computacionales hicieron prohibitivos los análisis a nivel de población. [47] Se ha utilizado ciencia de datos en conjunto con matching law para determinar el comportamiento de los involucrados y se determinó que los parámetros estimados para cada individuo deberían relacionarse de alguna manera con medidas de buen o mal desempeño. Destacando que a través de la tesis propuesta aseguramos que el desempeño es mejorado a través del esquema de incentivos económicos considerado. La ciencia de datos permite a los investigadores y profesionales combinar los beneficios de los métodos dentro del involucrado con una comprensión de las distribuciones de población para los comportamientos de interés.

Es necesario plantear una correcta planificación desde la obtención de la materia prima hasta el consumidor final para lograr una mejor gestión de todos los componentes involucrados. La planificación es una herramienta que se ha utilizado porque considera los aspectos más importantes en los problemas estudiados, dando como resultado una mejor organización y es fundamental tener en cuenta el punto de vista económico [48]. A través de la optimización de la cadena de suministro, es posible encontrar mejores ganancias en los problemas involucrados considerando la producción, el almacenamiento y el transporte para maximizar las ganancias [49]. Además, la planificación es una forma de exploración que se puede adoptar para mostrar futuros plausibles [50]. Resolver el problema de programación en un horizonte más corto y establecer una comunicación entre planificadores y programadores a través de políticas de inventario conduce a nuevos modelos integrados de planificación y programación.

## **1.4 OBJETIVOS**

Los objetivos de esta tesis se describen a continuación:

### **1.4.1 Objetivo general**

- Desarrollar estrategias para la planificación de combustibles fósiles y biocombustibles que tome en cuenta el comportamiento de los involucrados en la cadena de suministro bajo esquemas de incentivos y castigos económicos aplicado a diferentes casos de estudio.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Proponer modelos matemáticos que sean capaces de planificar el sistema energético considerando combustibles fósiles y biocombustibles.
- Implementar esquemas de incentivos y castigos económicos que promuevan el uso de biocombustibles.
- Implementar esquemas económicos que provoquen la disminución del uso de combustibles fósiles.
- Incluir relaciones que permitan analizar el comportamiento de las partes que pueden afectar el sistema energético como son los tomadores de decisiones, los productores y/o los consumidores.

### **1.5 JUSTIFICACIÓN**

Actualmente en el área de optimización no se han abordado temas de planificación estratégica en conjunto con esquemas de incentivos donde se involucre satisfacer las demandas de energía a través de combustibles fósiles y biocombustibles. Es por eso que es necesario desarrollar una herramienta que sea capaz de incorporar la planificación, las cadenas de suministro, esquemas de incentivos y a su vez, estudiar la manera en cómo los que están involucrados afectan al sistema en cuestión. Es decir, conocer las preferencias a través del uso de incentivos económicos. De igual manera se busca promover el uso de energías alternas, de reducir emisiones y de promover el reúso de los recursos.

### **1.6 HIPÓTESIS**

El uso de esquemas de incentivos económico en conjunto de la matching law para promover y determinar la preferencia entre las opciones disponibles, es una nueva metodología que se pretende emplear para encontrar mejores planificaciones en la gestión de biocombustibles y combustibles fósiles, mejorando así los costos asociados e impactos negativos al ambiente.

## **1.7 METODOLOGÍA**

La metodología que sigue cada capítulo en estudio se presenta a continuación.

1. Identificar el problema
2. Proponer una superestructura donde se consideren todas las posibles soluciones
3. Desarrollar un modelo matemático
4. Establecer las variables y parámetros requeridos
5. Obtener información de los valores
6. Modelar en el programa de GAMS
7. Recabar las soluciones óptimas hasta que los valores sean coherentes

## **CAPÍTULO DOS**

### **INVOLUCRANDO INCENTIVOS ECONÓMICOS EN LA OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE METANOL CONSIDERANDO RECURSOS CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES**

#### **2.a Resumen**

Recientes descubrimientos de reservas importantes de gas natural y gas shale han promovido el crecimiento en la producción de metanol a partir de gas natural. Dicho aumento implica el desarrollo de infraestructuras y cadenas de suministro fiables. Se presenta un modelo de programación matemática para la planificación estratégica de las cadenas de suministro de metanol para satisfacer las demandas regionales. Para fomentar la utilización de los recursos locales, se incluye el uso de incentivos económicos. Además, se estudia la incertidumbre asociada al costo unitario de venta, a la oferta del gas natural y la demanda del metanol. Se incluyen varios objetivos de sostenibilidad como minimizar las emisiones de CO<sub>2</sub> y maximizar las ganancias. Para ilustrar la aplicabilidad de la metodología desarrollada, se resolvió un caso de estudio de México con dos esquemas: el esquema A donde no se considera incertidumbre ni incentivos económicos y el esquema B donde se considera incertidumbre, incentivos económicos y restricciones relacionadas a la importación de metanol. Los resultados muestran que al incentivar la producción nacional de nuevas plantas de metanol, los valores generados son hasta 113% mejores que si se utilizara solamente la importación y la producción de la única planta existente en México.

## 2.1 Planteamiento del problema

El problema abordado en este capítulo se define de la siguiente manera: Existe una determinada región con producción establecida de gas natural ( $G_{m,un,t}^{NG-mark}$ ) que se utiliza para satisfacer las demandas de cada mercado  $m$ , dados diferentes campos ( $f, fo, fca, fcn$ ) para extracción convencional ( $G_{fca,un,t}^{cea}, G_{fcn,un,t}^{cenoa}$ ) y no convencional ( $G_{f,un,t}^{shale}, G_{fo,un,t}^{off}$ ) de gas natural, diferentes proveedores  $p$  de gas natural importado ( $G_{p,un,t}^{imp}$ ); además de considerar el gas natural necesario para producir metanol ( $G_{fa,un,t}^{NG-fa}$ ) para cada planta de producción  $fa$ . Así mismo se cuenta con una disponibilidad específica de fuentes de agua para la producción de gas natural ( $W_{f,un,t}^{shale}, W_{fo,un,t}^{sea-off}, w_{fca,un,t}^{fresh-acon}, w_{fcn,un,t}^{fresh-nacon}$ ). Se debe satisfacer la demanda de metanol ( $M_{c,un,t}^{market}$ ) para cada mercado de metanol  $c$ , la cual puede satisfacerse a través de la importación ( $M_{s,un,t}^{imp}$ ) de cada proveedor  $s$ , de la producción de plantas de metanol existentes ( $M_{ep,un,t}^{exis}$ ) para cada planta existente  $ep$  y la instalación de nuevas plantas productivas ( $M_{fa,un,t}$ ). Es importante destacar que los cálculos que se hacen están referidos a un periodo de tiempo  $t$  en años. También se considera la incertidumbre asociada a la disponibilidad de gas natural, a la demanda de metanol, así como a los costos unitarios de gas natural ( $US_{un,t}^{NG}$ ) y metanol ( $US_{un,t}^M$ ). Se cuantifica la generación de  $CO_2$  ( $TE_{un}$ ) para cada uno de los procesos involucrados.

El problema consiste en determinar las configuraciones y operaciones óptimas para satisfacer la demanda de metanol y gas natural en una determinada región considerando los costos asociados al tratamiento, producción y distribución tanto de gas natural como de metanol, además de la venta de gas natural ( $Sale_{un}^{NG}$ ), petróleo ( $Sale_{un}^{PET}$ ), y metanol ( $Sale_{un}^M$ ); así como promover la producción nacional de metanol a través de incentivos económicos en instalaciones existentes y nuevas ( $IE_{fa,un,t}, IE_{ep,un,t}^{ex}$ ). Se tienen como funciones objetivo maximizar las ganancias (Profit), minimizar el consumo de agua dulce (TFW) y minimizar las emisiones totales (TE).

## 2.2 Modelo

El modelo matemático propuesto se basa en la superestructura que se muestra en la **Figura 2.1**, la cual representa el problema e involucra todas las posibilidades para resolverlo. Se consideran diferentes formas convencionales y no convencionales de producción de gas natural, las cuales toman en cuenta la extracción, tratamiento y distribución; así mismo, el gas natural se utiliza para producir metanol, este metanol se puede obtener a partir de las plantas existentes, de nuevas instalaciones de producción o por importación. El metanol obtenido se distribuye a diferentes mercados. Se debe cubrir la demanda de gas natural y metanol, además se consideran los costos asociados a la producción, tratamiento y distribución, así como el consumo de agua dulce y las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente a la atmósfera.

En trabajos anteriores, se ha reportado la planeación estratégica asociada a las cadenas de suministro de gas natural; sin embargo, no se ha abordado toda la cadena de suministro de metanol. Por lo tanto, este capítulo presenta un modelo de programación matemática para la optimización de la cadena completa de suministro asociada con la producción de metanol. El modelo matemático para la cadena de suministro de gas natural es similar al presentado por Villicaña-García y Ponce-Ortega [51] que toma en cuenta la extracción y tratamiento de gas natural a partir de maneras no convencionales como el gas shale y la extracción en aguas profundas, así como formas convencionales de gas natural asociado y no asociado, además de la importación de gas natural. La siguiente sección presenta las relaciones asociadas con la cadena de suministro del metanol.

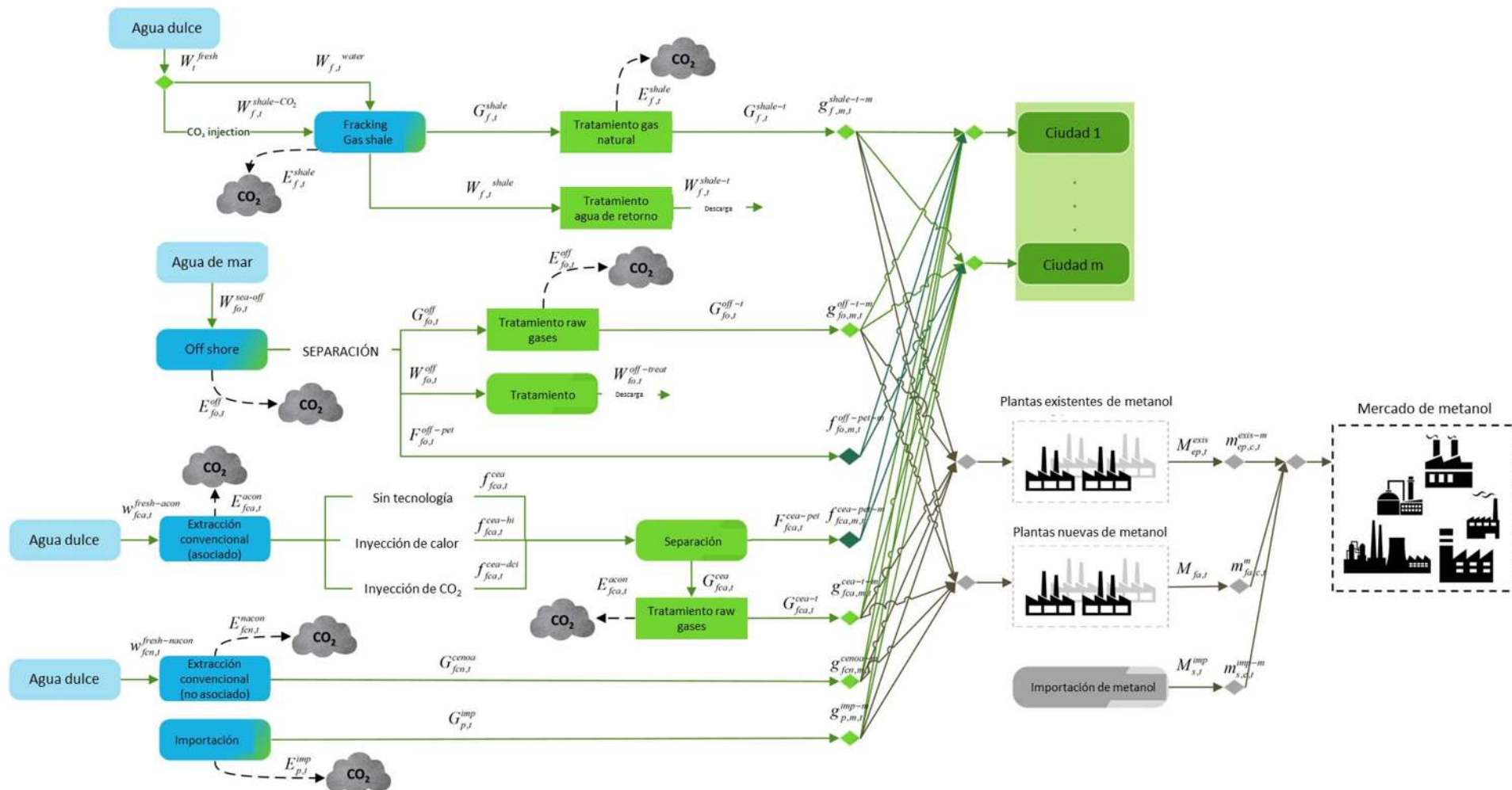


Figura 2.1. Superestructura propuesta

## 2.2.1 Gas natural total

### 2.2.1.1 Distribución a mercados

El gas natural tratado ( $G_{fi,e,un,t}^t$ ) en cada campo de extracción  $fi$  obtenido por shale, offshore, asociado y no asociado  $e$ , puede ser distribuido en diferentes mercados ( $g_{fi,e,m,un,t}^{t-mark}$ ) hacia las ciudades  $m$  y hacia las instalaciones  $fa$  que producen metanol  $g_{fi,e,fa,un,t}^{t-met}$ .

$$G_{fi,e,un,t}^t = \sum_m g_{fi,e,m,un,t}^{t-mark} + \sum_{fa} g_{fi,e,fa,un,t}^{t-met}, \forall fi, \forall e, \forall un, \forall t \quad (1)$$

Asimismo, el gas natural tratado importado ( $G_{p,un,t}^{imp}$ ) se distribuye hacia los diferentes mercados ( $g_{p,m,un,t}^{imp-mark}$ ,  $g_{p,fa,un,t}^{imp-met}$ ).

$$G_{p,un,t}^{imp} = \sum_m g_{p,m,un,t}^{imp-mark} + \sum_{fa} g_{p,fa,un,t}^{imp-met}, \forall p, \forall un, \forall t \quad (2)$$

### 2.2.1.2 Gas natural en cada mercado

El gas natural es necesario en las ciudades ( $G_{m,un,t}^{NG-mark}$ ) y para producir metanol ( $G_{fa,un,t}^{NG-fa}$ ); en el caso del gas natural necesario para las ciudades, puede satisfacerse a través de gas shale tratado ( $g_{f,m,un,t}^{shale-t-mark}$ ), gas natural tratado proveniente de aguas profundas ( $g_{fo,m,un,t}^{off-t-mark}$ ) o de extracción convencional asociada ( $g_{fca,m,un,t}^{cea-t-mark}$ ), por extracción convencional no asociada ( $g_{fcn,m,un,t}^{cenoa-mark}$ ) y por importaciones ( $g_{p,m,un,t}^{imp-mark}$ ).

$$G_{m,un,t}^{NG-mark} = \sum_f g_{f,m,un,t}^{shale-t-mark} + \sum_{fo} g_{fo,m,un,t}^{off-t-mark} + \sum_{fca} g_{fca,m,un,t}^{cea-t-mark} + \sum_{fcn} g_{fcn,m,un,t}^{cenoa-mark} + \sum_p g_{p,m,un,t}^{imp-mark}, \forall m, \forall un, \forall t \quad (3)$$

Lo mismo aplica para el gas natural  $G_{fa,un,t}^{NG-fa}$  para producir metanol.

$$G_{fa,un,t}^{NG-fa} = \sum_f g_{f,fa,un,t}^{shale-t-met} + \sum_{fo} g_{fo,fa,un,t}^{off-t-met} + \sum_{fca} g_{fca,fa,un,t}^{cea-t-met} + \sum_{fcn} g_{fcn,fa,un,t}^{cenoa-met} + \sum_p g_{p,fa,un,t}^{imp-met}, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (4)$$

### 2.2.1.3 Costo de transporte

El costo de transporte para la distribución del gas natural ( $Cost_{un}^{transp-ng}$ ) a los diferentes mercados para el caso de enviar el gas natural a las ciudades  $m$  se calcula con el costo unitario de transporte ( $UTC_{f,m}^{tran-shale}$ ) multiplicado por la distancia del punto de extracción al mercado ( $d_{f,m}^{shale}$ ) y multiplicado por el flujo de gas natural obtenido ( $g_{f,m,un,t}^{shale-t-mark}$ ), ya sea por extracción de gas shale, por extracción en aguas profundas, extracción convencional asociado y no asociado e importaciones, sumando además el costo de transportar el gas natural a las instalaciones  $fa$  para producir metanol.

$$Cost_{un}^{transp-ng} = \sum_m \sum_t \left[ \begin{aligned} & \sum_f UTC_{f,m}^{tran-shale} \cdot d_{f,m}^{shale} \cdot g_{f,m,un,t}^{shale-t-mark} \\ & + \sum_{fo} (UTC_{fo,m}^{off} \cdot d_{fo,m}^{off} + UTC_{fo,m}^{off-sea} \cdot d_{fo,m}^{off-sea}) \cdot g_{fo,m,un,t}^{off-t-mark} \\ & + \sum_{fca} UTC_{fca,m}^{cea} \cdot d_{fca,m}^{cea} \cdot g_{fca,m,un,t}^{cea-t-mark} + \sum_{fcn} UTC_{fcn,m}^{cenoa} \cdot d_{fcn,m}^{cenoa} \cdot g_{fcn,m,un,t}^{cenoa-mark} \\ & + \sum_p UTC_{p,m}^{imp} \cdot d_{p,m}^{imp} \cdot g_{p,m,un,t}^{imp-mark} \end{aligned} \right] + \sum_{fa} \sum_t \left[ \begin{aligned} & \sum_f UTC_{f,fa}^{tran-shale-m} \cdot d_{f,fa}^{shale-m} \cdot g_{f,fa,un,t}^{shale-t-met} \\ & + \sum_{fo} (UTC_{fo,fa}^{off-m} \cdot d_{fo,fa}^{off-m} + UTC_{fo,fa}^{off-sea-m} \cdot d_{fo,fa}^{off-sea-m}) \cdot g_{fo,fa,un,t}^{off-t-met} \\ & + \sum_{fca} UTC_{fca,fa}^{cea-m} \cdot d_{fca,fa}^{cea-m} \cdot g_{fca,fa,t}^{cea-t-met} + \sum_{fcn} UTC_{fcn,fa}^{cenoa-m} \cdot d_{fcn,fa}^{cenoa-m} \cdot g_{fcn,fa,un,t}^{cenoa-met} \\ & + \sum_p UTC_{p,fa}^{imp-m} \cdot d_{p,fa}^{imp-m} \cdot g_{p,fa,un,t}^{imp-met} \end{aligned} \right], \forall un \quad (5)$$

### 2.2.1.4 Venta de gas natural

El gas natural que se obtiene es vendido ( $Sale_{un}^{NG}$ ), esta venta se calcula multiplicando el precio unitario de venta ( $US_{un,t}^{NG}$ ) por el flujo de gas natural requerido ( $G_{m,un,t}^{NG-mark} + G_{fa,un,t}^{NG-fa}$ ).

$$Sale_{un}^{NG} = \sum_t \left[ US_{un,t}^{NG} \cdot \left( \sum_m G_{m,un,t}^{NG-mark} + \sum_{fa} G_{fa,un,t}^{NG-fa} \right) \right], \forall un \quad (6)$$

## 2.2.2 Plantas nuevas de metanol

### 2.2.2.1 Producción de metanol

La producción de metanol  $M_{fa,un,t}$  se debe determinar en función del gas natural  $G_{fa,un,t}^{NG-fa}$  enviado a cada instalación  $fa$  multiplicado por un factor de conversión  $\sigma$  ( $m^3$  de metanol por  $m^3$  de gas natural).

$$M_{fa,un,t} = \sigma \cdot G_{fa,un,t}^{NG-fa}, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (7)$$

### 2.2.2.2 Activación de la localización de nuevas plantas de metanol

La capacidad de la instalación  $M_{fa,un}^{cap}$  no puede ser superior a la producción máxima de metanol  $M_{fa}^{MAX}$ . Para determinar la existencia de una nueva planta de metanol, se multiplica una variable binaria  $y_{fa,un}^m$  por la capacidad máxima permitida.

$$M_{fa,un}^{cap} \leq M_{fa}^{MAX} \cdot y_{fa,un}^m, \forall fa, \forall un \quad (8)$$

Asimismo, es necesario conocer el flujo máximo de metanol  $M_{fa,un,t}$  que servirá como capacidad requerida para la instalación  $M_{fa,un}^{cap}$ .

$$M_{fa,un}^{cap} \geq M_{fa,un,t}, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (9)$$

### 2.2.2.3 Costo de producción

El costo de producción de las nuevas instalaciones de metanol  $Cost_{un}^{m-prod}$  se calcula a través del costo de operación  $UOC_{fa}^m \cdot M_{fa,un,t}$  más el costo de capital  $a^m \cdot y_{fa,un}^m + b^m (M_{fa,un}^{cap})^{\epsilon^m}$ .

$$Cost_{un}^{m-prod} = \sum_{fa} \left[ \sum_t UOC_{fa}^m \cdot M_{fa,un,t} + k_F \cdot \left( a^m \cdot y_{fa,un}^m + b^m (M_{fa,un}^{cap})^{\epsilon^m} \right) \right], \forall un \quad (10)$$

### 2.2.3 Costos de operación para las plantas existentes de metanol

El costo de producción  $Cost_{un}^{m-exis}$  se calcula multiplicando el costo unitario  $UOC_{ep}^{m-exis}$  por el flujo de metanol  $M_{ep,un,t}^{exis}$ .

$$Cost_{un}^{m-exis} = \sum_{ep} \sum_t UOC_{ep}^{m-exis} \cdot M_{ep,un,t}^{exis}, \forall un \quad (11)$$

Asimismo, la producción  $M_{ep,un,t}^{exis}$  no podrá ser superior a la capacidad máxima  $M_{ep}^{maxcap}$  de la planta existente.

$$M_{ep,un,t}^{exis} \leq M_{ep}^{maxcap}, \forall ep, \forall un, \forall t \quad (12)$$

### 2.2.4 Costo de importación de metanol

El costo de importación  $Cost_{un}^{m-imp}$  se determina a partir de los costos de operación  $UOC_s^{m-imp} \cdot M_{s,un,t}^{imp}$ .

$$Cost_{un}^{m-imp} = \sum_s \sum_t UOC_s^{m-imp} \cdot M_{s,un,t}^{imp}, \forall un \quad (13)$$

### 2.2.5 Distribución de metanol

El metanol producido por las instalaciones nuevas  $M_{fa,un,t}$ , la importación  $M_{s,un,t}^{imp}$  y las plantas existentes  $M_{ep,un,t}^{exis}$  puede ser enviado a diferentes mercados para cada caso ( $m_{fa,c,un,t}^m$ ,  $m_{s,c,un,t}^{imp-m}$ ,  $m_{ep,c,un,t}^{exis-m}$ ).

$$M_{fa,un,t} = \sum_c m_{fa,c,un,t}^m, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (14)$$

$$M_{s,un,t}^{imp} = \sum_c m_{s,c,un,t}^{imp-m}, \forall s, \forall un, \forall t \quad (15)$$

$$M_{ep,un,t}^{exis} = \sum_c m_{ep,c,un,t}^{exis-m}, \forall ep, \forall un, \forall t \quad (16)$$

El metanol producido  $M_{un,t}^{market}$  es enviado a los diferentes mercados  $m_{m,c,un,t}^{market}$ .

$$M_{c,un,t}^{market} = \sum_{fa} m_{fa,c,un,t}^m + \sum_s m_{s,c,un,t}^{imp-m} + \sum_{ep} m_{ep,c,un,t}^{exis-m}, \forall c, \forall un, \forall t \quad (17)$$

## 2.2.6 Costo de transporte de metanol

El costo de transporte de metanol  $Cost_{un}^{transp-met}$  para el caso de las nuevas instalaciones se determinar multiplicando el costo unitario de transporte  $UTC_{fa,c}^{mc}$  por la distancia  $d_{fa,c}^{mc}$  entre la instalación de producción al mercado que requiere metanol y el flujo de metanol enviado  $m_{fa,c,un,t}^m$ ; también se considera el transporte asociado a la importación y las plantas existentes.

$$Cost_{un}^{transp-met} = \sum_c \sum_t \left[ \begin{aligned} &\sum_{fa} UTC_{fa,c}^{mc} \cdot d_{fa,c}^{mc} \cdot m_{fa,c,un,t}^m \\ &+ \sum_s UTC_{s,c}^{imp-mc} \cdot d_{s,c}^{imp-mc} \cdot m_{s,c,un,t}^{imp-m} \\ &+ \sum_{ep} UTC_{ep,c}^{exis-mc} \cdot d_{ep,c}^{exis-mc} \cdot m_{ep,c,un,t}^{exis-m} \end{aligned} \right], \forall un \quad (18)$$

## 2.2.7 Venta de metanol

La venta de metanol  $Sale_{un}^M$  se calcula multiplicando el precio de venta unitario  $US_{un,t}^M$  por el metanol requerido  $M_{c,un,t}^{market}$ .

$$Sale_{un}^M = \sum_t \left[ US_{un,t}^M \cdot \sum_c M_{c,un,t}^{market} \right], \forall un \quad (19)$$

## 2.2.8 Ganancia

La ganancia ( $Profit_{un}$ ) se obtiene con la suma de la venta de petróleo, gas natural y metanol, más los incentivos económicos para producir metanol ( $IE_{un}$ ) menos todos los gastos involucrados.

$$Profit_{un} = \left[ \begin{aligned} &Sale_{un}^{PET} + Sale_{un}^{NG} + Sale_{un}^M + TIE_{un} - Cost_{un}^{shale-prod} - Cost_{un}^{fresh-shale} - Cost_{un}^{treatment-shale} \\ &- Cost_{un}^{off-prod} - Cost_{un}^{seawater} - Cost_{un}^{treatment-off} - Cost_{un}^{cea-prod} - Cost_{un}^{fresh-acon} - Cost_{un}^{treatment-cea} \\ &- Cost_{un}^{cenoa-prod} - Cost_{un}^{fresh-nacon} - Cost_{un}^{imp} - Cost_{un}^{pet} - Cost_{un}^{transp-pet} - Cost_{un}^{transp-ng} \\ &- Cost_{un}^{m-prod} - Cost_{un}^{m-exis} - Cost_{un}^{m-imp} - Cost_{un}^{transp-met} \end{aligned} \right], \forall un \quad (20)$$

## 2.2.9 Agua dulce total

El total de agua dulce utilizada ( $TFW_{un}$ ) es la suma de cada flujo de agua necesario en la producción de gas shale, producción convencional asociada y producción convencional no asociada.

$$TFW_{un} = \sum_f \sum_t W_{f,un,t}^{shale} + \sum_{fca} \sum_t w_{fca,un,t}^{fresh-acon} + \sum_{fcn} \sum_t w_{fcn,un,t}^{fresh-nacon}, \forall un \quad (21)$$

### 2.2.10 Emisiones totales

Las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas ( $E_{fi,e,un,t}$ ) en cada campo  $fi$  se determinan al multiplicar el factor  $\beta_e$  que involucra los m<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub> generados por m<sup>3</sup> de gas natural producido, por el flujo de gas natural obtenido ( $G_{fi,e,un,t}$ ) y las emisiones generadas debido al tratamiento del gas natural ( $\beta_e^t \cdot G_{fi,e,un,t}^t$ ). Se calcula para cada proceso de extracción  $e$  ( $e$ = gas shale, de aguas profundas y procesos asociados al gas natural; cuando  $e$ = gas natural no asociado,  $\beta_e^t \cdot G_{fi,e,un,t}^t = 0$ ).

$$E_{fi,e,un,t} = \beta_e \cdot G_{fi,e,un,t} + \beta_e^t \cdot G_{fi,e,un,t}^t, \forall fi, \forall e, \forall un, \forall t \quad (22)$$

Asimismo, la importación del gas natural implica emisiones de CO<sub>2</sub> ( $E_{p,un,t}^{imp}$ ) (en las estaciones de bombeo), según la cantidad de gas natural transportado ( $G_{p,un,t}^{imp}$ ) multiplicado por un factor  $\beta^{imp}$  para cada proveedor  $p$ .

$$E_{p,un,t}^{imp} = \beta^{imp} \cdot G_{p,un,t}^{imp}, \forall p, \forall un, \forall t \quad (23)$$

También se consideran las emisiones en las nuevas plantas de metanol  $E_{fa,un,t}^{nm}$ , relacionadas a la importación  $E_{s,un,t}^{imp}$  y asociadas a la producción actual de metanol  $E_{ep,un,t}^{exis}$ .

$$E_{fa,un,t}^{nm} = \sum_c \beta_{fa,c}^{nm} \cdot M_{fa,un,t}, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (24)$$

$$E_{s,un,t}^{imp} = \sum_c \beta_{s,c}^{imp} \cdot M_{s,un,t}, \forall s, \forall un, \forall t \quad (25)$$

$$E_{ep,un,t}^{exis} = \sum_c \beta_{ep,c}^{exis} \cdot M_{ep,un,t}, \forall ep, \forall un, \forall t \quad (26)$$

Las emisiones totales ( $TE_{un}$ ) son la suma de las emisiones generadas en cada proceso involucrado.

$$TE_{un} = \sum_t \left[ \begin{aligned} & \sum_f E_{f,un,t}^{shale} + \sum_{fo} E_{fo,un,t}^{off} + \sum_{fca} E_{fca,un,t}^{acon} + \sum_{fcn} E_{fcn,un,t}^{nacon} + \sum_p E_{p,un,t}^{imp} \\ & + \sum_{fa} E_{fa,un,t}^{nm} + \sum_s E_{s,un,t}^{imp} + \sum_{ep} E_{ep,un,t}^{exis} \end{aligned} \right], \forall un \quad (27)$$

### 2.2.11 Incentivos económicos para la producción de metanol

Con la intención de incentivar la producción local o nacional de metanol y evitar la dependencia externa a través de las importaciones, en este capítulo se considera una estrategia basada en incentivos económicos. En este sentido, se implementa el esquema de incentivos Gonik-IBM en la cadena de suministro de metanol propuesta (Control de incentivos económicos para agentes [52]). Este proceso consiste en establecer un nivel de producción razonable, alto y confiable de cumplir  $M_{fa,t}^p$ , que cada nueva planta se compromete a alcanzar. Así, también se debe determinar un objetivo de producción de metanol ( $M_{fa,t}^o$ ), este debe ser diferente para cada nueva planta ya que dependerá de la ubicación geográfica, así como de las demandas de cada zona. Además, se establece un determinado incentivo base  $IE^p$  que es igual para todas las plantas productivas. Se fijan los parámetros  $u$ ,  $v$  y  $x$ . Se consideran tres casos, el primero es cuando la producción de metanol es igual a la producción de metanol esperada y de esta forma se obtiene el incentivo base; el segundo caso es cuando la producción supera la producción esperada y se recompensa con un incentivo mayor al incentivo base; y el tercer caso es cuando no se alcanza la producción

esperada y por lo tanto se obtiene una penalización económica por no haber alcanzado ese objetivo.

Se utiliza una disyunción para modelar los tres casos mencionados anteriormente. Se recurre a variables booleanas que permiten seleccionar sólo uno de los casos disponibles. Para nuevas plantas de metanol se formula de la siguiente manera.

$$\left[ \begin{array}{l} Y_{A_{un,t}}^{inc} \\ M_{fa,un,t} = M_{fa,t}^p \\ IE_{fa,un,t} = IE^p \cdot u \cdot \frac{M_{fa,t}^p}{M_{fa,t}^o} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{B_{un,t}}^{inc} \\ M_{fa,un,t} > M_{fa,t}^p \\ IE_{fa,un,t} = IE^p \cdot x \cdot \frac{(M_{fa,un,t} + M_{fa,t}^p)}{2 \cdot M_{fa,t}^o} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{C_{un,t}}^{inc} \\ M_{fa,un,t} < M_{fa,t}^p \\ IE_{fa,un,t} = IE^p \cdot v \cdot \frac{(3 \cdot M_{fa,un,t} - M_{fa,t}^p)}{2 \cdot M_{fa,t}^o} \end{array} \right], \forall fa, \forall un, \forall t \quad (28)$$

La disyunción reformulada mediante un conjunto de relaciones algebraicas es la siguiente (ver, Ponce-Ortega y col. [53]).

$$y_{A_{un,t}}^{inc} + y_{B_{un,t}}^{inc} + y_{C_{un,t}}^{inc} = 1, \forall un, \forall t \quad (29)$$

$$M_{fa,un,t} = M_{fa,un,t}^1 + M_{fa,un,t}^2 + M_{fa,un,t}^3, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (30)$$

$$IE_{fa,un,t} = IE_{fa,un,t}^1 + IE_{fa,un,t}^2 + IE_{fa,un,t}^3, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (31)$$

$$M_{fa,un,t}^1 = M_{fa,t}^p \cdot y_{A_{un,t}}^{inc}, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (32)$$

$$IE_{fa,un,t}^1 = IE^p \cdot u \cdot \frac{M_{fa,t}^p}{M_{fa,t}^o} \cdot y_{A_{un,t}}^{inc}, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (33)$$

$$M_{fa,un,t}^2 \geq (M_{fa,t}^p - \delta) \cdot y_{B_{un,t}}^{inc}, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (34)$$

$$IE_{fa,un,t}^2 = IE^p \cdot x \cdot \frac{(M_{fa,un,t}^2 + M_{fa,t}^p \cdot y_{B_{un,t}}^{inc})}{2 \cdot M_{fa,t}^o}, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (35)$$

$$M_{fa,un,t}^3 \leq (M_{fa,t}^p + \delta) \cdot y_{C_{un,t}}^{inc}, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (36)$$

$$IE_{fa,un,t}^3 = IE^p \cdot v \cdot \frac{(3 \cdot M_{fa,un,t}^3 - M_{fa,t}^p \cdot y_{C_{un,t}}^{inc})}{2 \cdot M_{fa,t}^o}, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (37)$$

$$M_{fa,un,t}^1 \leq M_{fa}^{MAX} \cdot y_{A_{un,t}}^{inc}, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (38)$$

$$M_{fa,un,t}^2 \leq M_{fa}^{MAX} \cdot y_{B_{un,t}}^{inc}, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (39)$$

$$M_{fa,un,t}^3 \leq M_{fa}^{MAX} \cdot y_{C_{un,t}}^{inc}, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (40)$$

$$IE_{fa,un,t}^1 \leq IE^{MAX} \cdot y_{A_{un,t}}^{inc}, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (41)$$

$$IE_{fa,un,t}^2 \leq IE^{MAX} \cdot y_{B_{un,t}}^{inc}, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (42)$$

$$IE_{fa,un,t}^3 \leq IE^{MAX} \cdot y_{C_{un,t}}^{inc}, \forall fa, \forall un, \forall t \quad (43)$$

La disyunción que corresponde a las plantas de metanol existentes es la que se muestra a continuación.

$$\left[ \begin{array}{l} Y_{A_{un,t}}^{inc-ex} \\ M_{ep,un,t}^{exis} = M_{ep,t}^{exisp} \\ IE_{ep,un,t}^{ex} = IE^p \cdot u \cdot \frac{M_{ep,t}^{exisp}}{M_{ep,t}^{exiso}} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{B_{un,t}}^{inc-ex} \\ M_{ep,un,t}^{exis} > M_{ep,t}^{exisp} \\ IE_{ep,un,t}^{ex} = IE^p \cdot x \cdot \frac{(M_{ep,un,t}^{exis} + M_{ep,t}^{exisp})}{2 \cdot M_{ep,t}^{exiso}} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{C_{un,t}}^{inc-ex} \\ M_{ep,un,t}^{exis} < M_{ep,t}^{exisp} \\ IE_{ep,un,t}^{ex} = IE^p \cdot v \cdot \frac{(3 \cdot M_{ep,un,t}^{exis} - M_{ep,t}^{exisp})}{2 \cdot M_{ep,t}^{exiso}} \end{array} \right], \forall ep, \forall un, \forall t \quad (44)$$

Los incentivos económicos totales ( $TIE_{un}$ ) corresponden a la suma de incentivos en nuevas instalaciones ( $IE_{fa,un,t}$ ) más los incentivos en plantas existentes ( $IE_{ep,un,t}^{ex}$ ).

$$TIE_{un} = \sum_{fa} \sum_t IE_{fa,un,t} + \sum_{ep} \sum_t IE_{ep,un,t}^{ex}, \forall un \quad (45)$$

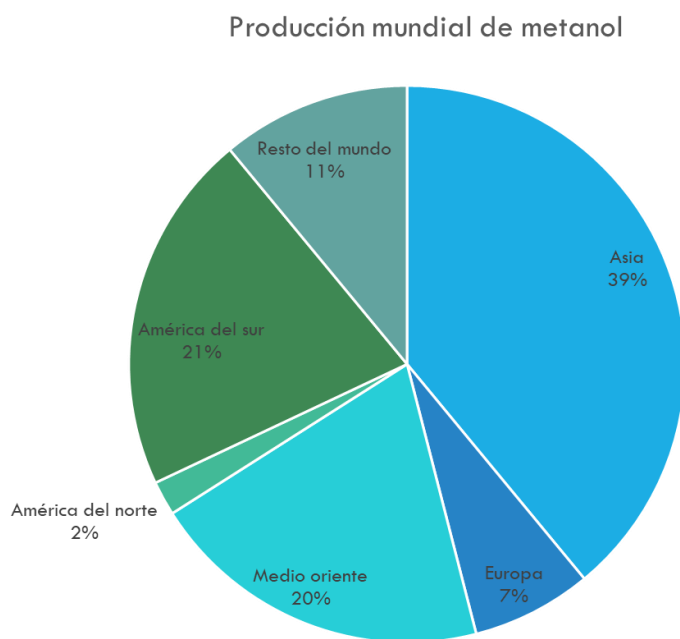
### 2.2.12 Funciones objetivo

La formulación del modelo de programación matemático es un problema multiobjetivo, donde se busca maximizar la ganancia, minimizar el consumo de agua dulce y minimizar las emisiones totales.

$$\text{ObjectiveFunction} = \text{MaxProfit}; \text{MinTFW}; \text{MinTE} \quad (46)$$

### 2.3 Caso de estudio

La industria del metanol está presente en todo el mundo (**Figura 2.2**). Hay más de 90 plantas de metanol en todo el mundo con una capacidad de producción total de más de 75 millones de toneladas métricas. Cada día se utilizan más de 100,000 toneladas de metanol como materia prima en la industria química o como combustible para el transporte. La industria mundial de metanol genera 36,000 millones de dólares y crea más de 100,000 puestos de trabajo en todo el mundo [54].



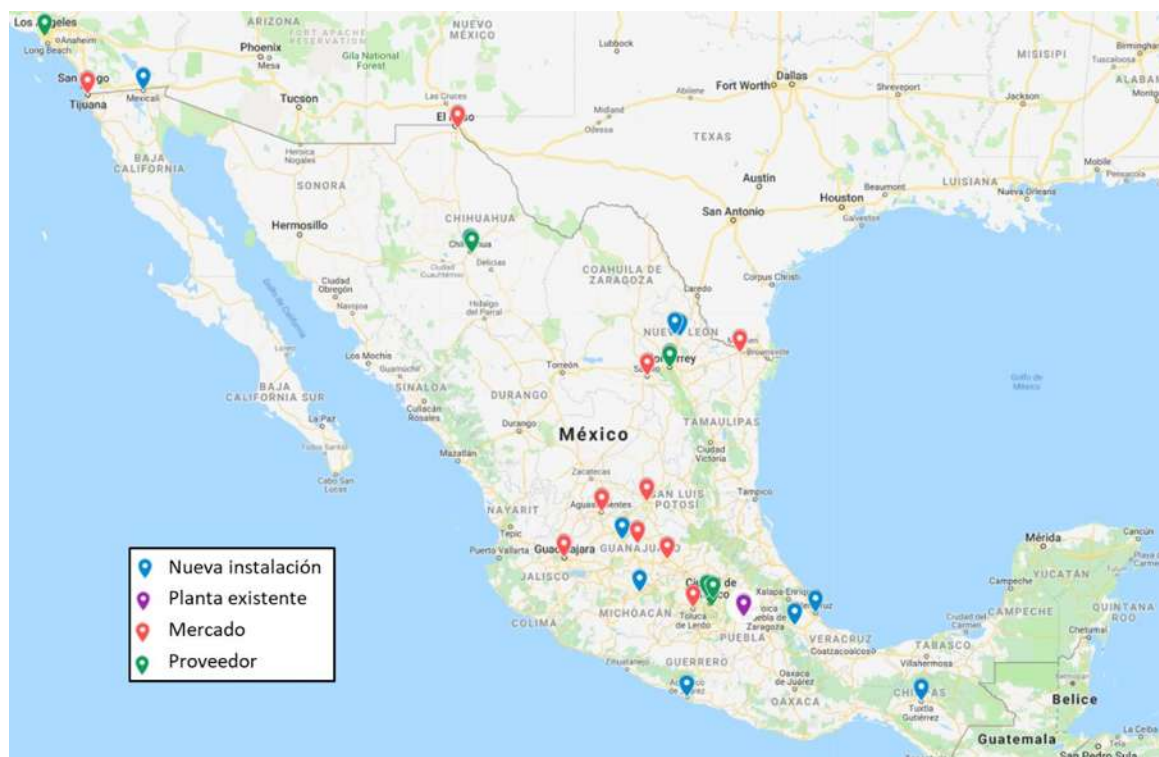
**Figura 2.2.** Distribución de la producción mundial de metanol

Para probar la metodología, se aborda un caso de estudio en México, sin embargo, el modelo propuesto es general y se puede aplicar a cualquier lugar del mundo. El metanol es una materia prima muy importante para varias industrias, y uno de los principales problemas está asociado con la obtención del mismo. Por lo tanto, el enfoque propuesto puede ser utilizado para la planificación estratégica de la producción de metanol en diferentes partes considerando las condiciones adecuadas y los recursos disponibles de la región seleccionada. La demanda nacional de metanol en México es de 2,760,000 ton/año [55]. Actualmente sólo existe una planta de producción de metanol que utiliza gas natural como materia prima, lo cual no es suficiente para satisfacer las demandas del país utilizando sus propios recursos, debido a esto, más del 80% se satisface a través de la importación [56]. Por ello, es interesante abordar la planificación estratégica del metanol en los casos en que la infraestructura no sea suficiente y el país cuente con las fuentes de materia prima necesarias para su producción, ya sea la obtención de gas natural u otros combustibles fósiles por vías convencionales o no convencionales. En este capítulo se propone la instalación de nuevas plantas de producción de metanol que se encuentran distribuidas a lo largo del país y pueden construirse cerca de las ciudades de mayor demanda o cerca de las plantas de producción de gas natural. Además, para incentivar la producción nacional y hacer más atractiva la construcción de nuevas plantas de metanol, se incorporan incentivos económicos emitidos por el gobierno. De esta forma, las plantas de metanol establecen una producción objetivo que si se logra se obtiene el incentivo económico fijado por el gobierno, si la producción supera la producción objetivo, el incentivo generado será mayor, en cambio, si la producción no se cumple, habrá penalización; en base a esto, la producción objetivo en la planta de metanol debe ser confiable y alcanzable.

El hecho de poder utilizar materia prima de las reservas nacionales (gas natural) para producir componentes de valor agregado, da la posibilidad de instalación a nuevas plantas de producción y así mismo ayudar al desarrollo económico e industrial del país; es importante señalar que se propone brindar incentivos económicos para promover la producción nacional. Además, se le da un uso diferente al gas natural aparte de quemarlo para producir energía.

Para la cadena de suministro de metanol, se necesita satisfacer la demanda en 13 ciudades que representan las zonas industriales más importantes de México. Se propone construir

nuevas plantas de producción de metanol que utilicen gas natural en 23 localidades a lo largo del territorio nacional. En México existe una sola planta de producción de metanol a partir de gas natural ubicada en Puebla con una capacidad de producción de 186,150 ton/año, el resto de la demanda se satisface a través de diferentes proveedores o por importación. Las ciudades consideradas se muestran en la **Figura 2.3** y la **Tabla 2.1**.



**Figura 2.3.** Ubicación de las ciudades consideradas

**Tabla 2.1.** Relación de ciudades consideradas en los diferentes conjuntos

| <b>Nueva instalación, fa</b> | <b>Planta existente, ep</b> | <b>Proveedor, s</b>             | <b>Mercado, c</b> |
|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------|
| Acapulco de Juárez           | Puebla                      | Productos Químicos<br>Monterrey | Juárez            |
| Aguascalientes               |                             | Abaquim                         | Monterrey         |
| Chihuahua                    |                             | Flash Chemicals of Mexico       | Tijuana           |
| Guadalajara                  |                             | ISSE LABS                       | Ciudad de México  |
| León                         |                             | Avantor                         | Reynosa           |
| Mexicali                     |                             | Spectrum                        | Querétaro         |
| Monterrey                    |                             | Química Tech                    | Saltillo          |
| Morelia                      |                             |                                 | Guadalajara       |
| Puebla                       |                             |                                 | Guanajuato        |
| Querétaro                    |                             |                                 | Toluca            |
| Saltillo                     |                             |                                 | San Luis Potosí   |
| San Luis Potosí              |                             |                                 | Puebla            |
| Tijuana                      |                             |                                 | Aguascalientes    |
| Toluca                       |                             |                                 |                   |
| Tuxtla Gutiérrez             |                             |                                 |                   |
| Veracruz                     |                             |                                 |                   |
| Juárez                       |                             |                                 |                   |
| Ciudad de México             |                             |                                 |                   |
| Reynosa                      |                             |                                 |                   |
| Guanajuato                   |                             |                                 |                   |
| Comitas                      |                             |                                 |                   |
| Sabinas Hidalgo              |                             |                                 |                   |
| Cuitláhuac                   |                             |                                 |                   |

## 2.4 Resultados

Se analizaron diferentes esquemas para determinar el comportamiento del modelo. En el escenario A se obtienen resultados sin considerar incertidumbre ni incentivos económicos brindando así escenarios extremos, los resultados obtenidos se comparan con el escenario B y ayudan para determinar los límites de solución del problema. El escenario B, por su parte, contempla la incertidumbre asociada a las demandas y costos de venta de gas natural y metanol, así como el uso de incentivos económicos. Se analizan diferentes escenarios limitando la importación de metanol para ayudar a la producción nacional y se propone la instalación de nuevas plantas de metanol.

### 2.4.1 Escenario A

Los resultados se obtienen sin considerar la incertidumbre y uso de incentivos económicos. El modelo matemático fue resuelto para cada función objetivo y representa soluciones extremas para cada uno de los casos.

**Tabla 2.2.** Resultados del escenario A.

|                                                                    | <b>Max PROFIT</b>     | <b>Min TFW</b>         | <b>Min TE</b>          |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| <b>PROFIT (\$/año)</b>                                             | $1.63 \times 10^{10}$ | $-2.16 \times 10^{12}$ | $-2.16 \times 10^{12}$ |
| <b>Emisiones totales (TE) (MMton métricas CO<sub>2</sub>e/año)</b> | 29.843                | 5.335                  | 5.118                  |
| <b><i>Importación de gas natural</i></b>                           | 0                     | 0.293                  | 0.293                  |
| <b><i>Gas natural de aguas profundas</i></b>                       | 1.977                 | 0                      | 0                      |
| <b><i>Gas shale</i></b>                                            | 19.389                | 0                      | 0                      |
| <b><i>Gas natural asociado</i></b>                                 | 0.844                 | 0                      | 0                      |
| <b><i>Gas natural no asociado</i></b>                              | 0.564                 | 0                      | 0                      |
| <b><i>Plantas de metanol existente</i></b>                         | 1.298                 | 0                      | 0                      |
| <b><i>Importación de metanol</i></b>                               | 5.77                  | 5.042                  | 4.825                  |
| <b><i>Nuevas plantas de metanol</i></b>                            | 0                     | 0.000                  | 0.000                  |
| <b>Agua dulce total (TFW) (MMm<sup>3</sup>/año)</b>                | 36.576                | 0                      | 0                      |
| <b><i>Gas shale</i></b>                                            | 2.729                 | 0                      | 0                      |

|                                              |               |           |           |
|----------------------------------------------|---------------|-----------|-----------|
| <b><i>Gas natural asociado</i></b>           | 14.464        | 0         | 0         |
| <b><i>Gas natural no asociado</i></b>        | 19.386        | 0         | 0         |
| <b>Gas natural producido (MMmca)</b>         | 1,901,853.897 | 1,901,000 | 1,901,890 |
| <b><i>Importación</i></b>                    | 0.000         | 1,901,000 | 1,901,890 |
| <b><i>Gas natural de aguas profundas</i></b> | 309,142.654   | 0         | 0         |
| <b><i>Gas shale</i></b>                      | 1,252,970.000 | 0         | 0         |
| <b><i>Gas natural asociado</i></b>           | 162,304.173   | 0         | 0         |
| <b><i>Gas natural no asociado</i></b>        | 177,437.070   | 0         | 0         |
| <b>Petroleo producido (Mba)</b>              | 284,280.000   | 0         | 0         |
| <b><i>Aguas profundas</i></b>                | 265,237.908   | 0         | 0         |
| <b><i>Asociado</i></b>                       | 19,042.554    | 0         | 0         |
| <b>Metanol producido (Ton/año)</b>           | 2,760,010     | 2,760,000 | 2,760,000 |
| <b><i>Plantas existentes</i></b>             | 186,150       | 0         | 0         |
| <b><i>Importación</i></b>                    | 2,573,860     | 2,760,000 | 2,760,000 |
| <b><i>Nuevas plantas</i></b>                 | 0             | 0         | 0         |

Como se puede observar en la **Tabla 2.2**, la ganancia tiene una gran diferencia entre maximizar el profit y minimizar el TFW y TE aun cuando en los dos últimos objetivos, los gastos son mayores que las ganancias, esto quiere decir que hay pérdidas por el hecho de que todo el gas natural y el metanol son importados. Por otro lado, las emisiones totales generadas minimizando TFW son un 82.1% menores que maximizando el profit y cuando se minimiza TE las emisiones son un 82.8% menores en comparación al caso de maximizar el profit.

Todo el consumo de agua dulce ocurre al maximizar el profit porque no se aprovecha la importación de gas natural, de esta manera se necesita realizar la producción de gas natural, pero al minimizar TFW y TE se importa todo el gas natural. Es importante señalar que el mayor consumo de agua es cuando se realiza extracción convencional, eso se debe a que a pesar de que la producción de gas shale utiliza grandes cantidades de agua, la relación MMm<sup>3</sup> de agua utilizada por MMmca de gas natural producido es mejor que la manera convencional de extracción en las condiciones consideradas.

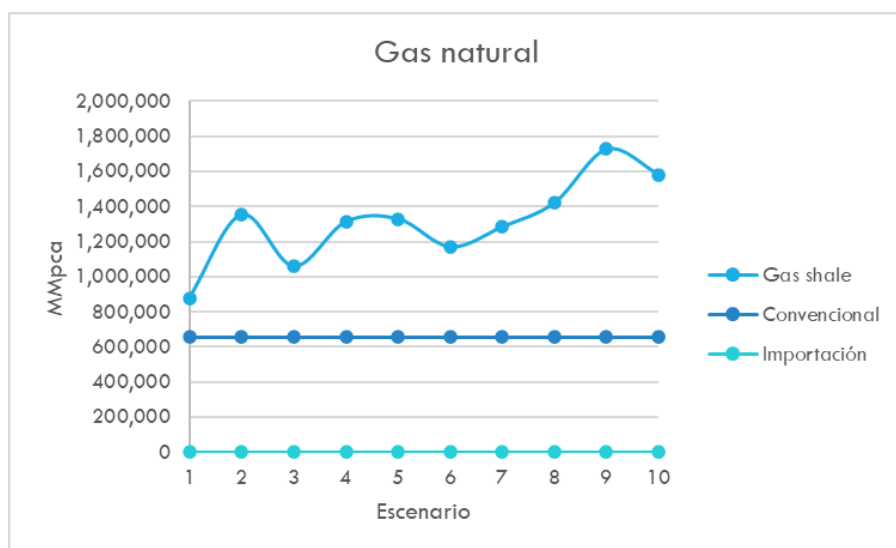
Para satisfacer las demandas de gas natural, al maximizar el profit, el 65.8% es a través de la producción de gas shale, el 16.25% utilizando la extracción en aguas profundas, no se recurre a la importación y el resto utiliza formas convencionales de extracción. El 93.3% de petróleo se produce mediante extracción en aguas profundas y la otra parte mediante gas natural asociado. En el caso de minimizar TFW y TE, no hay producción de petróleo porque todo el gas natural se satisface con la importación. Para la producción de metanol, el 93.2% se satisface con la importación y para satisfacer el resto de la demanda, se utiliza la producción en plantas existentes. En los casos de minimizar TFW y TE toda la demanda de metanol se cubre mediante importación.

#### **2.4.2 Escenario B**

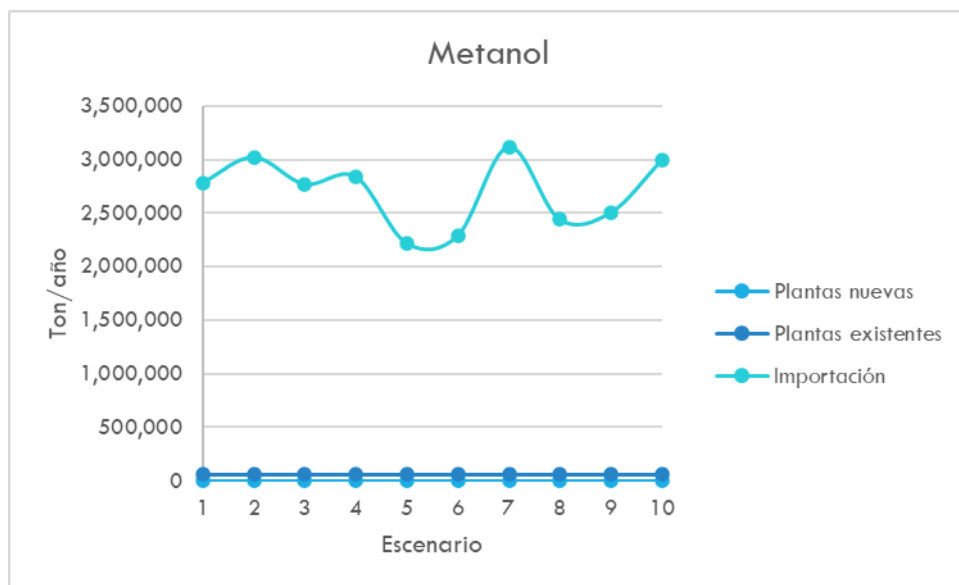
Una vez obtenidos los resultados del escenario A y conociendo los límites del problema, se establece el escenario B. En el escenario B, los resultados se obtienen utilizando los incentivos económicos para la producción de metanol, teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a los costos de venta de gas natural y metanol, y la incertidumbre en relación a las demandas de gas natural y metanol. Se generan diez escenarios que representan diferentes condiciones para evaluar y determinar el comportamiento del modelo bajo las características antes mencionadas.

Sin embargo, como se muestra en la **Figura 2.4**, la producción de gas natural por formas convencionales en ambos escenarios es la misma y no es necesario importar gas natural. Para satisfacer la demanda de gas natural se utiliza la producción de gas shale. En cuanto a la producción de metanol (**Figura 2.5**), se puede notar que tanto la producción de plantas nuevas como las plantas existentes se mantiene constante, ya que lo que varía es la importación de metanol debido a que sigue siendo la opción más viable para maximizar el profit. Al maximizar la ganancia promedio, siempre se recurrirá a la importación o producción en plantas que no utilicen gas natural y así asegurar una mayor ganancia ya que la producción nacional a partir de gas natural implica gastos por concepto de costo de capital y operación. Cabe señalar que cuando hay poca producción nacional de metanol de la planta existente, los incentivos económicos son muy bajos; caso contrario, al no lograr la producción objetivo de las nuevas plantas, se penaliza económicamente, teniendo valores negativos (**Figura 2.6**). Por otro lado, la producción de la planta existente trabaja a su máxima

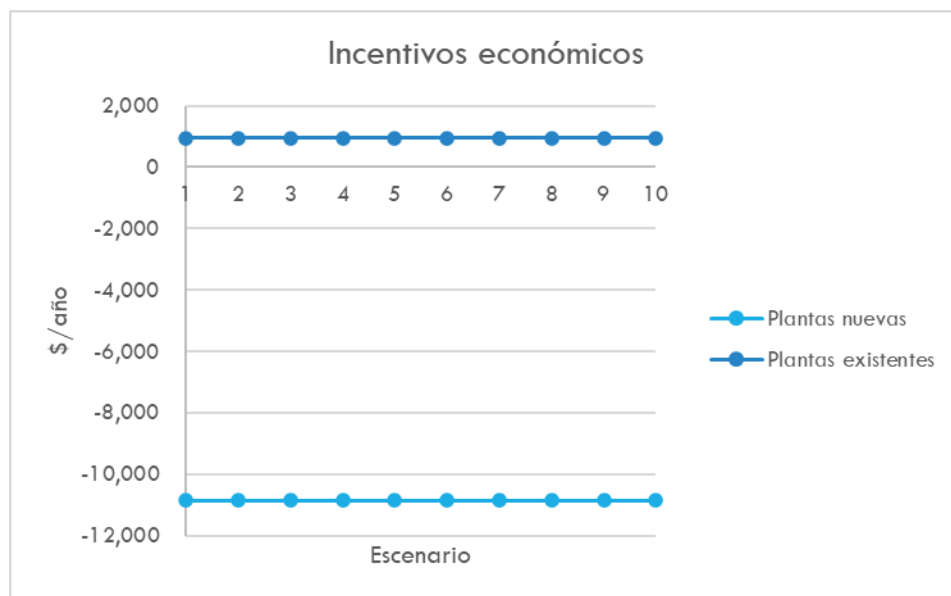
capacidad bajo los diferentes escenarios y los incentivos económicos son los mismos. De esta forma, se decide restringir la importación de metanol con la intención de promover la producción nacional y crear nuevas instalaciones de metanol.



**Figura 2.4.** Producción de gas natural para el escenario B (Maximizando Profit promedio)

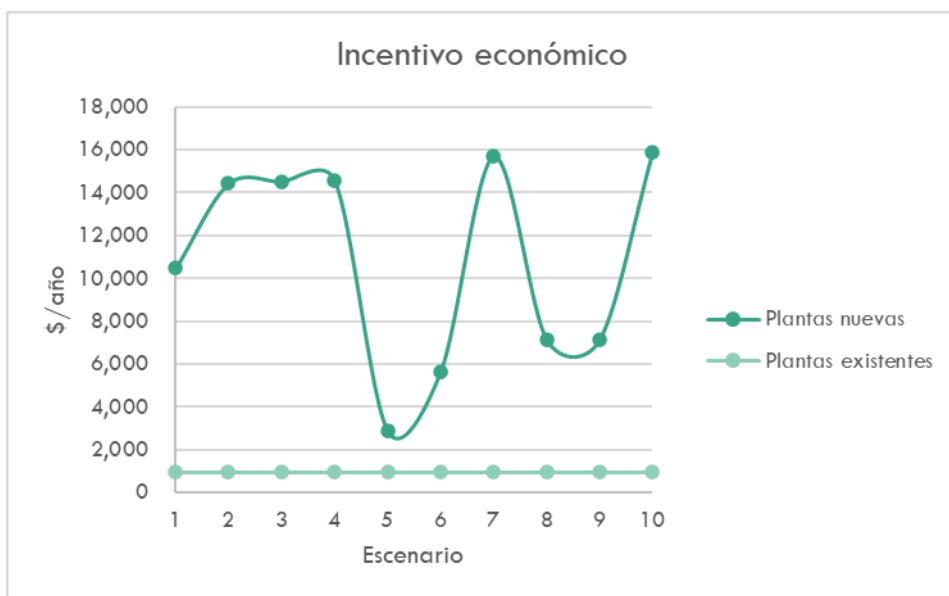


**Figura 2.5.** Producción de metanol para el escenario B (Maximizando profit promedio)

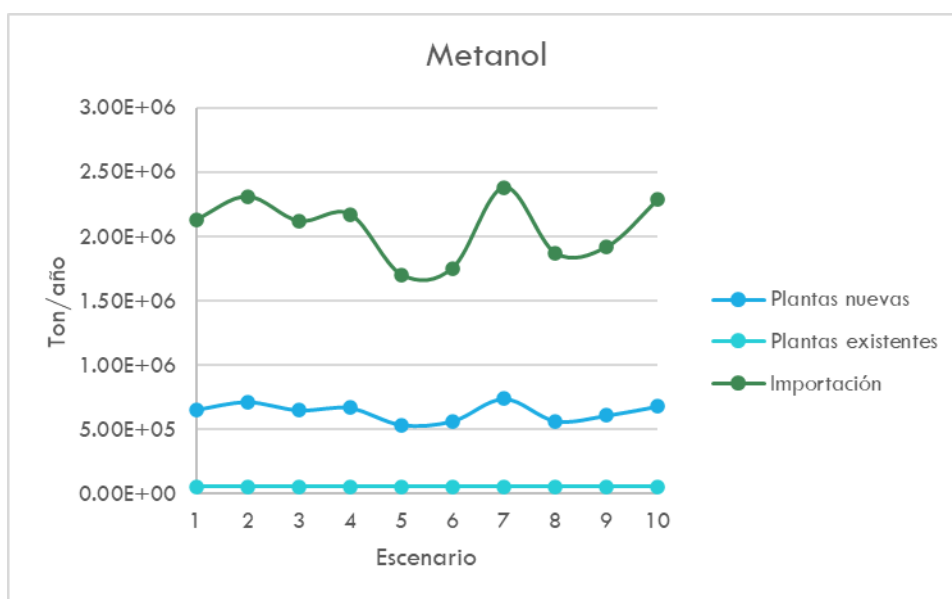


**Figura 2.6.** Comportamiento de los incentivos económicos al maximizar el profit promedio para el escenario B

Al restringir la importación de metanol en un 25%, se utilizan incentivos económicos para la producción en nuevas plantas de metanol (**Figura 2.7**). Dado que la producción de las plantas existentes es constante debido a la capacidad máxima de la planta, los incentivos generados son constantes, sin embargo, en el caso de las plantas nuevas, el incentivo económico otorgado depende del nivel de producción alcanzado. En cuanto a la producción de gas natural, al restringir la importación de metanol, no se ve afectada. Por otro lado, debido a que existe una capacidad máxima en la planta de metanol existente, se utiliza la producción en plantas nuevas (**Figura 2.8**) para satisfacer la demanda de metanol cuando la importación es limitada.



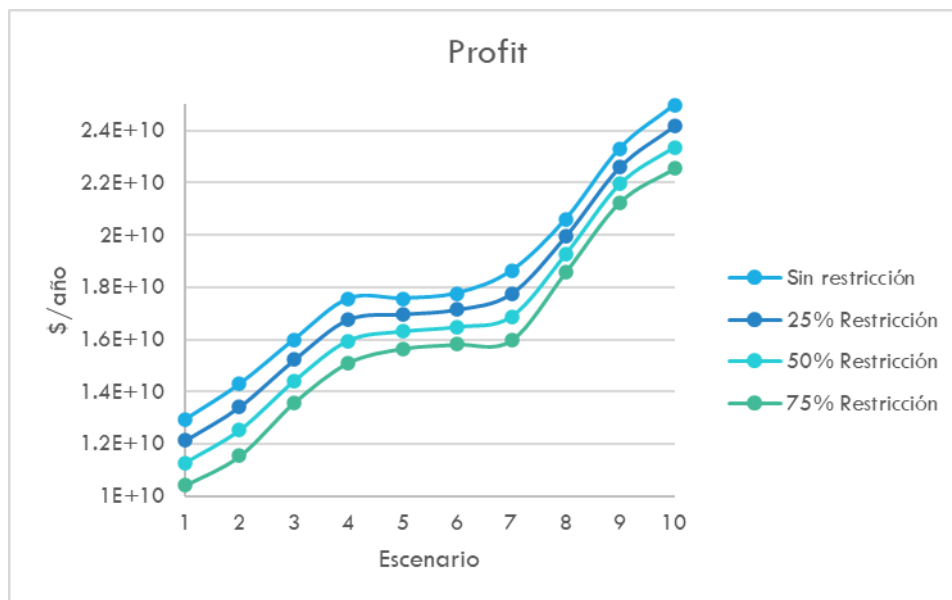
**Figura 2.7.** Incentivos económicos generados cuando se restringe la importación en un 25% para el escenario B.



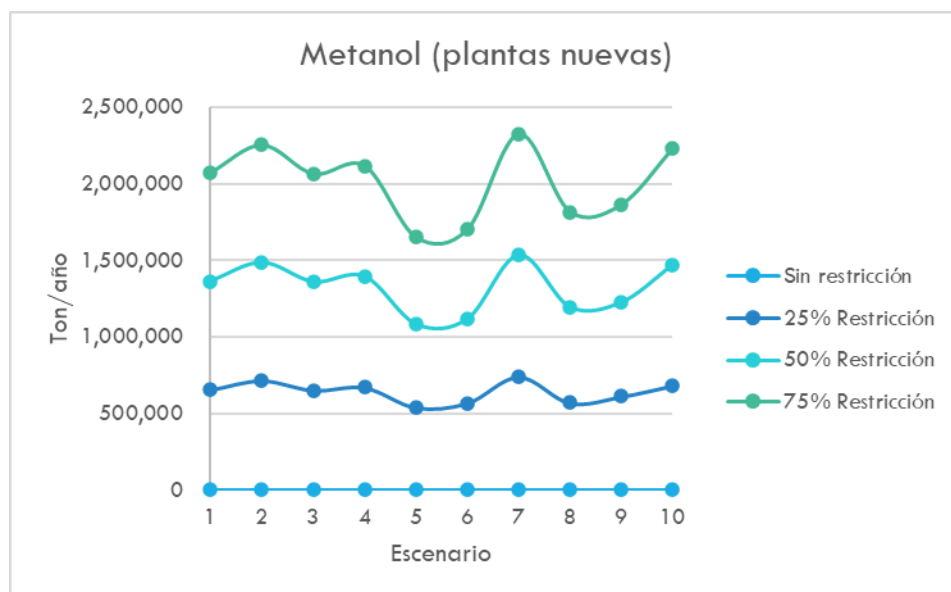
**Figura 2.8.** Producción de metanol cuando la importación está restringida en un 25% para el escenario B.

Como se puede observar en la **Figura 2.9**, al restringir la importación de metanol, en 25, 50 y 75%, el comportamiento de las ganancias (profit) es igual en los diferentes porcentajes de

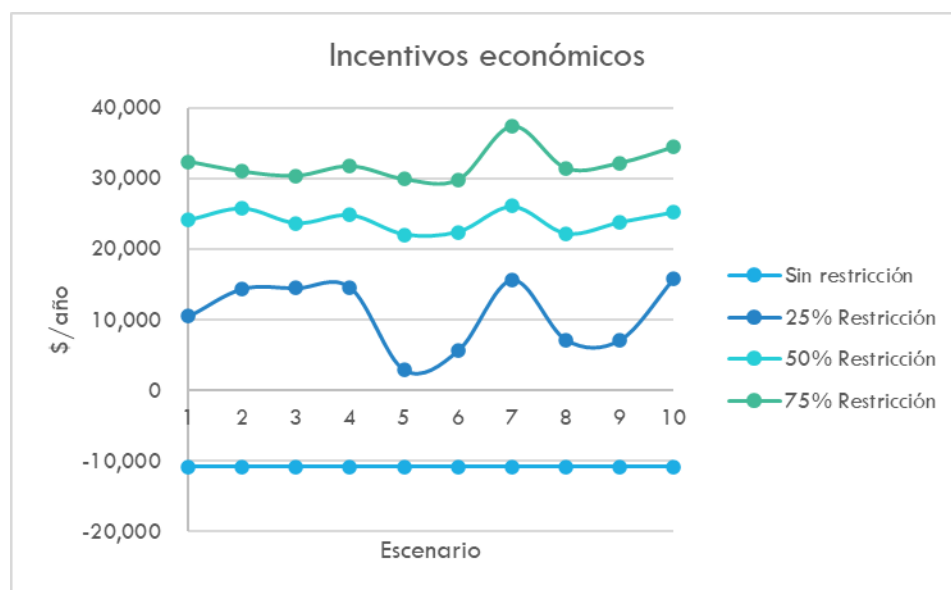
restricción. Cuando disminuye la importación, aumenta la producción de metanol (**Figura 2.10**), por lo tanto, los incentivos que se otorgan son mayores (**Figura 2.11**). Es importante señalar que cuando la producción nacional es menor, los incentivos totales se ceden de manera más radical, como es el caso al restringir solamente el 25% de las importaciones de metanol en comparación con el caso de restringir el 75%.



**Figura 2.9.** Promedio de las ganancias (profit)

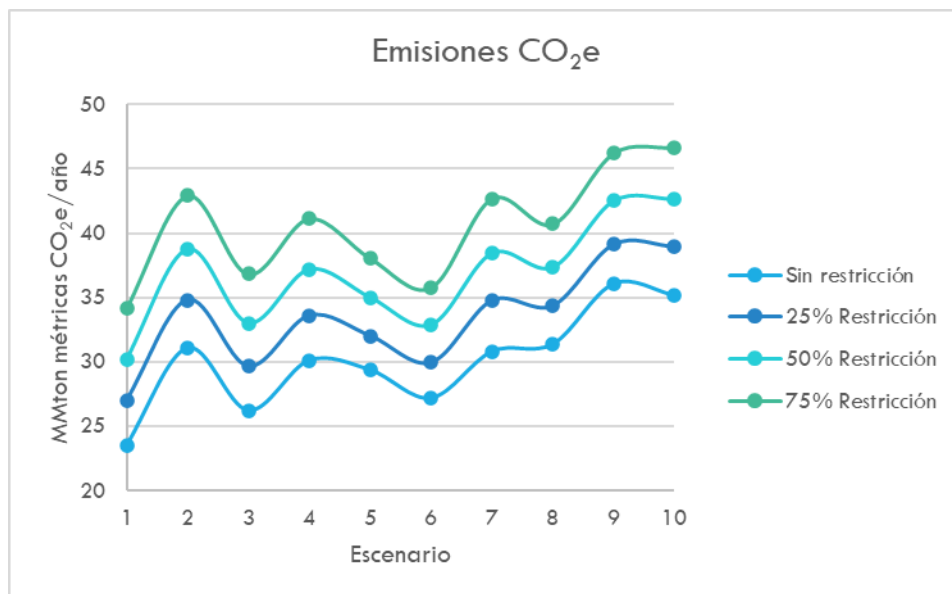


**Figura 2.10.** Producción de las nuevas instalaciones de metanol con diferente restricción de importación para el escenario B



**Figura 2.11.** Incentivos económicos utilizados con diferentes restricciones de importación para el escenario B

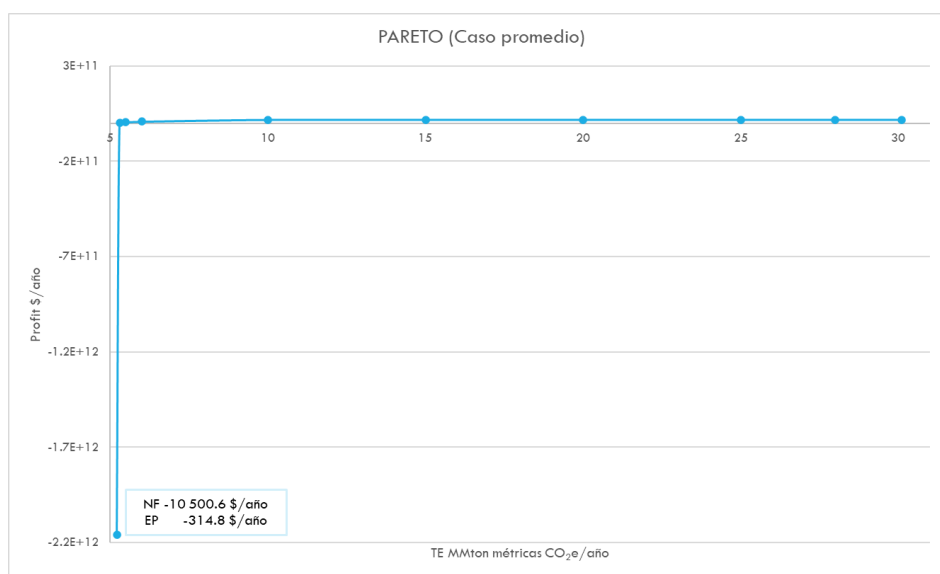
En cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub>e, al reducir las importaciones, la producción nacional aumenta y, por lo tanto, las emisiones son mayores, sin embargo, el comportamiento es similar a diferentes niveles de restricción de importación de metanol, como se puede observar en la **Figura 2.12**. Por otro lado, la diferencia en el consumo de agua dulce al restringir las importaciones es prácticamente nula y puede considerarse constante.



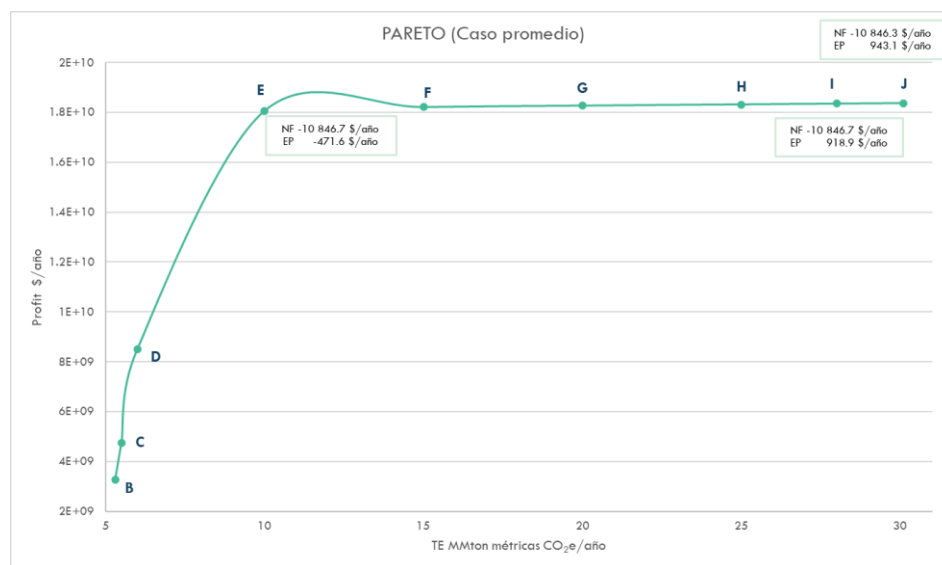
**Figura 2.12.** Emisiones de CO<sub>2</sub>e generado con diferentes restricciones de importación de metanol para el escenario B.

Además, para determinar soluciones cuando existen funciones objetivo que se contradicen (maximizar el profit y minimizar las emisiones totales), se ha optado por utilizar la curva de Pareto a través del método de  $\epsilon$ -constraint. [57] En donde la curva representa soluciones óptimas, los puntos que están por encima de la curva son soluciones subóptimas y los puntos por debajo de la curva son soluciones no factibles. La curva de Pareto se obtuvo como se muestra en la **Figura 2.13**, cabe señalar que se consideran los casos promedio respecto a la incertidumbre relacionada con la demanda y costos de venta de gas natural y metanol para el cálculo de las diferentes soluciones de la curva, así mismo, no se restringe la importación de metanol. En el caso del punto A, las emisiones totales se minimizan y

representan las emisiones más bajas pero la mayor pérdida de ganancias; por el contrario, el punto J está determinado por maximizar el profit y constituye la mayor generación de emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente. Los puntos A y J corresponden soluciones extremas. La **Figura 2.14** muestra soluciones intermedias, donde se observa que a mayor ganancia, las emisiones generadas al medio ambiente aumentan. También es importante señalar que al no existir restricción a la importación de metanol, no se promueve la instalación de nuevas plantas de metanol (NF), lo que los incentivos económicos son negativos en todos los escenarios, por otro lado, la solución J tiene mayor incentivo en la planta existente (EP) y hay una reducción del 2.56% en los escenarios F a I. La solución E representa una de las mejores soluciones porque a pesar de los incentivos de la planta existente que se reducen en un 150% (de 943.1 a -471.6 \$/año) respecto al profit máximo (escenario J,  $1.837 \times 10^{10}$  \$/año), el beneficio se mantiene en  $1.81 \times 10^{10}$  \$/año. Además, se representa el punto de pliegue respecto a las demás soluciones (B-D), los cuales mantienen constantes los incentivos económicos pero el beneficio se reduce hasta el 82.2%.



**Figura 2.13.** Curva de Pareto. *NF: Incentivos económicos en nuevas instalaciones; EP: Incentivos económicos en plantas existentes*



**Figura 2.14.** Curva de Pareto de soluciones intermedias. *NF: Incentivos económicos en nuevas instalaciones; EP: Incentivos económicos en plantas existente*

## 2.5 Nomenclatura

### 2.5.1 Conjuntos

- C Conjunto para los diferentes mercados de metanol considerados a satisfacer ( $c|c=1,\dots,C$ )
- E Conjunto que representa los diferentes procesos de extracción ( $e|e=\text{shale, aguas profundas, asociado, no asociado}$ )
- EP Conjunto para las plantas existentes de metanol ( $ep|ep=1,\dots,EP$ )
- F Conjunto para campo de extracción de gas shale ( $f|f=1,\dots,F$ )
- FA Conjunto para nuevas instalaciones para producir metanol ( $fa|fa=1,\dots$ )
- FCA Conjunto para campo de gas natural convencional asociado ( $fca|fca=1,\dots,FCA$ )
- FCN Conjunto para campo de gas natural convencional no asociado ( $fcn|fcn=1,\dots,FCN$ )
- FO Conjunto para campo de extracción aguas profundas ( $fo|fo=1,\dots,FO$ )
- M Conjuntos para indicar el mercado al que se dirige la producción, que puede representar las instalaciones de importación en el país ( $m|m=1,\dots,M$ )

- P Conjunto de diferentes proveedores de gas natural ( $p|p=1,\dots,P$ )
- S Conjunto para representar al proveedor de metanol ( $s|s=1,\dots,S$ )
- T Conjunto de periodos en años ( $t|t=1,\dots,T$ )
- UN Conjunto de los diferentes escenarios de incertidumbre ( $u|u=1,\dots,U$ )

## 2.5.2 Variables

- $Cost_{un}^{cea-prod}$  Costo de producción de gas natural mediante extracción convencional asociado
- $Cost_{un}^{cenoa-prod}$  Costo de producción de gas natural por extracción convencional no asociada
- $Cost_{un}^{fresh-acon}$  Costo del agua dulce para la extracción convencional asociada
- $Cost_{un}^{fresh-nacon}$  Costo de agua dulce para extracción convencional no asociada
- $Cost_{un}^{fresh-shale}$  Costo del agua dulce para el gas shale
- $Cost_{un}^{imp}$  Costo de importación de gas natural
- $Cost_{un}^{off-prod}$  Costo de producción de gas natural a través de la extracción en aguas profundas
- $Cost_{un}^{m-exis}$  Costo de producción de las plantas existentes de metanol
- $Cost_{un}^{m-imp}$  Costo de producción del metanol importado
- $Cost_{un}^{m-prod}$  Costo de producción de metanol en las nuevas instalaciones
- $Cost_{un}^{pet}$  Costo de producción del petróleo
- $Cost_{un}^{transp-met}$  Costo de transporte de metanol
- $Cost_{un}^{shale-prod}$  Costo de producción del gas shale
- $Cost_{un}^{seawater}$  Costo del agua de mar para la extracción en aguas profundas
- $Cost_{un}^{transp-ng}$  Costo de transporte de gas natural

|                               |                                                                                                                     |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $Cost_{un}^{transp-pet}$      | Costo de transporte del petróleo                                                                                    |
| $Cost_{un}^{treatment-cea}$   | Costo de tratamiento de gas natural por extracción convencional asociado                                            |
| $Cost_{un}^{treatment-off}$   | Costo de tratamiento de gas natural y agua utilizada en extracción de aguas profundas                               |
| $Cost_{un}^{treatment-shale}$ | Costo del tratamiento del gas shale y del agua utilizada                                                            |
| $E_{f,e,un,t}$                | Emisiones de CO <sub>2</sub> generadas en gas shale, offshore, producción asociada y no asociada                    |
| $E_{ep,un,t}^{exis}$          | Emisiones de CO <sub>2</sub> en plantas existentes de metanol                                                       |
| $E_{p,un,t}^{imp}$            | Emisiones de CO <sub>2</sub> durante la importación de gas natural                                                  |
| $E_{s,un,t}^{impm}$           | Emisiones de CO <sub>2</sub> durante la importación de metanol                                                      |
| $E_{fa,un,t}^{nm}$            | Emisiones de CO <sub>2</sub> en nuevas instalaciones de metanol                                                     |
| $G_{f,e,un,t}^t$              | Gas natural tratado en shale, offshore, extracción asociada y no asociada                                           |
| $g_{fca,m,un,t}^{cea-t-mark}$ | Flujo de gas natural tratado asociado obtenido por extracción convencional dirigido a los mercados                  |
| $g_{fca,fa,un,t}^{cea-t-met}$ | Flujo de gas natural asociado enviado a instalaciones de metanol                                                    |
| $g_{fi,e,m,un,t}^{t-mark}$    | Flujo de gas natural obtenido por shale, offshore, producción asociada y no asociada dirigida a diferentes mercados |
| $g_{fi,e,fa,un,t}^{t-met}$    | Flujo de gas natural obtenido por shale, offshore, producción asociada y no asociada dirigida a producir metanol    |
| $g_{fcn,m,un,t}^{cenoa-mark}$ | Flujo de gas natural tratado no asociado obtenido por extracción convencional dirigido a los mercados               |
| $g_{fcn,fa,un,t}^{cenoa-met}$ | Flujo de gas natural no asociado enviado a instalaciones de metanol                                                 |

|                               |                                                                                                                                                 |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $g_{p,m,un,t}^{imp-mark}$     | Flujo de gas natural importado dirigido a diferentes mercados                                                                                   |
| $g_{p,fa,un,t}^{imp-met}$     | Flujo de gas natural importado enviado a instalaciones de metanol                                                                               |
| $G_{fa,un,t}^{NG-fa}$         | Flujo de gas natural necesario para producir metanol                                                                                            |
| $g_{fo,m,un,t}^{off-t-mark}$  | Flujo de gas natural producido en extracción offshore enviado a los mercados                                                                    |
| $g_{fo,fa,un,t}^{off-t-met}$  | Flujo de gas natural tratado desde alta mar enviado a instalaciones de metanol                                                                  |
| $g_{f,m,un,t}^{shale-t-mark}$ | Flujo de gas shale dirigido a los mercados                                                                                                      |
| $g_{f,fa,un,t}^{shale-t-met}$ | Flujo de gas shale tratado enviado a instalaciones de metanol                                                                                   |
| $IE_{fa,un,t}$                | Incentivo económico a la producción de metanol en nuevas instalaciones                                                                          |
| $IE_{fa,un,t}^1$              | Incentivo económico utilizado en disyunción cuando la producción de metanol es igual al caudal de metanol propuesto en las nuevas instalaciones |
| $IE_{fa,un,t}^2$              | Incentivo económico utilizado en disyunción cuando la producción de metanol es superior al flujo de metanol propuesto en nuevas instalaciones   |
| $IE_{fa,un,t}^3$              | Incentivo económico utilizado en disyunción cuando la producción de metanol es inferior al flujo de metanol propuesto en nuevas instalaciones   |
| $IE_{ep,un,t}^{ex}$           | Incentivo económico a la producción de metanol en instalaciones existentes                                                                      |
| $M_{fa,un,t}$                 | Metanol producido en nuevas instalaciones                                                                                                       |
| $M_{fa,un}^{cap}$             | Capacidad requerida para producir metanol                                                                                                       |
| $M_{ep,un,t}^{exis}$          | Metanol producido en plantas existentes                                                                                                         |
| $m_{ep,c,un,t}^{exis-m}$      | Metanol producido en plantas existentes que se envía a los mercados                                                                             |
| $M_{s,un,t}^{imp}$            | Metanol importado                                                                                                                               |

|                         |                                                                                                                     |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $m_{s,c,un,t}^{imp-m}$  | Metanol importado que se envía a los mercados                                                                       |
| $m_{fa,c,un,t}^m$       | Metanol producido en nuevas instalaciones que se envía a los mercados                                               |
| $m_{m,c,un,t}^{market}$ | Flujo de metanol obtenido por plantas existentes, nuevas instalaciones e importación dirigida a diferentes mercados |
| $Profit_{un}$           | Ganancia                                                                                                            |
| $Sale_{un}^{NG}$        | Venta de gas natural                                                                                                |
| $TE_{un}$               | Emisiones totales                                                                                                   |
| $TFW_{un}$              | Agua dulce total                                                                                                    |
| $TIE_{un}$              | Incentivo económico total para producir metanol                                                                     |

### 2.5.3 Variables binarias

|                       |                                                                                                                            |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $y_{A,un,t}^{inc}$    | Activación de la disyunción cuando la producción de metanol en las nuevas instalaciones es igual a la producción propuesta |
| $y_{B,un,t}^{inc}$    | Activación de disyunción cuando la producción de metanol en nuevas instalaciones es superior a la producción propuesta     |
| $y_{C,un,t}^{inc}$    | Activación de disyunción cuando la producción de metanol en nuevas instalaciones es inferior a la producción propuesta     |
| $y_{A,un,t}^{inc-ex}$ | Activación de disyunción cuando la producción de metanol en las instalaciones actuales es igual a la producción propuesta  |
| $y_{fa,un}^m$         | Activación de nuevas instalaciones de metanol                                                                              |

### 2.5.4 Parámetros

|       |                                                          |
|-------|----------------------------------------------------------|
| $a^m$ | Costo fijo unitario para nuevas instalaciones de metanol |
|-------|----------------------------------------------------------|

|                         |                                                                                                  |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $b^m$                   | Costo variable unitario para nuevas instalaciones de metanol                                     |
| $c^m$                   | Exponente a considerar las economías de escala para nuevas instalaciones de metanol              |
| $d_{fca,m}^{cea}$       | Distancia de la extracción convencional asociada al mercado                                      |
| $d_{fca,fa}^{cea-m}$    | Distancia de extracción convencional asociada a instalaciones para producir metanol              |
| $d_{fcn,m}^{cenoa}$     | Distancia de la extracción convencional no asociada al mercado                                   |
| $d_{fcn,fa}^{cenoa-m}$  | Distancia desde la extracción convencional no asociada a las instalaciones para producir metanol |
| $d_{ep,c}^{exis-mc}$    | Distancia de las plantas de metanol existentes a los mercados de metanol                         |
| $d_{p,m}^{imp}$         | Distancia desde la importación hasta el mercado                                                  |
| $d_{p,fa}^{imp-m}$      | Distancia desde la importación de gas natural hasta las instalaciones para producir metanol      |
| $d_{s,c}^{imp-mc}$      | Distancia desde la importación de metanol hasta los mercados de metanol                          |
| $d_{fa,c}^{mc}$         | Distancia de las nuevas plantas de metanol a los mercados de metanol                             |
| $d_{fo,m}^{off}$        | Distancia desde el puerto en aguas profundas al mercado                                          |
| $d_{fo,fa}^{off-m}$     | Distancia desde la extracción en aguas profundas hasta las instalaciones para producir metanol   |
| $d_{fo,m}^{off-sea}$    | Distancia desde el campo de extracción en aguas profundas hasta el puerto                        |
| $d_{fo,fa}^{off-sea-m}$ | Distancia del campo de extracción en aguas profundas al puerto para la producción de metanol     |

|                               |                                                                                                      |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $d_{f,m}^{\text{shale}}$      | Distancia desde la extracción de gas shale hasta el mercado                                          |
| $d_{f,fa}^{\text{shale-m}}$   | Distancia desde la extracción de gas shale hasta las instalaciones para producir metanol             |
| $G_{m,un,t}^{\text{NG-mark}}$ | Gas natural total requerido                                                                          |
| $IE^{\text{MAX}}$             | Máximo incentivo económico para la producción de metanol en nuevas instalaciones                     |
| $IE^p$                        | Incentivo económico propuesto para la producción de metanol                                          |
| $k_F$                         | Factor utilizado para anualizar los costos de capital                                                |
| $M_{ep,t}^{\text{exiso}}$     | Producción objetivo de metanol de las plantas existentes                                             |
| $M_{ep,t}^{\text{exisp}}$     | Producción propuesta de metanol por las instalaciones existentes                                     |
| $M_{un,t}^{\text{market}}$    | Demanda de los mercados de metanol que necesita ser satisfecha                                       |
| $M_{fa}^{\text{MAX}}$         | Máxima producción de metanol en nuevas instalaciones                                                 |
| $M_{ep}^{\text{maxcap}}$      | Capacidad máxima de producción de las plantas existentes                                             |
| $M_{fa,t}^o$                  | Producción objetivo en nuevas plantas de metanol                                                     |
| $M_{fa,t}^p$                  | Producción propuesta de metanol para las nuevas instalaciones                                        |
| $\text{Sale}_{un}^M$          | Venta de metanol                                                                                     |
| $u$                           | Parámetro utilizado en disyunción cuando la producción de metanol es igual a la producción propuesta |
| $\text{UOC}_{fa}^m$           | Costo unitario de operación para la producción de metanol en nuevas instalaciones                    |

|                          |                                                                                             |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| $UOC_{ep}^{m-exis}$      | Costo unitario de operación para la producción de metanol en plantas existentes             |
| $UOC_s^{m-imp}$          | Costo unitario de operación para la producción de metanol en plantas existentes             |
| $US_{un,t}^M$            | Costo unitario de venta de metanol                                                          |
| $US_{un,t}^{NG}$         | Costo unitario de venta de gas natural                                                      |
| $UTC_{fca,m}^{cea}$      | Costo unitario de transporte del gas natural obtenido en extracción convencional asociado   |
| $UTC_{fca,fa}^{cea-m}$   | Costo unitario de transporte de gas natural asociado a la producción de metanol             |
| $UTC_{fcn,m}^{cenoa}$    | Costo unitario de transporte de gas natural obtenido en extracción convencional no asociada |
| $UTC_{fcn,fa}^{cenoa-m}$ | Costo unitario de transporte de gas natural no asociado para producir metanol               |
| $UTC_{ep,c}^{exis-mc}$   | Costo unitario de transporte desde plantas existentes de metanol a diferentes mercados      |
| $UTC_{p,m}^{imp}$        | Costo unitario de transporte de gas natural importado                                       |
| $UTC_{p,fa}^{imp-m}$     | Costo unitario de transporte de gas natural importado para producir metanol                 |
| $UTC_{s,c}^{imp-mc}$     | Costo unitario de transporte por importación de metanol a diferentes mercados               |
| $UTC_{fa,c}^{mc}$        | Costo unitario de transporte desde nuevas instalaciones de metanol a diferentes mercados    |
| $UTC_{fo,m}^{off}$       | Costo unitario de transporte del gas natural obtenido en extracción offshore                |

|                             |                                                                                                         |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $UTC_{fo,fa}^{off-m}$       | Costo unitario de transporte de gas natural desde aguas profundas para producir metanol                 |
| $UTC_{fo}^{off-sea}$        | Costo unitario de envío de transporte de gas natural obtenido en extracción en aguas profundas          |
| $UTC_{fo,fa}^{off-sea-m}$   | Costo unitario de envío de transporte de gas natural desde aguas profundas para producir metanol        |
| $UTC_{fca}^{p-cea}$         | Costo unitario de transporte del petróleo obtenido en extracción convencional asociado                  |
| $UTC_{fo}^{p-off}$          | Costo unitario de transporte del petróleo obtenido en extracción costa afuera                           |
| $UTC_{fo}^{p-off-sea}$      | Costo unitario de envío de transporte de petróleo obtenido en extracción en aguas profundas             |
| $UTC_{f,m}^{tran-shale}$    | Costo unitario de transporte de gas shale                                                               |
| $UTC_{f,fa}^{tran-shale-m}$ | Costo unitario de transporte de gas shale para producir metanol                                         |
| $v$                         | Parámetro utilizado en disyunción cuando la producción de metanol es inferior a la producción propuesta |
| $x$                         | Parámetro utilizado en disyunción cuando la producción de metanol es mayor a la producción propuesta    |
| $\beta_e$                   | Factor de emisión para extracción de shale, aguas profundas, asociada y no asociada                     |
| $\beta_{ep,c}^{exist}$      | Factor de emisión para plantas existentes de metanol                                                    |
| $\beta^{imp}$               | Factor de emisión para gas natural de importación                                                       |
| $\beta_{s,c}^{impm}$        | Factor de emisión para metanol importado                                                                |

|                     |                                                                                                            |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\beta_{fa,c}^{nm}$ | Factor de emisión para nuevas instalaciones de metanol                                                     |
| $\beta_e^t$         | Factor de emisión para el tratamiento de gas natural de shale, offshore, extracción asociada y no asociada |
| $\delta$            | Valor usado en disyunción para hacer una ligera diferencia en igualdades                                   |

## **CAPÍTULO TRES**

### **PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN INTENSIFICADA DE SILICIO GRADO SOLAR PARA GENERAR PANELES QUE INVOLUCREN EL COMPORTAMIENTO DE LA POBLACIÓN**

#### **3.a Resumen**

La necesidad de utilizar fuentes limpias para producir electricidad ha sido un tema de gran discusión los últimos años. Muchos países han comenzado a aprovechar la energía solar mediante el uso de paneles solares para la generación de energía eléctrica. Además, conocer las preferencias de las personas permite predecir su comportamiento para proponer una mejor planificación a nivel macroscópico. Este capítulo presenta un modelo de programación matemática para abordar la conducta de las personas. El objetivo es conocer sus preferencias utilizando la “Matching law”, la cual involucra las acciones de los usuarios a través de diferentes escenarios considerando incentivos y castigos económicos. El caso de estudio abordado implica la planificación estratégica de la producción y distribución de silicio grado solar que se utiliza para la construcción de paneles solares para satisfacer las demandas de energía eléctrica en el sector residencial de México. La intensificación del proceso se utilizó para mejorar diferentes formas de obtener silicio grado solar, como lo es un reactor de lecho fluidizado intensificado y un híbrido que es una combinación de los procesos Siemens y FBR convencionales. También se consideró el proceso más común para producir silicio, el proceso Siemens. Los resultados muestran que la diferencia entre los escenarios analizados radica en el comportamiento de las personas mientras que la ganancia se mantiene constante.

### 3.1 Planteamiento del problema

El problema que se aborda en este capítulo busca satisfacer las demandas de energía eléctrica del sector residencial. Debido a que no se aprovecha al máximo la capacidad de generación de la energía solar, es necesario promover el uso de paneles solares. Una de las principales limitantes es la producción y distribución de la materia prima para producir silicio grado solar [58], la cual puede ser implementada a través de los procesos Siemens, FBR Union Carbide intensificado, y una combinación de ambos (híbrido). El silicio grado solar es el principal componente para producir paneles solares. La contribución de este capítulo es la implementación de la Matching law junto con la planificación del silicio grado solar teniendo en cuenta las máximas ganancias. El problema de este capítulo puede enunciarse de la siguiente manera.

Dados:

- Flujos de materia prima máxima disponible
- Capacidad máxima de producción para cada proceso:
  - Siemens
  - FBR intensificado
  - Híbrido
- Composición requerida para cada proceso
- Factores de conversión para:
  - Materia prima por silicio producido,  $\alpha$
  - Silicio requerido por panel solar,  $\beta$
  - Electricidad producida por panel solar,  $\theta$
- Demanda eléctrica del sector residencial
- Paneles objetivo
  - Establecido por el tomador de decisiones que es la persona que asume los gastos
- Paneles propuestos
  - Establecido por el CEO de la empresa o el usuario final, según sea el caso

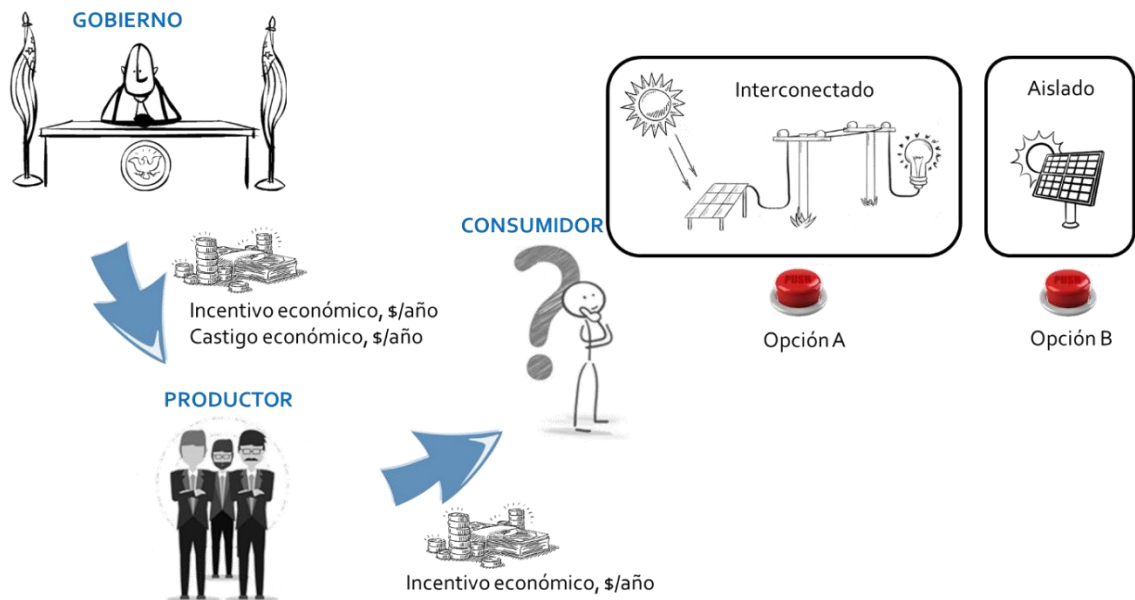
- Incentivos económicos base
  - Establecido por el tomador de decisiones
- Costos unitarios de operación y transporte

La Matching law es adaptada a un modelo de optimización matemática y el problema consiste en determinar la preferencia del usuario final con la máxima ganancia. La forma en que esto se incluye se muestra en la **Figura 3.1**. En el caso de estudio que se presenta, el gobierno es quien toma las decisiones porque es responsable de pagar los incentivos o implementar los castigos económicos. La perspectiva que se considera es estudiar el efecto del gobierno sobre los productores y consumidores. Se proponen diferentes escenarios para analizar las perspectivas antes mencionadas.

El consumidor puede elegir entre dos opciones:

- Usar paneles solares interconectados a la red
- Usar paneles solares aislados

La decisión final estará influenciada por los incentivos y castigos que brinde el gobierno. Siguiendo esas ideas, se puede predecir el comportamiento.

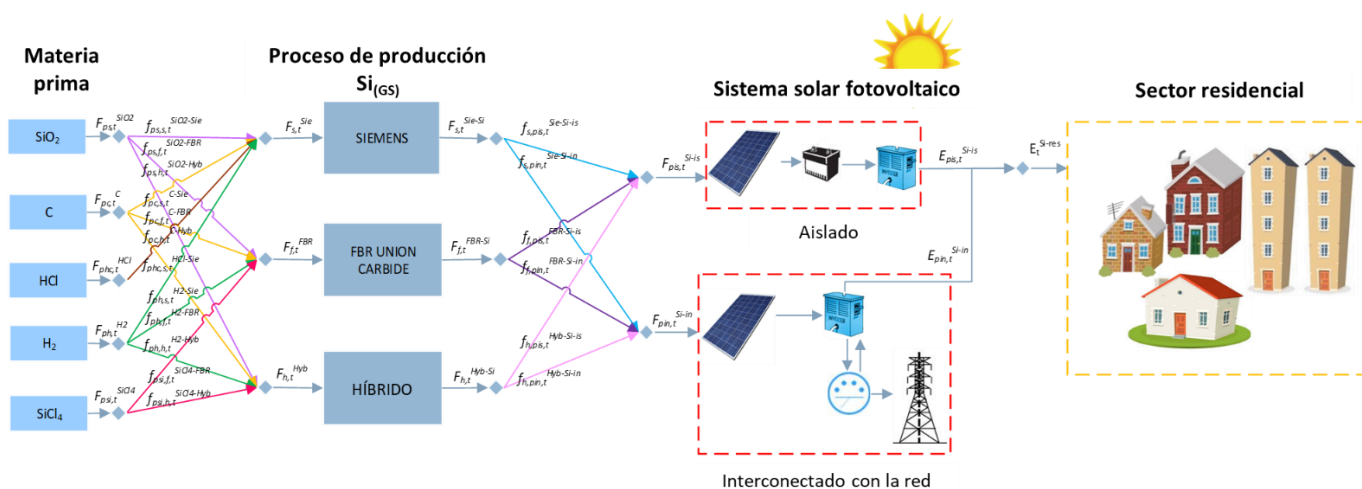


**Figura 3.1.** Descripción del planteamiento del problema

Otro tema importante que es necesario tomar en cuenta, es la inclusión de diferentes procesos para la obtención del silicio. Se considera el proceso Siemens que es el proceso más común pero tiene bajo rendimiento. También se utiliza el reactor de lecho fluidizado (FBR) y el proceso se intensificó mediante el uso de una columna de destilación reactiva y de esta manera se ha logrado el desarrollo de nuevos equipos para obtener mejores resultados [59]. Otro tipo de proceso es un proceso híbrido que combina tanto el Siemens y el FBR convencional. Estos procesos están destinados a reducir el uso de materia prima [58] para tener procesos intensificados.

### 3.2 Modelo

El modelo matemático propuesto se basa en la superestructura que se muestra en la **Figura 3.2**, la cual representa el problema a abordar e involucra todas las posibilidades para resolverlo. Se considera la materia prima disponible para su uso en diferentes ciudades del país. La materia prima es transportada a los diferentes procesos para producir silicio grado solar (Siemens, FBR Union Carbide intensificado e Híbrido); además debe cumplir con los requisitos de composición para su procesamiento. Una vez que se obtiene el  $Si_{(GS)}$ , se utiliza para construir paneles solares aislados o paneles solares interconectados a la red existente y posteriormente se utilizará para satisfacer las demandas eléctricas del sector residencial del país.



**Figura 3.2.** Superestructura propuesta para la planificación de silicio

### 3.2.1 Materia prima

La capacidad de producción de la materia prima ( $F_{ps}^{cap-SiO_2}$ ), en este caso dióxido de silicio, no puede ser superior a la producción máxima ( $F_{ps}^{MAX-SiO_2}$ ). Para determinar la existencia de las plantas de producción, se multiplica la respectiva variable binaria ( $y_{ps}^{SiO_2}$ ) por la capacidad máxima disponible.

$$F_{ps}^{cap-SiO_2} \leq F_{ps}^{MAX-SiO_2} \cdot y_{ps}^{SiO_2}, \forall ps \quad (47)$$

También es necesario conocer el flujo más grande de cada materia prima ( $F_{ps,t}^{SiO_2}$ ) que servirá como la capacidad de instalación requerida.

$$F_{ps}^{cap-SiO_2} \geq F_{ps,t}^{SiO_2}, \forall ps, \forall t \quad (48)$$

El costo de producción de cada una de las plantas de materia prima ( $Cost^{p-SiO_2}$ ) se calcula a través del costo de operación ( $UOC_{ps}^{SiO_2} \cdot F_{ps,t}^{SiO_2}$ ) más el costo de capital ( $a^{SiO_2} \cdot y_{ps}^{SiO_2} + b^{SiO_2} \cdot (F_{ps}^{cap-SiO_2})^{c^{SiO_2}}$ ).

$$Cost^{p-SiO_2} = \sum_{ps} \sum_t UOC_{ps}^{SiO_2} \cdot F_{ps,t}^{SiO_2} + k_F \cdot \sum_{ps} a^{SiO_2} \cdot y_{ps}^{SiO_2} + b^{SiO_2} \cdot (F_{ps}^{cap-SiO_2})^{c^{SiO_2}} \quad (49)$$

De la misma manera para cada materia prima requerida.

#### 3.2.1.1 Distribución de materia prima

El  $SiO_2$  producido ( $F_{ps,t}^{SiO_2}$ ) puede ser enviado al proceso Siemens ( $f_{ps,s,t}^{SiO_2-Sie}$ ), al proceso FBR ( $f_{ps,f,t}^{SiO_2-FBR}$ ) o al proceso híbrido ( $f_{ps,h,t}^{SiO_2-Hyb}$ ), así mismo se aplica para cada una de las materias primas requeridas.

$$F_{ps,t}^{SiO_2} = \sum_s f_{ps,s,t}^{SiO_2-Sie} + \sum_f f_{ps,f,t}^{SiO_2-FBR} + \sum_h f_{ps,h,t}^{SiO_2-Hyb}, \forall ps, \forall t \quad (50)$$

$$F_{pc,t}^C = \sum_s f_{pc,s,t}^{C-Sie} + \sum_f f_{pc,f,t}^{C-FBR} + \sum_h f_{pc,h,t}^{C-Hyb}, \forall pc, \forall t \quad (51)$$

$$F_{phc,t}^{HCl} = \sum_s f_{phc,s,t}^{HCl-Sie}, \forall phc, \forall t \quad (52)$$

$$F_{ph,t}^{H_2} = \sum_s f_{ph,s,t}^{H_2-Sie} + \sum_f f_{ph,f,t}^{H_2-FBR} + \sum_h f_{ph,h,t}^{H_2-Hyb}, \forall ph, \forall t \quad (53)$$

$$F_{psi,t}^{SiCl_4} = \sum_f f_{psi,f,t}^{SiCl_4-FBR} + \sum_h f_{psi,h,t}^{SiCl_4-Hyb}, \forall psi, \forall t \quad (54)$$

### 3.2.1.2 Costo de transporte para la materia prima

El costo de transporte ( $Cost^{t-raw}$ ) se calcula multiplicando el costo unitario de transporte para cada planta de producción de cada materia prima a las diferentes plantas de procesamiento ( $UTC_{ps,s}^{SiO_2-Sie}$ ) para obtener el  $Si_{GS}$  por el flujo de materia prima a transportar ( $f_{ps,s,t}^{SiO_2-Sie}$ ).

$$Cost^{t-raw} = \sum_t \left[ \sum_{phc} \left( \sum_s UTC_{phc,s}^{HCl-Sie} \cdot f_{phc,s,t}^{HCl-Sie} \right) + \sum_{ph} \left( \sum_s UTC_{ph,s}^{H_2-Sie} \cdot f_{ph,s,t}^{H_2-Sie} + \sum_f UTC_{ph,f}^{H_2-FBR} \cdot f_{ph,f,t}^{H_2-FBR} + \sum_h UTC_{ph,h}^{H_2-Hyb} \cdot f_{ph,h,t}^{H_2-Hyb} \right) + \sum_{psi} \left( \sum_f UTC_{psi,f}^{SiCl_4-FBR} \cdot f_{psi,f,t}^{SiCl_4-FBR} + \sum_h UTC_{psi,h}^{SiCl_4-Hyb} \cdot f_{psi,h,t}^{SiCl_4-Hyb} \right) + \sum_{pc} \left( \sum_s UTC_{pc,s}^{C-Sie} \cdot f_{pc,s,t}^{C-Sie} + \sum_f UTC_{pc,f}^{C-FBR} \cdot f_{pc,f,t}^{C-FBR} + \sum_h UTC_{pc,h}^{C-Hyb} \cdot f_{pc,h,t}^{C-Hyb} \right) + \sum_{ps} \left( \sum_s UTC_{ps,s}^{SiO_2-Sie} \cdot f_{ps,s,t}^{SiO_2-Sie} + \sum_f UTC_{ps,f}^{SiO_2-FBR} \cdot f_{ps,f,t}^{SiO_2-FBR} + \sum_h UTC_{ps,h}^{SiO_2-Hyb} \cdot f_{ps,h,t}^{SiO_2-Hyb} \right) \right] \quad (55)$$

### 3.2.2 Costo de transporte de $Si_{GS}$

El costo de transporte de  $Si_{GS}$  ( $Cost^{t-Si}$ ) se calcula multiplicando el costo unitario de transporte del  $Si_{GS}$  obtenido en cada uno de los diferentes procesos ( $UTC_{s,pis}^{Sie-is}$ ) que es enviado a las plantas para la producción de paneles solares por el flujo de silicio requerido ( $f_{s,pis,t}^{Sie-Si-is}$ ).

$$Cost^{t-Si} = \sum_t \left[ \sum_s \left( \sum_{pis} UTC_{s,pis}^{Sie-is} \cdot f_{s,pis,t}^{Sie-Si-is} + \sum_{pin} UTC_{s,pin}^{Sie-in} \cdot f_{s,pin,t}^{Sie-Si-in} \right) + \right. \\ \left. \sum_f \left( \sum_{pis} UTC_{f,pis}^{FBR-is} \cdot f_{f,pis,t}^{FBR-Si-is} + \sum_{pin} UTC_{f,pin}^{FBR-in} \cdot f_{f,pin,t}^{FBR-Si-in} \right) + \right. \\ \left. \sum_h \left( \sum_{pis} UTC_{h,pis}^{Hyb-is} \cdot f_{h,pis,t}^{Hyb-Si-is} + \sum_{pin} UTC_{h,pin}^{Hyb-in} \cdot f_{h,pin,t}^{Hyb-Si-in} \right) \right] \quad (56)$$

### 3.2.3 Proceso de producción del SiGS

El silicio de grado solar (SiGS) se usa típicamente en aplicaciones fotovoltaicas y se fabrica comercialmente mediante el proceso de Siemens, ya que es barato y está disponible fácilmente. Sin embargo, debido al bajo rendimiento del proceso Siemens ( $F_{s,t}^{Sie}$ ), se han considerado dos alternativas de procesos de producción de SiGS. El primero es un proceso de Reactor de Lecho Fluidizado (FBR) intensificado ( $F_{f,t}^{FBR}$ ) utilizando una columna de destilación reactiva. El segundo es un proceso híbrido ( $F_{h,t}^{Hyb}$ ) que combina los procesos Siemens y FBR convencionales para aprovechar al máximo las ventajas de ambos.

La materia prima necesaria es enviada a cada uno de los procesos.

$$F_{s,t}^{Sie} = \sum_{ps} f_{ps,s,t}^{SiO_2-Sie} + \sum_{pc} f_{pc,s,t}^{C-Sie} + \sum_{phc} f_{phc,s,t}^{HCl-Sie} + \sum_{ph} f_{ph,s,t}^{H_2-Sie}, \forall s, \forall t \quad (57)$$

Se debe considerar la composición necesaria de la materia prima para garantizar que se lleven a cabo las reacciones de cada proceso. Las siguientes ecuaciones (58-61) indican la relación que debe existir entre la materia prima para producir SiGS en el caso del proceso Siemens, donde X representa la fracción de cada compuesto.

$$f_{ps,s,t}^{SiO_2-Sie} = X^{SiO_2-Sie} \cdot F_{s,t}^{Sie}, \forall ps, \forall s, \forall t \quad (58)$$

$$f_{pc,s,t}^{C-Sie} = X^{C-Sie} \cdot F_{s,t}^{Sie}, \forall pc, \forall s, \forall t \quad (59)$$

$$f_{phc,s,t}^{HCl-Sie} = X^{HCl-Sie} \cdot F_{s,t}^{Sie}, \forall phc, \forall s, \forall t \quad (60)$$

$$f_{ph,s,t}^{H_2-Sie} = X^{H_2-Sie} \cdot F_{s,t}^{Sie}, \forall ph, \forall s, \forall t \quad (61)$$

Se aplicaron relaciones similares para los procesos FBR e Híbrido.

El Si<sub>GS</sub> obtenido del proceso Siemens ( $F_{s,t}^{Sie-Si}$ ) se calcula multiplicando el flujo de materia prima ( $F_{s,t}^{Sie}$ ) por un factor de conversión ( $\alpha^{Sie}$ ), de manera similar para los procesos FBR e Híbrido.

$$F_{s,t}^{Sie-Si} = \alpha^{Sie} \cdot F_{s,t}^{Sie}, \forall s, \forall t \quad (62)$$

$$F_{f,t}^{FBR-Si} = \alpha^{FBR} \cdot F_{f,t}^{FBR}, \forall f, \forall t \quad (63)$$

$$F_{h,t}^{Hyb-Si} = \alpha^{Hyb} \cdot F_{h,t}^{Hyb}, \forall h, \forall t \quad (64)$$

La capacidad de instalación ( $F_s^{cap-Sie}$ ) no puede ser mayor a la producción máxima de Si<sub>GS</sub> ( $F_s^{MAX-Sie}$ ) y para determinar su existencia se multiplica la capacidad máxima disponible por la variable binaria ( $y_s^{Sie}$ ).

$$F_s^{cap-Sie} \leq F_s^{MAX-Sie} \cdot y_s^{Sie}, \forall s \quad (65)$$

Además, el flujo de Si<sub>GS</sub> ( $F_{s,t}^{Sie-Si}$ ) no puede ser superior a la capacidad establecida.

$$F_{s,t}^{cap-Sie} \geq F_{s,t}^{Sie-Si}, \forall s, \forall t \quad (66)$$

Los costos de producción del Si<sub>GS</sub> ( $Cost^{p-Sie}$ ) se calculan a partir de los costos unitarios de operación ( $UOC_s^{Sie} \cdot F_{s,t}^{Sie-Si}$ ) más los costos de capital como se muestra a continuación ( $a^{Sie} \cdot y_s^{Sie} + b^{Sie} (F_s^{cap-Sie})^{c^{Sie}}$ ).

$$Cost^{p-Sie} = \sum_s \sum_t UOC_s^{Sie} \cdot F_{s,t}^{Sie-Si} + k_F \cdot \sum_s a^{Sie} \cdot y_s^{Sie} + b^{Sie} (F_s^{cap-Sie})^{c^{Sie}} \quad (67)$$

De manera similar para los procesos FBR e Híbrido.

### 3.2.3.1 Distribución de Si<sub>GS</sub>

El Si<sub>GS</sub> que se genera a través de los diferentes procesos ( $F_{s,t}^{Sie-Si}$ ,  $F_{f,t}^{FBR-Si}$ ,  $F_{h,t}^{Hyb-Si}$ ) puede ser utilizado en la producción de paneles solares para sistemas fotovoltaicos aislados ( $f_{s,pis,t}^{Sie-Si-is}$ ) o interconectados a la red ( $f_{s,pin,t}^{Sie-Si-in}$ ).

$$F_{s,t}^{Sie-Si} = \sum_{pis} f_{s,pis,t}^{Sie-Si-is} + \sum_{pin} f_{s,pin,t}^{Sie-Si-in}, \forall s, \forall t \quad (68)$$

$$F_{f,t}^{FBR-Si} = \sum_{pis} f_{f,pis,t}^{FBR-Si-is} + \sum_{pin} f_{f,pin,t}^{FBR-Si-in}, \forall f, \forall t \quad (69)$$

$$F_{h,t}^{Hyb-Si} = \sum_{pis} f_{h,pis,t}^{Hyb-Si-is} + \sum_{pin} f_{h,pin,t}^{Hyb-Si-in}, \forall h, \forall t \quad (70)$$

### 3.2.4 Venta de Si<sub>GS</sub>

La venta de Si<sub>GS</sub> ( $Sale^{Si}$ ) se obtiene al multiplicar el precio unitario de venta ( $US_t^{Si}$ ) por el flujo de Si<sub>GS</sub> requerido de cada proceso ( $F_{s,t}^{Sie-Si}$ ,  $F_{f,t}^{FBR-Si}$ ,  $F_{h,t}^{Hyb-Si}$ ).

$$Sale^{Si} = \sum_t \left[ US_t^{Si} \cdot \left( \sum_s F_{s,t}^{Sie-Si} + \sum_f F_{f,t}^{FBR-Si} + \sum_h F_{h,t}^{Hyb-Si} \right) \right] \quad (71)$$

### 3.2.5 Sistema solar fotovoltaico

El flujo de silicio para producir paneles solares para el sistema fotovoltaico aislado ( $F_{pis,t}^{Si-is}$ ) se satisface a partir de los procesos Siemens ( $f_{s,pis,t}^{Sie-Si-is}$ ), FBR ( $f_{f,pis,t}^{FBR-Si-is}$ ) e Híbrido ( $f_{h,pis,t}^{Hyb-Si-is}$ ).

$$F_{pis,t}^{Si-is} = \sum_s f_{s,pis,t}^{Sie-Si-is} + \sum_f f_{f,pis,t}^{FBR-Si-is} + \sum_h f_{h,pis,t}^{Hyb-Si-is}, \forall pis, \forall t \quad (72)$$

Asimismo, en el caso del sistema fotovoltaico interconectado con la red ( $F_{pin,t}^{Si-in}$ ).

$$F_{pin,t}^{Si-in} = \sum_s f_{s,pin,t}^{Sie-Si-in} + \sum_f f_{f,pin,t}^{FBR-Si-in} + \sum_h f_{h,pin,t}^{Hyb-Si-in}, \forall pin, \forall t \quad (73)$$

El número de paneles solares aislados según la cantidad de Si<sub>GS</sub> requerida se determina multiplicando el flujo de silicio ( $F_{pis,t}^{Si-is}$ ) por un factor ( $\beta$ ) (para cada panel por cantidad de silicio).

$$P_{pis,t}^{is} = \beta \cdot F_{pis,t}^{Si-is}, \forall pis, \forall t \quad (74)$$

Lo mismo para el caso de paneles solares interconectados a la red ( $P_{pin,t}^{in}$ ).

$$P_{pin,t}^{in} = \beta \cdot F_{pin,t}^{Si-in}, \forall pin, \forall t \quad (75)$$

La electricidad producida en el sistema fotovoltaico aislado ( $E_{pis,t}^{Si-is}$ ) se calcula multiplicando un factor de conversión ( $\theta^{is}$ ) por el flujo de silicio requerido para la construcción del panel solar ( $F_{pis,t}^{Si-is}$ ).

$$E_{pis,t}^{Si-is} = \theta^{is} \cdot F_{pis,t}^{Si-is}, \forall pis, \forall t \quad (76)$$

Así como el sistema interconectado con la red ( $E_{pin,t}^{Si-in}$ ).

$$E_{pin,t}^{Si-in} = \theta^{in} \cdot F_{pin,t}^{Si-in}, \forall pin, \forall t \quad (77)$$

### 3.2.6 Sector residencial

La electricidad requerida para el sector residencial ( $E_t^{Si-res}$ ) necesita ser satisfecha a partir de la electricidad producida por el sistema fotovoltaico aislado ( $E_{pis,t}^{Si-is}$ ) y el interconectado a la red ( $E_{pin,t}^{Si-in}$ ).

$$E_t^{Si-res} = \sum_{pis} E_{pis,t}^{Si-is} + \sum_{pin} E_{pin,t}^{Si-in}, \forall t \quad (78)$$

### 3.2.7 Comportamiento

En los últimos años, el uso de paneles solares ha despertado un mayor interés por sus beneficios y se ha incentivado a la población a utilizarlos a través de la continua comercialización. En este contexto, se puede utilizar la Matching law. La Matching law establece que los organismos distribuirán su comportamiento entre las alternativas de

respuesta disponibles en la misma proporción en que se distribuyen los incentivos entre esas alternativas [60]. Si el castigo es lo contrario del incentivo, como establece la ley negativa del efecto, entonces los castigos entregados por cada alternativa deben reducirse de los incentivos entregados por la alternativa [61]; significa que el premio debe ser reducido por el castigo según el caso.

Usando la nomenclatura establecida por la matching law, B1 y B2 son el comportamiento de respuesta y representan el flujo de dinero que atrae a cada una de las alternativas, donde 1 es el uso de paneles solares aislados y 2 denota el uso de paneles solares interconectados con la red. Los parámetros R1 y R2, indican incentivos económicos. Los castigos P1 y P2, consideran el cobro de multas. De esta forma, se puede determinar la respuesta de la población ante incentivos y castigos según el uso de paneles solares. Además, el tomador de decisiones puede controlar el comportamiento modificando el flujo de dinero involucrado y puede incentivar el uso de paneles solares a través de esta metodología.

### **3.2.7.1 Paneles aislados**

La ecuación (79) se utiliza para calcular los incentivos económicos (recompensas,  $R_{pis,t}^1$ ) y los castigos económicos ( $P_{pis,t}^1$ ). Se basa en el estudio que realizó Gonik [52]. Donde considera que el nivel de esfuerzo no puede ser el mismo en todo el sistema a estudiar debido a la diferencia geográfica, siendo algunas zonas comercialmente más difíciles que otras por lo que el tomador de decisiones establece el objetivo considerando lo antes mencionado. Además, se le pide al productor que proponga un monto determinado que considere que puede cumplir, sabiendo que al cumplir con ese monto obtendrá un incentivo económico, pero si no lo cumple será sancionado económicamente. De esta manera, tanto el tomador de decisiones como el productor están involucrados. Es necesario involucrar al que recibe los incentivos para establecer los objetivos y así asegurar que hará todo lo posible para lograr el objetivo de producción y ganar los incentivos, pero también debe ser consciente de sus límites y no proponer más de sus capacidades.

$P_{pis,t}^{is-p}$  representa el número de paneles propuesto por el director general de la empresa o el usuario final, según el caso. Esos son los paneles que el CEO/usuario pretende lograr, es una situación hipotética porque ese número representa el número de paneles que es fácil de usar

para ellos, pero también el número debe ser confiable y alcanzable. Se comprometen a llegar al número y en base a eso se calculan los incentivos/castigos.  $P_{pis,t}^{is-oc}$  es la cantidad objetivo de paneles solares establecida por el tomador de decisiones. Es sabido que la situación económica en todo un territorio considerado no podría ser la misma, es por ello que se considera el ingreso per cápita de cada localidad que se utiliza para diferenciar las demandas de acuerdo a sus capacidades económicas.  $IE^{R^1}$  es el incentivo económico base que se puede obtener.  $u^{is}$ ,  $x^{is}$  y  $v^{is}$  son parámetros necesarios.

- $Y_{A_{pis,t}}^{R^1}$  se activará si el número de paneles producidos es igual al número de paneles propuestos  $P_{pis,t}^{is-p}$ . La recompensa es el incentivo económico base y no existe castigo.
- $Y_{B_{pis,t}}^{R^1}$  se activará si el número de paneles producidos es mayor que los paneles propuestos. La recompensa será mayor que el incentivo económico base y no habrá castigo.
- $Y_{C_{pis,t}}^{R^1}$  se activará si el número de paneles producidos es menor a los paneles propuestos. No hay recompensa y el castigo será mayor que el incentivo económico base.

$$\begin{bmatrix} Y_{A_{pis,t}}^{R^1} \\ P_{pis,t}^{is} = P_{pis,t}^{is-p} \\ R_{pis,t}^1 = IE^{R^1} \cdot u^{is} \cdot \frac{P_{pis,t}^{is-p}}{P_{pis,t}^{is-oc}} \\ P_{pis,t}^1 = 0 \end{bmatrix} \vee \begin{bmatrix} Y_{B_{pis,t}}^{R^1} \\ P_{pis,t}^{is} > P_{pis,t}^{is-p} \\ R_{pis,t}^1 = IE^{R^1} \cdot x^{is} \cdot \frac{(P_{pis,t}^{is} + P_{pis,t}^{is-p})}{2 \cdot P_{pis,t}^{is-oc}} \\ P_{pis,t}^1 = 0 \end{bmatrix} \vee \begin{bmatrix} Y_{C_{pis,t}}^{R^1} \\ P_{pis,t}^{is} < P_{pis,t}^{is-p} \\ R_{pis,t}^1 = 0 \\ P_{pis,t}^1 = IE^{R^1} \cdot v^{is} \cdot \frac{(3 \cdot P_{pis,t}^{is} - P_{pis,t}^{is-p})}{2 \cdot P_{pis,t}^{is-oc}} \end{bmatrix}, \forall pis, \forall t \quad (79)$$

La matching law se utiliza para relacionar el flujo relativo de respuesta con el flujo relativo de recompensa en el uso de paneles solares aislados según Borrero y Vollmer [60].

$$\frac{B_{pis,t}^1}{B_{pis,t}^1 + B_{pin,t}^2} = \frac{R_{pis,t}^1 - P_{pis,t}^1}{(R_{pis,t}^1 - P_{pis,t}^1) + (R_{pin,t}^2 - P_{pin,t}^2)}, \forall pis, \forall pin, \forall t \quad (80)$$

### 3.2.7.2 Paneles interconectados

De manera similar, el caso de los paneles solares interconectados con la red se modela como se muestra a continuación.

$$\begin{bmatrix} Y_{A_{pin,t}}^{R^2} \\ P_{pin,t}^{in} = P_{pin,t}^{in-p} \\ R_{pin,t}^2 = IE^{R^2} \cdot u^{in} \cdot \frac{P_{pin,t}^{in-p}}{P_{pin,t}^{in-oc}} \\ P_{pin,t}^2 = 0 \end{bmatrix} \vee \begin{bmatrix} Y_{B_{pin,t}}^{R^2} \\ P_{pin,t}^{in} > P_{pin,t}^{in-p} \\ R_{pin,t}^2 = IE^{R^2} \cdot x^{in} \cdot \frac{(P_{pin,t}^{in} + P_{pin,t}^{in-p})}{2 \cdot P_{pin,t}^{in-oc}} \\ P_{pin,t}^2 = 0 \end{bmatrix} \vee \begin{bmatrix} Y_{C_{pin,t}}^{R^2} \\ P_{pin,t}^{in} < P_{pin,t}^{in-p} \\ R_{pin,t}^2 = 0 \\ P_{pin,t}^2 = IE^{R^2} \cdot v^{in} \cdot \frac{(3 \cdot P_{pin,t}^{in} - P_{pin,t}^{in-p})}{2 \cdot P_{pin,t}^{in-oc}} \end{bmatrix}, \forall pin, \forall t \quad (81)$$

Para determinar la asociación entre el flujo relativo de respuesta y el flujo relativo de recompensa en el caso de paneles solares interconectados a la red, se utiliza la siguiente relación.

$$\frac{B_{pin,t}^2}{B_{pis,t}^1 + B_{pin,t}^2} = \frac{R_{pin,t}^2 - P_{pin,t}^2}{(R_{pis,t}^1 - P_{pis,t}^1) + (R_{pin,t}^2 - P_{pin,t}^2)}, \forall pis, \forall pin, \forall t \quad (82)$$

Los flujos de respuesta B1 y B2 se relacionan con el flujo de dinero en el caso de paneles solares aislados e interconectados a la red.

$$B_{pis,t}^1 = IE^{R^1} \cdot P_{pis,t}^{is}, \forall pis, \forall t \quad (83)$$

$$B_{pin,t}^2 = IE^{R^2} \cdot P_{pin,t}^{in}, \forall pin, \forall t \quad (84)$$

Cuando hay más de una dirección en el sentido de los incentivos, las disyunciones se modifican de la siguiente manera (consulte el escenario C en la sección de resultados para obtener más detalles):

### 3.2.7.3 Caso aislado

$$\left[ \begin{array}{l} Y_{A_{pis,t}}^{R^1} \\ P_{pis,t}^{is} = P_{pis,t}^{is-p} \\ R_{pis,t}^1 = IE^{R^1} \cdot u^{is} \cdot \frac{P_{pis,t}^{is-p}}{P_{pis,t}^{is-oc}} \\ P_{pis,t}^1 = 0 \\ R_{pis,t}^{P1} = IE^{R^{P1}} \cdot u^{is} \cdot \frac{P_{pis,t}^{is-p}}{P_{pis,t}^{is-oc}} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{B_{pis,t}}^{R^1} \\ P_{pis,t}^{is} > P_{pis,t}^{is-p} \\ R_{pis,t}^1 = IE^{R^1} \cdot x^{is} \cdot \frac{(P_{pis,t}^{is} + P_{pis,t}^{is-p})}{2 \cdot P_{pis,t}^{is-oc}} \\ P_{pis,t}^1 = 0 \\ R_{pis,t}^{P1} = IE^{R^{P1}} \cdot x^{is} \cdot \frac{(P_{pis,t}^{is} + P_{pis,t}^{is-p})}{2 \cdot P_{pis,t}^{is-oc}} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{C_{pis,t}}^{R^1} \\ P_{pis,t}^{is} < P_{pis,t}^{is-p} \\ R_{pis,t}^1 = 0 \\ P_{pis,t}^1 = IE^{R^1} \cdot v^{is} \cdot \frac{(3 \cdot P_{pis,t}^{is} - P_{pis,t}^{is-p})}{2 \cdot P_{pis,t}^{is-oc}} \\ R_{pis,t}^{P1} = 0 \end{array} \right], \forall pis, \forall t \quad (85)$$

### 3.2.7.4 Caso interconectado

$$\left[ \begin{array}{l} Y_{A_{pin,t}}^{R^2} \\ P_{pin,t}^{in} = P_{pin,t}^{in-p} \\ R_{pin,t}^2 = IE^{R^2} \cdot u^{in} \cdot \frac{P_{pin,t}^{in-p}}{P_{pin,t}^{in-oc}} \\ P_{pin,t}^2 = 0 \\ R_{pin,t}^{P2} = IE^{R^{P2}} \cdot u^{in} \cdot \frac{P_{pin,t}^{in-p}}{P_{pin,t}^{in-oc}} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{B_{pin,t}}^{R^2} \\ P_{pin,t}^{in} > P_{pin,t}^{in-p} \\ R_{pin,t}^2 = IE^{R^2} \cdot x^{in} \cdot \frac{(P_{pin,t}^{in} + P_{pin,t}^{in-p})}{2 \cdot P_{pin,t}^{in-oc}} \\ P_{pin,t}^2 = 0 \\ R_{pin,t}^{P2} = IE^{R^{P2}} \cdot x^{in} \cdot \frac{(P_{pin,t}^{in} + P_{pin,t}^{in-p})}{2 \cdot P_{pin,t}^{in-oc}} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{C_{pin,t}}^{R^2} \\ P_{pin,t}^{in} < P_{pin,t}^{in-p} \\ R_{pin,t}^2 = 0 \\ P_{pin,t}^2 = IE^{R^2} \cdot v^{in} \cdot \frac{(3 \cdot P_{pin,t}^{in} - P_{pin,t}^{in-p})}{2 \cdot P_{pin,t}^{in-oc}} \\ R_{pin,t}^{P2} = 0 \end{array} \right], \forall pin, \forall t \quad (86)$$

Asimismo, las ecuaciones que involucran comportamiento se modifican de la siguiente manera.

$$\frac{B_{pis,t}^1}{B_{pis,t}^1 + B_{pin,t}^2} = \frac{R_{pis,t}^1 + R_{pis,t}^{P1} - P_{pis,t}^1}{(R_{pis,t}^1 + R_{pis,t}^{P1} - P_{pis,t}^1) + (R_{pin,t}^2 + R_{pin,t}^{P2} - P_{pin,t}^2)}, \forall pis, \forall pin, \forall t \quad (87)$$

$$\frac{B_{pin,t}^2}{B_{pis,t}^1 + B_{pin,t}^2} = \frac{R_{pin,t}^2 + R_{pin,t}^{P2} - P_{pin,t}^2}{(R_{pis,t}^1 + R_{pin,t}^{P1} - P_{pis,t}^1) + (R_{pin,t}^2 + R_{pin,t}^{P2} - P_{pin,t}^2)}, \forall pis, \forall pin, \forall t \quad (88)$$

$$B_{pis,t}^1 = (IE^{R^1} + IE^{R^{P1}}) \cdot P_{pis,t}^{is}, \forall pis, \forall t \quad (89)$$

$$B_{pin,t}^2 = \left( IE^{R^2} + IE^{R^{P^2}} \right) \cdot P_{pin,t}^{in}, \forall pin, \forall t \quad (90)$$

### 3.2.8 Función objetivo

La función objetivo considerada corresponde a la ganancia, la cual se calcula a través de la venta de  $Si_{GS}$  ( $Sale^{Si}$ ) menos todos los costos involucrados en la producción y transporte de la materia prima y los diferentes procesos para la obtención del silicio.

$$Profit = \left[ \begin{aligned} &Sale^{Si} - \\ &Cost^{p-SiO_2} - Cost^{p-C} - Cost^{p-HCl} - Cost^{p-H_2} - Cost^{p-SiCl_4} - \\ &Cost^{p-Sie} - Cost^{p-FBR} - Cost^{p-Hyb} - \\ &Cost^{t-raw} - Cost^{t-Si} + \\ &\sum_{pis} \sum_t (R_{pis,t}^1 - P_{pis,t}^1) + \sum_{pin} \sum_t (R_{pin,t}^2 - P_{pin,t}^2) \end{aligned} \right] \quad (91)$$

La formulación del modelo de programación matemática es un problema de un solo objetivo, donde el objetivo es maximizar la ganancia.

$$ObjectiveFunction = MaxProfit \quad (92)$$

### 3.3 Caso de estudio

El caso de estudio se aplica en México donde el Gobierno es quien toma las decisiones ya que es el responsable de pagar incentivos o implementar castigos económicos. En este caso, se considera la perspectiva del gobierno sobre los productores y consumidores. Se abordan diferentes escenarios donde se pretende analizar dichas perspectivas.

La materia prima debe ser transportada desde su punto de producción de las diferentes plantas de acuerdo a la disponibilidad que reporta el INEGI [62] (**Tabla 3.1**) a las plantas productoras de silicio ya sea para el proceso Siemens, el FBR intensificado o el Híbrido (ver **Tabla 3.2**). Para la instalación de paneles solares se seleccionaron 20 ciudades [63] que representan las ciudades donde se está fomentando el emprendimiento en el país (**Tabla 3.3**). El horizonte de tiempo contemplado es de 30 años divididos en periodos de un año. Los paneles se instalan durante el primer año.

**Tabla 3.1.** Ciudades que producen la materia prima requerida

| <b>Raw Material</b>               |
|-----------------------------------|
| <b>C</b>                          |
| Sabinas, Coahuila                 |
| Tezoatlán de Segura, Oaxaca       |
| San Marcial, Sonora               |
| San Pedro Corralitos, Chihuahua   |
| Ojinaga, Chihuahua                |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>            |
| Cananea, Sonora                   |
| Acapulco de Juárez, Guerrero      |
| Agua Prieta, Sonora               |
| Colima, Colima                    |
| Madera, Chihuahua                 |
| Santiago Papasquiaro, Durango     |
| <b>H<sub>2</sub></b>              |
| San Pedro Garza García, Monterrey |
| Ciudad de México                  |
| <b>SiCl<sub>4</sub></b>           |
| Naucalpan de Juárez, México       |
| Ejido Tepepan, CDMX               |
| <b>HCl</b>                        |
| Cuautitlán Izcalli, México        |
| Irapuato, Guanajuato              |
| Ciudad de México                  |

**Tabla 3.2.** Ciudades seleccionadas para instalar las plantas de producción de SiG<sub>s</sub>

| <b>Producción de silicio grado solar</b> |                       |                       |
|------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Siemens</b>                           | <b>FBR</b>            | <b>Híbrido</b>        |
| Ciudad de México                         | CDMX                  | CDMX                  |
| Irapuato, Guanajuato                     | Guaymas, Sonora       | Hermosillo, Sonora    |
| Santiago Papasquiaro, Durango            | Chihuahua, Chihuahua  | Durango, Durango      |
| Madera, Chihuahua                        | Puebla, Puebla        | Querétaro, Querétaro  |
| Monterrey, Nuevo León                    | Monterrey, Nuevo León | Monterrey, Nuevo León |

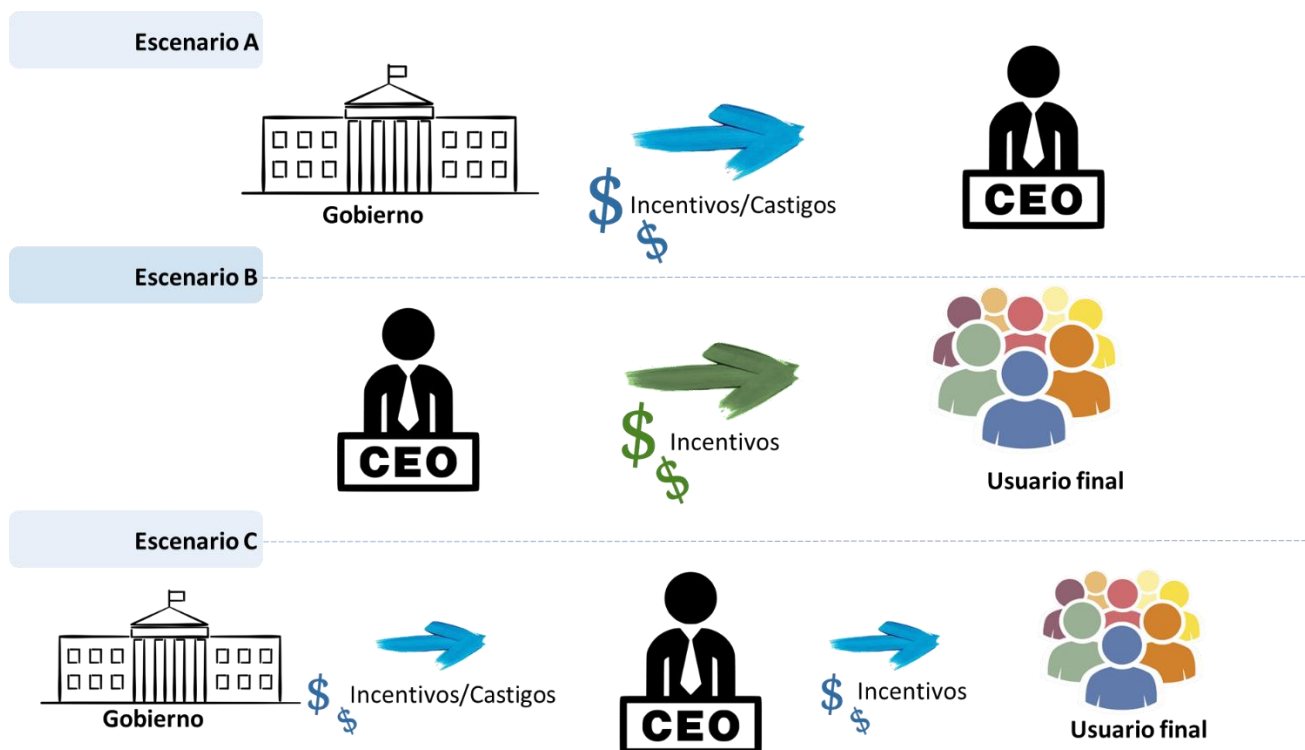
**Tabla 3.3.** Ciudades propuestas para instalar paneles solares

| Paneles                        |                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| Saltillo, Coahuila             | Córdoba, Veracruz                 |
| Tlaxcala, Tlaxcala             | Tehuacán, Puebla                  |
| Mérida, Yucatán                | Ciudad Fernández, San Luis Potosí |
| Puebla, Puebla                 | Chetumal, Quintana Roo            |
| Durango, Durango               | Zacatecas, Zacatecas              |
| Tampico, Tamaulipas            | Piedras Negras, Coahuila          |
| Poza Rica, Veracruz            | Ciudad Victoria, Tamaulipas       |
| Aguascalientes, Aguascalientes | Moroleón, Guanajuato              |
| Monterrey, Nuevo León          | Manzanillo, Colima                |
| Tijuana, Baja California       | Cuautla, Morelos                  |

Se consideró una empresa para la producción de paneles solares que se pueden instalar en una ciudad o en las 20 ciudades seleccionadas. Estas empresas son independientes del gobierno, pero pueden aceptar incentivos. El gobierno otorga incentivos económicos para promover la producción de paneles solares, pero el beneficio depende de la empresa en todos los escenarios considerados. Haciendo notar que el gobierno es el que se ocupa del bienestar social, razón por la cual da incentivos económicos para promover la producción solar con el fin de tener otra opción para producir electricidad en lugar de sólo quemar combustibles fósiles.

Se propusieron diferentes escenarios como se puede apreciar en la **Figura 3.3**.

- Escenario A: El gobierno paga incentivos económicos e implementa castigos económicos al CEO.
- Escenario B: El CEO paga incentivos económicos al usuario final.
- Escenario C: El gobierno paga incentivos económicos e implementa castigos económicos al CEO al mismo tiempo que el CEO paga incentivos económicos al usuario final.



**Figura 3.3.** Escenarios propuestos

De acuerdo con el consumo actual de energía eléctrica [64], se determinan los paneles solares necesarios si se cubre la demanda total y de esta manera se obtiene la base para los cálculos posteriores. Se utilizan paneles solares de 270 watts. Debido a la falta de información sobre el número de viviendas habitadas por municipio, se utilizan los datos relacionados con el número de habitantes que están disponibles en la plataforma del INEGI [65]. La suposición hecha es que aproximadamente 5 personas viven en cada hogar.

La “Matching law” es un enfoque matemático que describe la relación entre el flujo relativo de respuesta y el flujo relativo de recompensa frente a un estímulo concurrente; a partir de esta ley y respetando lo establecido, es posible darle distintas interpretaciones y utilizarla bajo diversos escenarios. La ecuación de la matching law desarrollada por Borrero y Vollmer [60] fue adaptada al enunciado del problema actual. Los productores (personas involucradas en la producción de paneles solares) son recompensados o castigados financieramente por el gobierno de acuerdo a la producción de paneles obtenidos para estudiar su comportamiento. Bajo estos antecedentes, se determinó la preferencia de la población entre paneles solares aislados o interconectados.

En el caso de utilizar paneles interconectados, los paneles objetivo establecidos por el gobierno representan satisfacer el 15% de la demanda nacional del sector residencial, es importante resaltar que el uso de energía solar en México para producir electricidad solo representa el 0.3% de la capacidad instalada. La propuesta de los productores corresponde a satisfacer el 10% ( $P_{pin,t}^{in-p}$ ). Sin embargo, se debe considerar que la situación económica no es igual en todo el país y no se puede exigir de manera similar. Cuando el producto interno bruto de cada estado es menor que el producto interno bruto promedio, los paneles objetivo ( $P_{pin,t}^{in-oc}$ ) que establece el gobierno corresponden al 50% menos, es decir, al 7.5% de la demanda. Por otro lado, si el producto interno bruto de cada estado es mayor al producto interno promedio, los paneles meta que establece el gobierno serían 25% mayores, lo que corresponde a satisfacer el 18.75% de la demanda nacional de energía eléctrica. Para los paneles propuestos se busca satisfacer 5 y 12.5% cuando es menor y mayor, respectivamente. En cuanto a los paneles solares aislados, los paneles objetivo ( $P_{pis,t}^{is-oc}$ ), cuando el producto interno bruto es menor, corresponden a satisfacer el 3.5% de la demanda, y cuando el producto interno bruto es mayor, los paneles objetivo establecidos por el gobierno deben satisfacer el 8.75% de la demanda. Además, los paneles propuestos por los productores ( $P_{pis,t}^{is-p}$ ) corresponden a satisfacer el 5% de la demanda de energía eléctrica del sector residencial. Con respecto a los paneles propuestos, 2.5 y 6.25% en el caso más pequeño y más grande.

Los consumidores finales deben proponer objetivos de consumo por tipo de paneles solares porque se pretende involucrar al consumidor final para estudiar la reacción sobre el sistema. La forma en que el consumidor propone objetivos permite suponer que una persona está a cargo de los cambios en cierta ciudad y esta persona es la voz de su ciudad para establecer el objetivo de los paneles solares. Los valores propuestos no pueden ser cero porque la idea principal es que la implementación de la cadena de suministro involucre paneles solares, la pregunta principal es si estos deben estar interconectados o no. La recompensa económica para el consumidor final afecta negativamente a las ganancias de la empresa y el castigo económico al consumidor afecta positivamente a las ganancias.

Para el escenario A, el incentivo económico base se establece a partir de la tonelada de CO<sub>2</sub> producida por kWh en cada tipo de panel y se otorgan 5 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub>; Con

base en esta información se otorgan 4.86 dólares para paneles aislados ( $IE^{R^1}$ ) y 2.916 dólares para paneles interconectados ( $IE^{R^2}$ ). En el escenario B, los incentivos económicos son otorgados por los productores hacia la población, es decir, el usuario final,  $4.86 \times 10^{-2}$  y  $2.916 \times 10^{-2}$  \$/panel para paneles aislados e interconectados, respectivamente.

### 3.4 Resultados

El modelo de optimización es un problema de programación mixto-entero no lineal. El modelo consta de 1,850 variables continuas y 1,254 restricciones. Se codificó en el software GAMS y se resolvió en una computadora con procesador i7 a 3.2 GHz y 12 GB de RAM. El tiempo promedio de CPU para cada solución fue de alrededor de 0.25 s con el resolutor SBB. No se ha demostrado que la solución sea óptima global porque el modelo matemático no es convexo; sin embargo, se utilizaron diferentes solucionadores y el que generó mejores soluciones fue SBB.

La ganancia obtenida en el escenario A es de  $7.9188 \times 10^8$  \$/año, donde la ganancia por la venta de  $Si_{GS}$  corresponde a  $2.41 \times 10^9$  \$/año. Los costos de producción de la materia prima, así como los diferentes procesos se muestran en la **Tabla 3.4**. El costo de transporte de la materia prima es de  $4.14 \times 10^8$  \$/año y para el silicio es de  $1.24 \times 10^7$  \$/año.

**Tabla 3.4.** Costos de producción de la materia prima y los procesos en todos los escenarios.

| Costos de producción,<br>\$/año |                    |
|---------------------------------|--------------------|
| <b>C</b>                        | $5.57 \times 10^6$ |
| <b>H<sub>2</sub></b>            | $5.14 \times 10^7$ |
| <b>HCl</b>                      | $3.66 \times 10^7$ |
| <b>SiCl<sub>4</sub></b>         | $9.35 \times 10^8$ |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>          | $2.22 \times 10^6$ |
| <b>FBR</b>                      | $4.34 \times 10^7$ |
| <b>Híbrido</b>                  | $1.01 \times 10^8$ |
| <b>Siemens</b>                  | $1.49 \times 10^7$ |

La producción de silicio se satisface principalmente con el proceso híbrido (70.1 %), este valor corresponde con los resultados obtenidos por Ramírez-Márquez y col. [58] donde el FBR convencional se intensifica cambiando los reactores y la zona de separación y reemplazándolos con una columna de destilación. Se desarrolla también un proceso híbrido combinando tanto Siemens como FBR convencional e incorporando lo mejor de cada uno. El proceso de Siemens tiene el costo más bajo, pero también la tasa de producción de silicio más baja. El FBR intensificado tiene el costo más alto pero una gran producción. Por otro lado, el proceso híbrido tiene la mayor tasa de producción con el costo de producción medio en comparación con los otros dos. Se demostró que el proceso Híbrido es el más rentable.

Los valores B1 y B2 representan el flujo de dinero que se dirige a cada opción considerada, es decir donde hay mayor flujo de dinero es la mayor cantidad de hogares que seleccionan ese tipo de panel. Se establecen las ecuaciones (93) y (94) para calcular el número de viviendas por municipio que optan por los paneles solares aislados o interconectados.

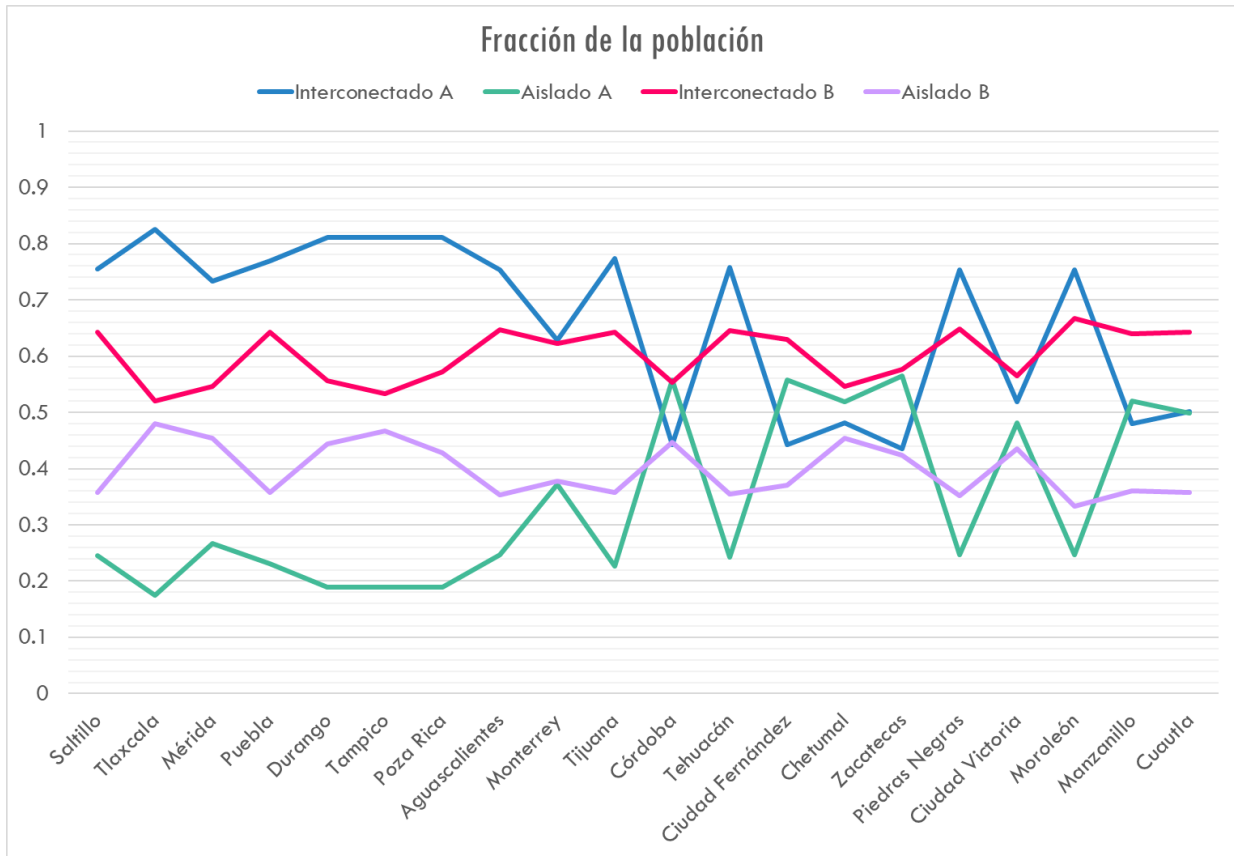
$$X_{pis,t}^{is} = \frac{B_{pis,t}^1}{B_{pis,t}^1 + B_{pin,t}^2}, \forall pis, \forall pin, \forall t \quad (93)$$

$$X_{pin,t}^{in} = \frac{B_{pin,t}^2}{B_{pis,t}^1 + B_{pin,t}^2}, \forall pis, \forall pin, \forall t \quad (94)$$

$X_{pis,t}^{is}$  y  $X_{pin,t}^{in}$  multiplicado por el número de casas en cada ciudad representan el número de casas que eligen cada tipo de panel.

En el escenario A, los incentivos afectan positivamente y las penalizaciones negativamente la ganancia. Aunque existe un mayor incentivo para el uso de paneles solares aislados, los resultados muestran que la población está más inclinada a utilizar paneles interconectados a la red para producir electricidad y satisfacer la demanda del sector residencial. Al exceder la cantidad de paneles solares propuestos se obtiene el incentivo base y se generan incentivos económicos. Sólo Tlaxcala y Monterrey recibieron castigos económicos. Además, se puede notar que aunque la economía del municipio sea buena o mala, como lo muestra el producto interno bruto, los usuarios prefieren instalar paneles solares interconectados a paneles solares aislados.

El Escenario B solo considera incentivos económicos otorgados por el productor hacia el usuario final. Las ecuaciones (79) y (81) son similares al caso A. En este caso, no hay sanción porque el usuario final no puede ser sancionado. Los incentivos los da el productor, por lo que se representa como un gasto extra y afecta negativamente la ganancia. Sin embargo, los resultados muestran una mayor ganancia en el escenario B ( $7.9223 \times 10^8$  \$/año) que en el escenario A ( $7.9188 \times 10^8$  \$/año), debido a que el escenario B no considera el castigo económico, aunque los incentivos otorgados son inferiores a los incentivos otorgados por el gobierno en el escenario A. En la **Figura 3.4** se compara el comportamiento de la población en ambos escenarios, y cabe señalar que la diferencia de selección en el escenario B es menor que en el escenario A, y la tendencia en ambos escenarios es utilizar paneles interconectados. Eso quiere decir que al dar más incentivos y castigos en el escenario A existe más discrepancia en la decisión final del usuario; en contraste con el escenario B donde no hay castigo, la decisión es más cercana entre paneles aislados e interconectados. Muestra que modificando los incentivos y castigos económicos es posible controlar el comportamiento del usuario. La intención de estudiar diferentes escenarios con diferentes tomadores de decisiones es ver la reacción de la cadena de suministro.

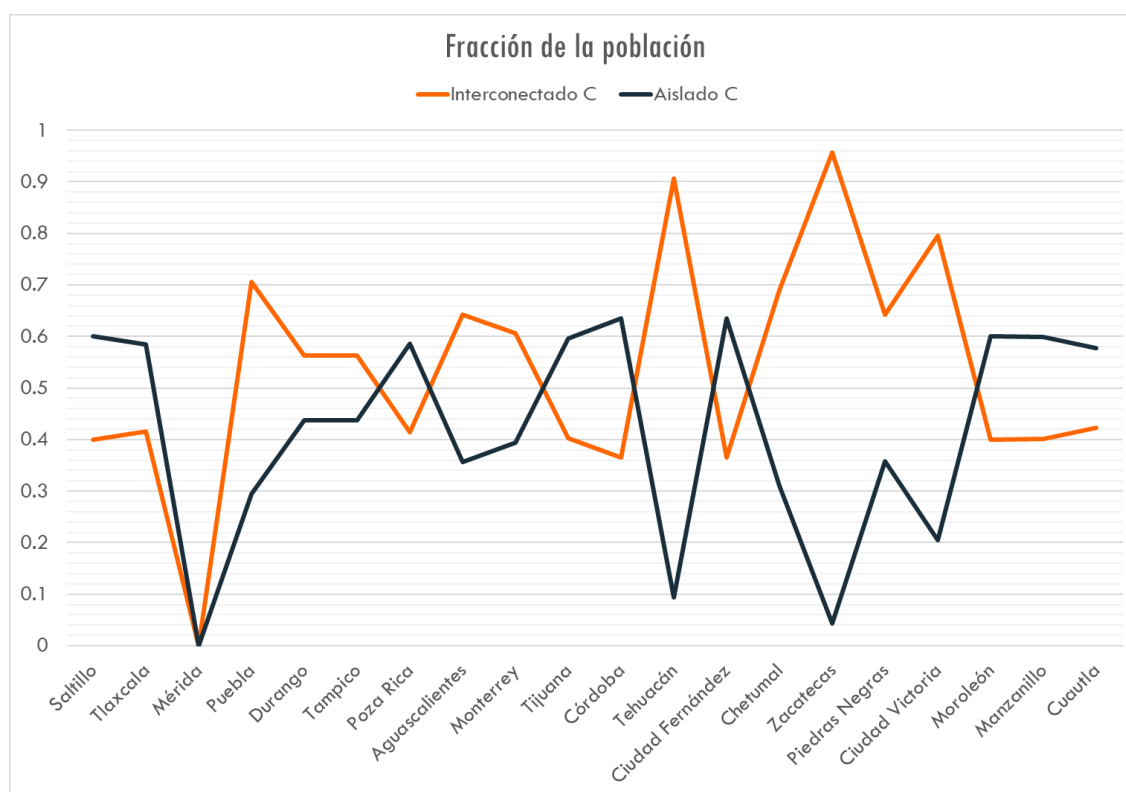


**Figura 3.4.** Comparación entre escenario A y B

El Escenario C considera que el gobierno otorga incentivos económicos o castiga económicamente a los productores de acuerdo a los paneles propuestos por las autoridades y simultáneamente los productores proponen una meta de paneles solares para que los usuarios la cumplan. En los tres escenarios, la ganancia se considera desde la perspectiva del productor. Los incentivos otorgados por el gobierno a los productores ( $R_{pis,t}^1$ ) afectan positivamente la ganancia, pero los incentivos otorgados por el productor al usuario final ( $R_{pis,t}^{P1}$ ) afectan negativamente la ganancia. Cuando la ganancia se ve afectada negativamente por los incentivos otorgados por el productor al usuario final, significa que el precio final del panel solar será menor. Para modelar el Escenario C, es necesario modificar las ecuaciones (79) y (81) para casos aislados e interconectados como se muestra en las ecuaciones (85) a (90). Donde el objetivo de paneles solares establecida por el gobierno es igual al objetivo establecido por los productores. Además, los paneles propuestos por el productor son los

mismos que los propuestos por el usuario. El incentivo económico base se mantiene igual que en los escenarios A y B, es decir  $IE^{R^1}$  es 4.86 y  $IE^{R^{P1}}$  es  $4.86 \times 10^{-2}$  para caso aislado,  $IE^{R^2}$  es 2.916 y  $IE^{R^{P2}}$  es  $2.916 \times 10^{-2}$  \$/panel para caso interconectado.

La preferencia de la población bajo el escenario C se muestra en la **Figura 3.5**, donde la ganancia es de  $7.9214 \times 10^8$  \$/año. En el 40% de las ciudades, más del 50% de los usuarios prefieren instalar paneles aislados. En el escenario A, el 25% de las ciudades prefieren paneles aislados. En cambio, en el escenario B, todas las ciudades prefieren instalar paneles interconectados.



**Figura 3.5.** Escenario C donde los incentivos se otorgan a los productores y al usuario final

Cabe señalar que en el caso de estudio abordado se analizaron varios escenarios para ver cómo reaccionará todo el sistema bajo diferentes objetivos propuestos por diferentes entidades y los escenarios presentados son solo casos para mostrar la aplicabilidad del enfoque propuesto. Sin embargo, se puede modificar fácilmente en el modelo matemático

para estudiar otros escenarios con objetivos diferentes porque el modelo es general. Este trabajo es el primer intento de comprender la relación entre la matching law y la planificación bajo los parámetros establecidos. Se puede hacer notar que las personas prefieren una opción sobre la otra debido a la recompensa y el castigo establecidos. A los productores realmente no les importa el tipo de panel, la diferencia dependerá de la preferencia del usuario final, el área geográfica, la estabilidad requerida del sistema, el presupuesto del usuario. Es importante decir que esos factores no están considerados en el alcance del problema, pero valdrá la pena incluirlos en un trabajo futuro.

### 3.5 Nomenclatura

#### 3.5.1 Conjuntos

|     |                                                           |
|-----|-----------------------------------------------------------|
| F   | Plantas de producción del proceso FBR Union Carbide       |
| H   | Plantas de producción del proceso Híbrido                 |
| PC  | Plantas de producción de C                                |
| PH  | Plantas de producción de H <sub>2</sub>                   |
| PHC | Plantas de producción de HCl                              |
| PIN | Sistemas solares fotovoltaicos interconectados con la Red |
| PIS | Sistemas solares fotovoltaicos aislados                   |
| PS  | Plantas de producción de SiO <sub>2</sub>                 |
| PSI | Plantas de producción de SiCl <sub>4</sub>                |
| S   | Plantas de producción del proceso Siemens                 |
| T   | Tiempo                                                    |

#### 3.5.2 Variables

|               |                                                                              |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $B_{pis,t}^1$ | Respuesta de la población cuando se utiliza panel solar aislado              |
| $B_{pin,t}^2$ | Respuesta de la población cuando se utilizan paneles solares interconectados |

|                      |                                                                             |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $Cost^{p-C}$         | Costo de producción de C                                                    |
| $Cost^{p-FBR}$       | Costo de producción de silicio en proceso FBR                               |
| $Cost^{p-H_2}$       | Costo de producción de $H_2$                                                |
| $Cost^{p-HCl}$       | Costo de producción de HCl                                                  |
| $Cost^{p-Hyb}$       | Costo de producción de silicio en proceso Híbrido                           |
| $Cost^{p-SiCl_4}$    | Costo de producción de $SiCl_4$                                             |
| $Cost^{p-Sie}$       | Costo de producción de silicio en el proceso de Siemens                     |
| $Cost^{p-SiO_2}$     | Costo de producción de $SiO_2$                                              |
| $Cost^{t-raw}$       | Costo de transporte de la materia prima                                     |
| $Cost^{t-Si}$        | Costo de transporte del silicio                                             |
| $E_{pin,t}^{Si-in}$  | Electricidad generada a partir de paneles solares interconectados           |
| $E_{pis,t}^{Si-is}$  | Electricidad generada a partir de paneles solares aislados                  |
| $F_s^{cap-Sie}$      | Capacidad de instalación necesaria para producir silicio en proceso Siemens |
| $F_{ps}^{cap-SiO_2}$ | Capacidad de instalación requerida para producir $SiO_2$                    |
| $F_{pc,t}^C$         | Flujo de C producido                                                        |
| $f_{pc,f,t}^{C-FBR}$ | Flujo de C necesario en el proceso FBR                                      |
| $f_{pc,h,t}^{C-Hyb}$ | Flujo de C necesario en el proceso híbrido                                  |
| $f_{pc,s,t}^{C-Sie}$ | Flujo de C necesario en el proceso de Siemens                               |
| $F_{f,t}^{FBR}$      | Flujo en proceso FBR                                                        |
| $F_{f,t}^{FBR-Si}$   | Flujo de silicio producido en el proceso FBR                                |

|                             |                                                                                             |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| $f_{f, pin, t}^{FBR-Si-in}$ | Flujo de silicio producido en el proceso FBR necesario para paneles solares interconectados |
| $f_{f, pis, t}^{FBR-Si-is}$ | Flujo de silicio producido en el proceso FBR necesario para paneles solares aislados        |
| $F_{ph, t}^{H_2}$           | Flujo de H <sub>2</sub> producido                                                           |
| $F_{h, t}^{Hyb}$            | Flujo en proceso híbrido                                                                    |
| $F_{psi, t}^{SiCl_4}$       | Flujo de SiCl <sub>4</sub> producido                                                        |
| $F_{s, t}^{Sie}$            | Flujo en el proceso siemens                                                                 |
| $F_{ps, t}^{SiO_2}$         | Flujo de SiO <sub>2</sub> producido                                                         |
| $P_{pis, t}^1$              | Castigo económico cuando se utiliza sistema fotovoltaico aislado                            |
| $P_{pin, t}^2$              | Castigo económico cuando se utiliza sistema fotovoltaico interconectado                     |
| $P_{pin, t}^{in}$           | Cantidad de paneles solares interconectados                                                 |
| $P_{pin, t}^{in-oc}$        | Cantidad objetivo de paneles solares interconectados                                        |
| $P_{pis, t}^{is}$           | Cantidad de paneles solares aislados                                                        |
| $P_{pis, t}^{is-oc}$        | Cantidad objetivo de paneles solares aislados                                               |
| $R_{pis, t}^1$              | Incentivo económico en sistema solar fotovoltaico aislado (Respuesta)                       |
| $R_{pin, t}^2$              | Incentivo económico en sistema solar fotovoltaico interconectado (Respuesta)                |
| $Sale^{Si}$                 | Venta de silicio                                                                            |

### 3.5.3 Variables binarias

|                       |                                                                                                                                                        |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $y_{A_{pis},t}^{R^1}$ | Activación de incentivo económico en paneles aislados cuando la cantidad de paneles producidos sea igual al número de paneles propuestos               |
| $y_{A_{pin},t}^{R^2}$ | Activación de incentivo económico en paneles interconectados cuando la cantidad de producción de paneles sea igual al número de paneles propuestos     |
| $y_{B_{pis},t}^{R^1}$ | Activación de incentivo económico en paneles aislados cuando la cantidad de paneles producidos sea mayor al número de paneles propuestos               |
| $y_{B_{pin},t}^{R^2}$ | Activación de incentivo económico en paneles interconectados cuando la cantidad de producción de paneles sea mayor al número de paneles propuestos     |
| $y_{C_{pis},t}^{R^1}$ | Activación de incentivo económico en paneles aislados cuando la cantidad de producción de paneles sea inferior al número de paneles propuestos         |
| $y_{C_{pin},t}^{R^2}$ | Activación de incentivo económico en paneles interconectados cuando la cantidad de producción de paneles sea menor a la cantidad de paneles propuestos |
| $y_s^{Sie}$           | Activación planta Siemens                                                                                                                              |
| $y_{ps}^{SiO_2}$      | Activación de la planta de producción de $SiO_2$                                                                                                       |

### 3.5.4 Parámetros

|                      |                                                                            |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| $a^{Sie}$            | Costo fijo unitario para la producción de silicio en el proceso de Siemens |
| $E_t^{Si-res}$       | Demanda de electricidad en el sector residencial                           |
| $F_s^{MAX-Sie}$      | Máxima producción de silicio en proceso Siemens                            |
| $F_{ps}^{MAX-SiO_2}$ | Máxima producción de $SiO_2$                                               |
| $IE^{R^1}$           | Incentivo económico base en paneles solares aislados                       |

|                            |                                                                                                               |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $IE^{R^2}$                 | Incentivo económico base en paneles solares interconectados                                                   |
| $k_F$                      | Factor utilizado para anualizar los costos de capital                                                         |
| $p_{pin,t}^{in-p}$         | Número propuesto de paneles solares interconectados                                                           |
| $p_{pis,t}^{is-p}$         | Número propuesto de paneles solares aislados                                                                  |
| $UOC_s^{Sie}$              | Costo unitario de operación del silicio en el proceso de Siemens                                              |
| $UOC_{ps}^{SiO_2}$         | Costo unitario de operación para la producción de $SiO_2$                                                     |
| $US_t^{Si}$                | Costo unitario de venta de silicio                                                                            |
| $UTC_{pc,f}^{C-FBR}$       | Costo unitario de transporte del proceso C a FBR                                                              |
| $UTC_{pc,h}^{C-Hyb}$       | Costo unitario de transporte de C a proceso Híbrido                                                           |
| $UTC_{pc,s}^{C-Sie}$       | Costo unitario de transporte de C a proceso Siemens                                                           |
| $UTC_{f, pin}^{FBR-in}$    | Costo unitario de transporte de silicio desde el proceso FBR hasta los paneles solares interconectados        |
| $UTC_{ph,f}^{H_2-FBR}$     | Costo unitario de transporte de $H_2$ a proceso FBR                                                           |
| $UTC_{phc,s}^{HCl-Sie}$    | Costo unitario de transporte de HCl al proceso de Siemens                                                     |
| $UTC_{h, pin}^{Hyb-in}$    | Costo unitario de transporte de silicio desde el proceso híbrido hasta los paneles solares interconectados    |
| $UTC_{psi,f}^{SiCl_4-FBR}$ | Costo unitario de transporte de $SiCl_4$ al proceso FBR                                                       |
| $UTC_{s, pin}^{Sie-in}$    | Costo unitario de transporte de silicio desde el proceso de Siemens hasta los paneles solares interconectados |

|                          |                                                                               |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| $UTC_{ps,f}^{SiO_2-FBR}$ | Costo unitario de transporte de $SiO_2$ al proceso FBR                        |
| $X^{C-Sie}$              | Composición de C necesaria en el proceso de Siemens                           |
| $\alpha^{FBR}$           | Factor de conversión de materia prima a silicio en proceso FBR                |
| $\beta$                  | Silicio necesario para producir un panel solar                                |
| $\delta$                 | Valor usado en disyunción para hacer una ligera diferencia en igualdades      |
| $\theta^{in}$            | Factor para producir electricidad a partir de paneles solares interconectados |

## **CAPÍTULO CUATRO**

### **INVOLUCRANDO EL COMPORTAMIENTO DE LA POBLACIÓN EN LA PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS INTEGRADOS**

#### **4.a Resumen**

En este capítulo se presenta un modelo matemático para la planificación estratégica de la cadena de suministro de energía teniendo en cuenta los combustibles fósiles y los biocombustibles. El modelo propuesto considera la extracción, producción, procesamiento y distribución de combustibles al consumidor, así como la interacción con las plantaciones forestales para capturar las emisiones generadas en todo el proceso. Se incorpora la matching law para predecir, controlar y comprender la situación en estudio. Se ha incluido el comportamiento de las personas para determinar su preferencia a la hora de decidir si instalar una refinería o una biorrefinería. La decisión está influida por factores económicos como los impuestos sobre las emisiones. El enfoque propuesto se aplicó a un caso de estudio en México, donde se considera la utilidad de todo el sistema, las emisiones generadas y los empleos. Los resultados muestran que al implementar la matching law es posible promover la producción de biocombustibles junto con los combustibles fósiles, así como determinar las preferencias en el sistema.

#### 4.1 Planteamiento del problema

La sensibilización sobre los efectos negativos de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector energético ha sido el foco de investigación en todo el mundo [66]. Es necesario establecer límites para regular las emisiones utilizando incentivos o castigos económicos [27]; así como considerar el uso de ecoindustrias mediante la implementación de plantaciones forestales [67]. Incluir la matching law en escenarios donde el actor puede seleccionar entre diferentes opciones es una forma de estudiar el efecto de su decisión en todo el sistema y puede predecir el comportamiento futuro al saber bajo qué circunstancias el tomador de decisiones se sentirá más atraído [46].

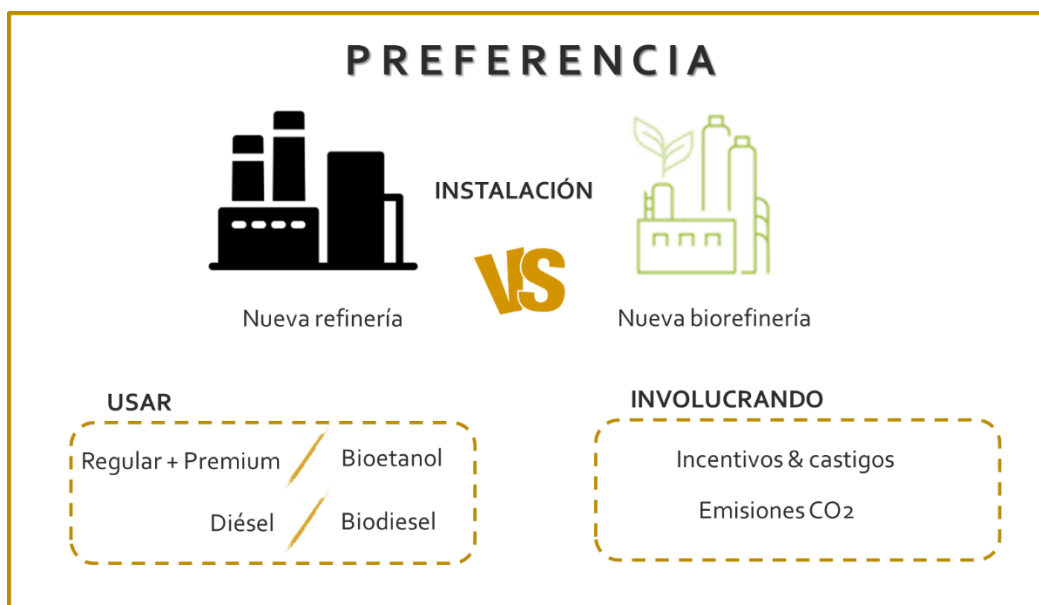
El problema que se aborda tiene como objetivo satisfacer la demanda de combustibles en una región específica considerando la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero involucrando incentivos y castigos económicos a través del esquema de la matching law. De esta forma, el problema puede enunciarse de la siguiente manera.

Se cuenta con la siguiente información:

- Límites para la región considerada:
  - Forestación
  - Transporte
- Disponibilidad de biomasa en la región
- Capacidad de procesamiento disponible:
  - Refinerías
  - Biorefinerías
- Datos de emisiones para cada sector de la cadena de suministro
- Emisiones objetivo:
  - Establecidas por el gobierno
- Emisiones propuestas:
  - Establecidas por el director general de la nueva refinería o nueva biorefinería
- Costos unitarios para:
  - Materia prima

- Capital y operación
- Bombeo y transporte

El problema consiste en determinar el comportamiento del tomador de decisiones implicando incentivos y castigos económicos por las emisiones que se generan de cada proceso (**Figura 4.1**). Se modela la preferencia sobre la instalación de nuevas refinerías  $i$  (por ejemplo, para el caso de estudio abordado ubicadas en Toluca, Guadalajara y Mazatlán) o nuevas biorefinerías  $b$  (1-6 para el caso de estudio abordado) que pueden ser de diferente biomasa  $bm$  (por ejemplo en el caso de estudio: astillas de madera, caña de azúcar, sorgo dulce, jatrofa, palma africana y desperdicios de agave). El campo de biomasa  $m$  (1-32) se puede ubicar en diferentes regiones (por ejemplo, los estados de México). Se incluyen plantaciones forestales ubicadas en terrenos disponibles para reforestación  $e$  (1-32 para el caso de estudio abordado) para capturar las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas en la cadena de suministro. También se considera la producción de las refinerías existentes  $i$  (en el caso de estudio abordado estas se ubican en Cadereyta, Ciudad Madero, Minatitlán, Salamanca, Salina Cruz y Tula a partir de los pozos de crudo o ubicados en aguas someras como son Tabasco, Veracruz, Chiapas, Puebla, Tamaulipas y San Luis Potosí). Los productos obtenidos de las refinerías  $p1$  (regular, gasolina premium y diésel) y biorefinerías  $p2$  (en el caso de estudio abordado para producir bioetanol y biodiesel) son enviados a los centros de distribución  $j$  (1-45 en el caso de estudio abordado) para almacenamiento y entrega ubicados en diferentes lugares de la región considerada (el territorio nacional).



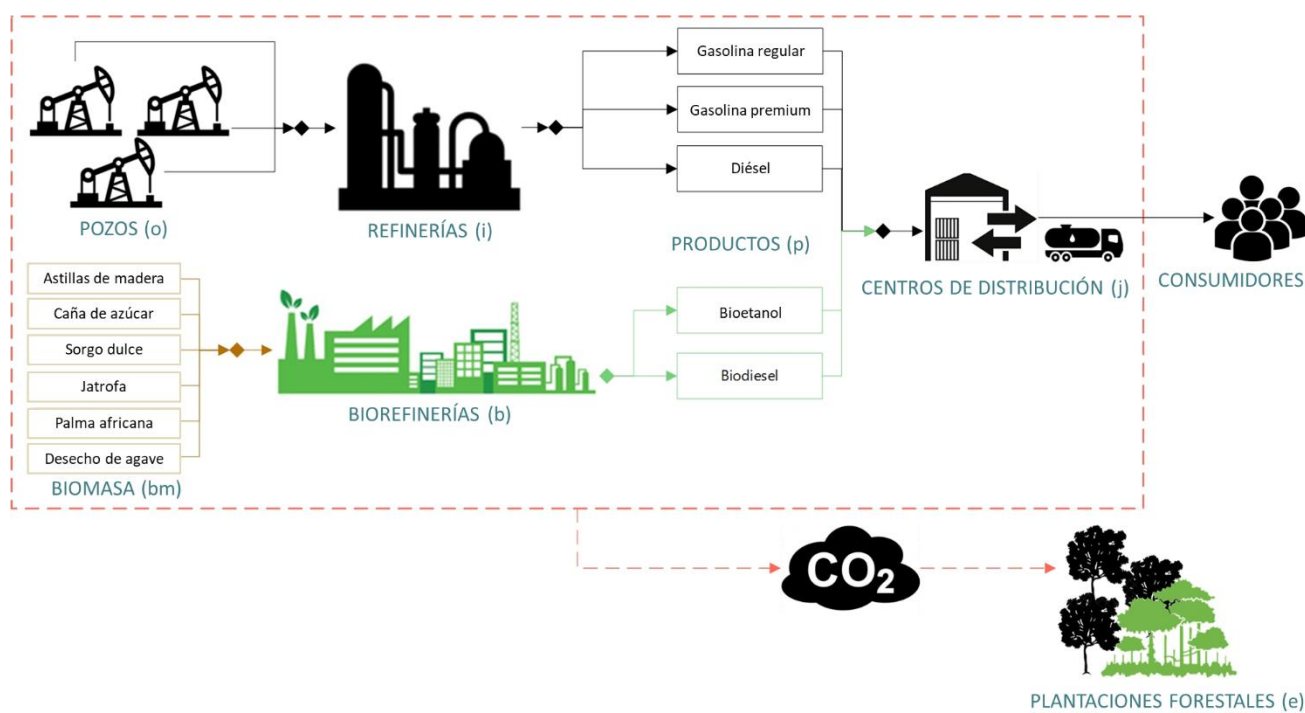
**Figura 4.1.** Descripción del problema

### 4.3 Modelo

El modelo matemático propuesto se basa en la superestructura presentada en la **Figura 4.2**. Se consideran varios pozos para extraer petróleo y enviarlo a diversas refinерías para procesar el crudo y obtener productos con valor agregado. Por otra parte, se contemplan diferentes tipos de biomasa (astillas de madera, caña de azúcar, sorgo dulce, jatrofa, palma africana y desechos de agave), las cuales son enviadas a biorefinerías para la obtención de bioproductos. Además, esas industrias interactúan con instalaciones capaces de capturar emisiones, más conocidas como ecoindustrias. Los productos de las refinерías y biorefinerías se transportan a los centros de distribución para llegar al usuario final para su consumo. Según las emisiones que se generan, se elige entre instalar nuevas refinерías o nuevas biorefinerías. Las ecuaciones relacionadas con la cadena de suministro incluyen los balances de masa para el crudo, y está restringida por una disponibilidad máxima de extracción de cada pozo y el crudo obtenido se distribuye a las refinерías existentes o nuevas refinерías. La instalación de nuevas refinерías se asocia a variables binarias para determinar su existencia o no según las necesidades del problema. Se ha considerado el costo de capital de las nuevas refinерías. Además, se tienen balances de masa de la biomasa disponible en los diferentes campos a considerar y la distribución de la biomasa a las biorefinerías para la obtención de bioproductos. La biomasa

adquirida no puede ser superior a la biomasa disponible en cada campo. Se toman en cuenta los costos de capital para la instalación de posibles nuevas biorefinerías. Otro punto interesante es la inclusión de ecoindustrias a través de plantaciones forestales. Los límites de la tierra disponible para la forestación y el área necesaria para cada árbol determinarán tanto la existencia como el número total de árboles por plantación forestal. Se incluye la conversión de la materia prima a productos de valor agregado, así como su distribución. Se contemplan costos de operación en refinerías y biorefinerías, costo de capital para ecoindustrias, costos relacionados con el transporte de materias primas y productos.

Una parte relevante del modelo matemático son las ecuaciones relacionadas con las emisiones de toda la cadena de suministro, las cuales se presentan a continuación (ecuaciones (95)-(118)).



**Figura 4.2.** Superestructura propuesta para integrar la matching law en los sistemas de energía

### 4.2.1 Emisiones generadas

Las emisiones capturadas de cada refinería ( $Emcap_i^{Refinery}$ ) no pueden ser mayores a las emisiones generadas ( $Em_i^{Refinery}$ ):

$$Emcap_i^{Refinery} \leq Em_i^{Refinery}, \forall i \quad (95)$$

Lo mismo es aplicado para las biorefinerías.

$$Emcap_b^{Biorefinery} \leq Em_b^{Bioref}, \forall b \quad (96)$$

Las emisiones totales de cada refinería ( $Em_i^{Refinery}$ ) contemplan las emisiones por la extracción de crudo ( $E_i^{oil-ext}$ ) y su procesamiento ( $E_i^{product-ref}$ ), así como las emisiones relacionadas con el transporte de cada producto ( $E_i^{trans-product-ref}$ ) y las emisiones por el uso de los productos ( $E_i^{use-product-ref}$ ).

$$Em_i^{Refinery} = E_i^{oil-ext} + E_i^{product-ref} + E_i^{trans-product-ref} + E_i^{use-product-ref}, \forall i \quad (97)$$

Las emisiones de cada biorefinería ( $Em_b^{Bioref}$ ) considera las emisiones del transporte de biomasa ( $E_b^{Biomass-trans}$ ), las emisiones relacionadas con el procesamiento de la biomasa ( $E_b^{Bioref-product}$ ), el transporte de los bioproductos de las biorefinerías ( $E_b^{trans-prod-bioref}$ ) y las emisiones relacionadas con el uso ( $E_b^{use-prod-bioref}$ ). Asimismo, se consideran las emisiones capturadas durante la producción de cada tipo de biomasa ( $NE_b^{Biomass-Growth}$ ).

$$Em_b^{Bioref} = E_b^{Biomass-trans} + E_b^{Bioref-product} + E_b^{trans-prod-bioref} + E_b^{use-prod-bioref} - NE_b^{Biomass-Growth}, \forall b \quad (98)$$

Las emisiones capturadas por las plantaciones forestales ( $Em_e^{Ecoind}$ ) se pueden calcular a través de un factor, que representa las emisiones capturadas por árbol de cada ecoindustria ( $\gamma_e^{EmissionEcoind}$ ) por el número de árboles por plantación forestal ( $NT_e$ ).

$$Em_e^{Ecoind} = \gamma_e^{EmissionEcoind} \cdot NT_e, \forall e \quad (99)$$

Las emisiones de cada ecoindustria ( $Em_e^{Ecoind}$ ) son iguales a las emisiones capturadas en cada refinería ( $Emcap_i^{Refinery}$ ) más las emisiones capturadas en cada biorrefinería ( $Emcap_b^{Biorefinery}$ ).

$$\sum_e Em_e^{Ecoind} = \sum_i Emcap_i^{Refinery} + \sum_b Emcap_b^{Biorefinery} \quad (100)$$

Las emisiones relacionadas con la extracción de crudo ( $E_i^{oil-ext}$ ) se calculan multiplicando las toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente generadas debido a la extracción de crudo por tonelada extraída ( $\beta_{o,i}^{CO_2-ext}$ ) por los días operativos por año ( $H_Y$ ) por las toneladas extraídas de crudo por día ( $f_{o,i}^{oil1}$ ) de la siguiente manera.

$$E_i^{oil-ext} = \sum_o \beta_{o,i}^{CO_2-ext} \cdot (H_Y \cdot f_{o,i}^{oil1}), \forall i \quad (101)$$

Las emisiones capturadas durante la producción de biomasa ( $NE_b^{Biomass-Growth}$ ) son iguales a un factor  $\gamma_{bm,b}^{CO_2-Biomass-Growth}$  (toneladas de CO<sub>2</sub> generadas por tonelada de biomasa obtenida) multiplicado por los días operativos por año ( $H_Y$ ) multiplicado por el caudal de biomasa producida ( $F_{bm,b}^{Biomass}$ ).

$$NE_b^{Biomass-Growth} = \sum_{bm} \gamma_{bm,b}^{CO_2-Biomass-Growth} \cdot (H_Y \cdot F_{bm,b}^{Biomass}), \forall b \quad (102)$$

Las emisiones relacionadas con el transporte de biomasa ( $E_b^{Biomass-trans}$ ) se obtienen por un factor ( $\gamma_{bm,m,b}^{CO_2-Biomass-trans}$ ) multiplicado por el caudal de biomasa por año ( $H_Y \cdot f_{bm,m,b}^{Biomass1}$ ).

$$E_b^{Biomass-trans} = \sum_m \sum_{bm} \gamma_{bm,m,b}^{CO_2-Biomass-trans} \cdot (H_Y \cdot f_{bm,m,b}^{Biomass1}), \forall b \quad (103)$$

Lo mismo para las emisiones generadas relacionadas con el procesamiento de crudo.

$$E_i^{product-ref} = \sum_{p1} \beta_{p1,i}^{CO_2-product-ref} \cdot (H_Y \cdot F_{p1,i}^{product-ref}), \forall i \quad (104)$$

Así como las emisiones producidas por el transporte de productos desde las refinerías.

$$E_i^{trans-product-ref} = \sum_j \sum_{p1} \beta_{p1,i,j}^{CO_2-trans-product-ref} \cdot (H_Y \cdot f_{p1,i,j}^{product-ref1}), \forall i \quad (105)$$

En el caso de las emisiones generadas durante el uso de los productos de refinería.

$$E_i^{use-product-ref} = \sum_{p1} \beta_{p1,i}^{CO_2-use-product-ref} \cdot (H_Y \cdot F_{p1,i}^{product-ref}), \forall i \quad (106)$$

Para emisiones durante el procesamiento de biomasa.

$$E_b^{Bioref-product} = \sum_{bm} \sum_{p2} \gamma_{p2,bm,b}^{CO_2-Bioref-prod} \cdot (H_Y \cdot F_{bm,b}^{Biomass}), \forall b \quad (107)$$

Emisiones por uso de bioproductos.

$$E_b^{use-prod-bioref} = \sum_{p2} \gamma_{p2,b}^{CO_2-use-prod-bioref} \cdot (H_Y \cdot F_{p2,b}^{product-Bioref}), \forall b \quad (108)$$

#### 4.2.2 Emisiones de los productos de refinerías

Para calcular las emisiones de la gasolina regular ( $E_i^{regular}$ ), se multiplica un factor ( $\theta_i^m$ ) por las emisiones de productos de refinería ( $E_i^{product-ref}$ ), transporte de productos de refinería ( $E_i^{trans-product-ref}$ ) y del uso de esos productos ( $E_i^{use-product-ref}$ ).

$$E_i^{regular} = \theta_i^m \cdot (E_i^{product-ref} + E_i^{trans-product-ref} + E_i^{use-product-ref}), \forall i \quad (109)$$

Lo mismo para la gasolina premium ( $E_i^{premium}$ ) y diésel ( $E_i^{diesel}$ ).

$$E_i^{premium} = \theta_i^p \cdot (E_i^{product-ref} + E_i^{trans-product-ref} + E_i^{use-product-ref}), \forall i \quad (110)$$

$$E_i^{diesel} = \theta_i^d \cdot (E_i^{product-ref} + E_i^{trans-product-ref} + E_i^{use-product-ref}), \forall i \quad (111)$$

Para determinar la fracción de gasolina regular ( $\theta_i^m$ ), se calcula a través de la relación del flujo de gasolina regular que se obtiene de la refinería ( $F_{1,i}^{product-ref}$ ) y el flujo total de la refinería ( $F_{p1,i}^{product-ref}$ ).

$$\theta_i^m = \frac{F_{1,i}^{product-ref}}{\sum_{p1} F_{p1,i}^{product-ref}}, \forall i \quad (112)$$

Se aplica una relación similar para cada producto (fracciones premium  $\theta_i^p$  y diésel  $\theta_i^d$ ).

$$\theta_i^p = \frac{F_{2,i}^{product-ref}}{\sum_{p1} F_{p1,i}^{product-ref}}, \forall i \quad (113)$$

$$\theta_i^d = \frac{F_{3,i}^{product-ref}}{\sum_{p1} F_{p1,i}^{product-ref}}, \forall i \quad (114)$$

### 4.2.3 Emisiones de los productos de biorefinerías

Para determinar las emisiones por producto de bioetanol ( $E_b^{bioethanol}$ ), se multiplica un factor ( $\theta_b^{be}$ ) por la suma de las emisiones que se generan por producir cada bioproducto ( $E_b^{Bioref-product}$ ), más las emisiones debido al transporte de los bioproductos ( $E_b^{trans-prod-bioref}$ ) y las emisiones por el uso de los bioproductos ( $E_b^{use-prod-bioref}$ ).

$$E_b^{bioethanol} = \theta_b^{be} \cdot (E_b^{Bioref-product} + E_b^{trans-prod-bioref} + E_b^{use-prod-bioref}), \forall b \quad (115)$$

$$E_b^{biodiesel} = \theta_b^{bd} \cdot (E_b^{Bioref-product} + E_b^{trans-prod-bioref} + E_b^{use-prod-bioref}), \forall b \quad (116)$$

Para el cálculo de la fracción  $\theta_b^{be}$ , se utiliza la relación del flujo de bioetanol ( $F_{4,b}^{product-Bioref}$ ) y el flujo total de productos de cada biorefinería ( $F_{p2,b}^{product-Bioref}$ ).

$$\theta_b^{be} = \frac{F_{4,b}^{product-Bioref}}{\sum_{p2} F_{p2,b}^{product-Bioref}}, \forall b \quad (117)$$

Lo mismo para el biodiesel ( $\theta_b^{bd}$ ).

$$\theta_b^{bd} = \frac{F_{5,b}^{product-Bioref}}{\sum_{p2} F_{p2,b}^{product-Bioref}}, \forall b \quad (118)$$

### 4.2.4 Incentivos y castigos económicos

La idea de incorporar incentivos y castigos económicos es mejorar y dirigir el problema para conseguir la solución óptima [46]. En el problema abordado, los incentivos y castigos económicos para las diferentes secciones se incorporan de la siguiente manera.

#### 4.2.4.1 Refinerías

Se propone la ecuación (119) siguiendo el esquema de incentivos de Gonik-IBM [52]. Se propone una cantidad de emisiones ( $E_i^{prop}$ ) establecida por el Gerente General de la refinería (CEO). Si las emisiones ( $E_i$ ) son iguales a las propuestas por el gobierno ( $E_i^{obj}$ ), quien es la

entidad que otorga los incentivos económicos, no tiene que haber recompensa ( $R_i$ ), pero sí debe haber un castigo económico ( $P_i$ ). Si las emisiones son mayores a las propuestas, la recompensa será cero, pero debe haber un castigo económico. Por el contrario, si las emisiones son inferiores a las propuestas, se obtendrá la recompensa y no habrá sanción económica. Se debe modelar los incentivos y castigos económicos para los diferentes productos involucrados en las refinerías.

#### 4.3.4.1.1 Gasolina regular

El Gerente General es castigado económicamente cuando las emisiones generadas en la producción y distribución de gasolina regular en cada refinería son mayores a las emisiones propuestas por el Gerente General. Por otro lado, se premia económicamente si las emisiones generadas son inferiores a las emisiones propuestas; es decir, cuando mejora la cantidad de emisiones establecida. Esta situación se formula de acuerdo con la siguiente disyunción.

$$\left[ \begin{array}{l} Y_A^{regular} \\ E_i^{regular} = E_i^{regularprop} \\ R_i^{regular} = 0 \\ P_i^{regular} = CEmis_i^{Ref} \cdot u \cdot \left( \frac{E_i^{regularprop}}{E_i^{regularobj}} \right) \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{B_i}^{regular} \\ E_i^{regular} > E_i^{regularprop} \\ R_i^{regular} = 0 \\ P_i^{regular} = CEmis_i^{Ref} \cdot x \cdot \left( \frac{E_i^{regular} + E_i^{regularprop}}{2 \cdot E_i^{regularobj}} \right) \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{C_i}^{regular} \\ E_i^{regular} < E_i^{regularprop} \\ R_i^{regular} = CEmis_i^{Ref} \cdot v \cdot \left( \frac{3 \cdot E_i^{regular} - E_i^{regularprop}}{2 \cdot E_i^{regularobj}} \right) \\ P_i^{regular} = 0 \end{array} \right], \forall i \quad (119)$$

Donde  $Y_A^{regular}$  es una variable lógica que es verdadera cuando  $E_i^{regular} = E_i^{regularprop}$  y las variables lógicas  $Y_{B_i}^{regular}$  y  $Y_{C_i}^{regular}$  son falsas; en este caso, la recompensa es cero y la sanción económica está relacionada con un valor económico base de acuerdo a las emisiones generadas en las refinerías, las emisiones propuestas por el Gerente General y el objetivo de emisiones establecida por el gobierno. Por el contrario, cuando  $E_i^{regular} > E_i^{regularprop}$ , las variables lógicas  $Y_A^{regular}$  y  $Y_{C_i}^{regular}$  son falsas, el incentivo económico es cero y la penalización económica se calcula en función de las emisiones generadas, las emisiones objetivo y las emisiones propuestas. Finalmente, cuando  $E_i^{regular} < E_i^{regularprop}$ , las variables lógicas  $Y_A^{regular}$  y  $Y_{B_i}^{regular}$  son falsas, en este caso se obtiene una recompensa económica y el castigo es cero ya que se reducen las emisiones; este incentivo se calcula en base a las emisiones generadas, las

emisiones propuestas y las emisiones objetivo. La variable binaria  $y_{A_i}^{regular}$  se utiliza para modelar la variable lógica  $Y_{A_i}^{regular}$ ; por lo tanto,  $y_{A_i}^{regular}$  es igual a uno cuando  $Y_{A_i}^{regular}$  es verdadero, y  $y_{A_i}^{regular}$  es cero cuando  $Y_{A_i}^{regular}$  es falso. Se puede reformular algebraicamente de la siguiente manera [68].

Solo se puede seleccionar una opción en la disyunción y esto se puede modelar a través de la selección de solo una de las variables binarias de la siguiente manera.

$$y_{A_i}^{regular} + y_{B_i}^{regular} + y_{C_i}^{regular} = 1, \forall i \quad (120)$$

Las variables continuas se desagregan a través del siguiente conjunto de relaciones (incorporando una variable continua y positiva para cada término de la disyunción).

$$E_i^{regular} = E_i^{regular1} + E_i^{regular2} + E_i^{regular3}, \forall i \quad (121)$$

$$R_i^{regular} = R_i^{regular1} + R_i^{regular2} + R_i^{regular3}, \forall i \quad (122)$$

$$P_i^{regular} = P_i^{regular1} + P_i^{regular2} + P_i^{regular3}, \forall i \quad (123)$$

Las ecuaciones para la primera parte de la disyunción se expresan en términos de las variables desagregadas binarias y continuas de la siguiente manera.

$$E_i^{regular1} = E_i^{regularprop} \cdot y_{A_i}^{regular}, \forall i \quad (124)$$

$$R_i^{regular1} = 0, \forall i \quad (125)$$

$$P_i^{regular1} = CEmis_i^{Ref} \cdot u \cdot \left( \frac{E_i^{regularprop}}{E_i^{regularobj}} \right) \cdot y_{A_i}^{regular}, \forall i \quad (126)$$

Del mismo modo, para la segunda parte de la disyunción.

$$E_i^{regular2} \geq (E_i^{regularprop} - \delta) \cdot y_{B_i}^{regular}, \forall i \quad (127)$$

$$R_i^{regular2} = 0, \forall i \quad (128)$$

$$P_i^{regular2} = CEmis_i^{Ref} \cdot x \cdot \left( \frac{E_i^{regular} + E_i^{regularprop} \cdot y_{B_i}^{regular}}{2 \cdot E_i^{regularobj}} \right), \forall i \quad (129)$$

La última parte de la disyunción se puede modelar como se muestra a continuación.

$$E_i^{regular3} \leq (E_i^{regularprop} + \delta) \cdot y_{C_i}^{regular}, \forall i \quad (130)$$

$$R_i^{regular3} = CEmis_i^{Ref} \cdot v \cdot \left( \frac{3 \cdot E_i^{regular} - E_i^{regularprop} \cdot y_{C_i}^{regular}}{2 \cdot E_i^{regularobj}} \right), \forall i \quad (131)$$

$$P_i^{regular3} = 0, \forall i \quad (132)$$

#### 4.2.4.1.2 Gasolina premium

La gasolina premium se diferencia de la gasolina regular en función del nivel de octanaje. Los índices de octano son medidas de la estabilidad del combustible. La gasolina regular tiene el octanaje más bajo (generalmente 87) y la gasolina premium tiene el octanaje más alto (generalmente 91-94). Estas clasificaciones se basan en la presión a la que un combustible se quemará espontáneamente (autoencendido) en un motor de prueba. Cuanto mayor sea el octanaje, más estable será el combustible [24].

De acuerdo con las emisiones generadas en la producción y distribución de gasolinas premium, el Gerente General es recompensado o castigado económicamente. Para lo cual se aplica la siguiente disyunción

$$\left[ \begin{array}{l} Y_{A_i}^{premium} \\ E_i^{premium} = E_i^{premiumprop} \\ R_i^{premium} = 0 \\ P_i^{premium} = CEmis_i^{Ref} \cdot u \cdot \left( \frac{E_i^{premiumprop}}{E_i^{premiumobj}} \right) \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{B_i}^{premium} \\ E_i^{premium} > E_i^{premiumprop} \\ R_i^{premium} = 0 \\ P_i^{premium} = CEmis_i^{Ref} \cdot x \cdot \left( \frac{E_i^{premium} + E_i^{premiumprop}}{2 \cdot E_i^{premiumobj}} \right) \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{C_i}^{premium} \\ E_i^{premium} > E_i^{premiumprop} \\ R_i^{premium} = CEmis_i^{Ref} \cdot v \cdot \left( \frac{3 \cdot E_i^{premium} - E_i^{premiumprop}}{2 \cdot E_i^{premiumobj}} \right) \\ P_i^{premium} = 0 \end{array} \right], \forall i \quad (133)$$

#### 4.2.4.1.3 Diésel

Para el caso del diésel, se puede establecer con la siguiente disyunción.

$$\left[ \begin{array}{l} Y_A^{diesel} \\ E_i^{diesel} = E_i^{dieselprop} \\ R_i^{diesel} = 0 \\ P_i^{diesel} = CEmis_i^{Ref} \cdot u \cdot \left( \frac{E_i^{dieselprop}}{E_i^{dieselobj}} \right) \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{B_i}^{diesel} \\ E_i^{diesel} > E_i^{dieselprop} \\ R_i^{diesel} = 0 \\ P_i^{diesel} = CEmis_i^{Ref} \cdot x \cdot \left( \frac{E_i^{diesel} + E_i^{dieselprop}}{2 \cdot E_i^{dieselobj}} \right) \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{C_i}^{diesel} \\ E_i^{diesel} < E_i^{dieselprop} \\ R_i^{diesel} = CEmis_i^{Ref} \cdot v \cdot \left( \frac{3 \cdot E_i^{diesel} - E_i^{dieselprop}}{2 \cdot E_i^{dieselobj}} \right) \\ P_i^{diesel} = 0 \end{array} \right], \forall i \quad (134)$$

Lo cual se reformula para obtener relaciones algebraicas.

#### 4.2.4.2 Biorefinerías

Se toman en cuenta las emisiones relacionadas con la producción, transporte y uso de los productos de las biorrefinerías ( $E_b$ ). Si esas emisiones son iguales a las emisiones objetivo establecidas por el gobierno ( $E_b^{bioobj}$ ), no habrá recompensa ( $R_b^{bio}$ ), pero sí un castigo económico ( $P_b^{bio}$ ). Si las emisiones son superiores a las propuestas, la recompensa será nula y supondrá un castigo económico mayor que el de la primera parte de la disyunción. Por el contrario, si las emisiones son inferiores a las emisiones propuestas, habrá recompensa y el castigo será cero. Se involucra la propuesta de emisiones establecida por el Gerente General ( $E_b^{bioprop}$ ) para asegurar que la empresa hará todo lo posible por lograr una menor emisión de gases al medio ambiente.

##### 4.2.4.2.1 Bioetanol

De manera específica, se consideran las emisiones relacionadas con la producción, transporte y uso de bioetanol ( $E_b^{bioethanol}$ ). Si las emisiones generadas son mayores a las emisiones propuestas por el Gerente General, la ganancia del Gerente General se verá afectada negativamente. Sin embargo, si las emisiones son menores a las propuestas, la ganancia se verá afectada positivamente porque recibirá un incentivo económico. Este caso se puede formular mediante la siguiente disyunción.

$$\left[ \begin{array}{l} Y_{A_b}^{bioethanol} \\ E_b^{bioethanol} = E_b^{bioethanolprop} \\ R_b^{bioethanol} = 0 \\ P_b^{bioethanol} = CEmis_b^{Bioref} \cdot u \cdot \left( \frac{E_b^{bioethanolprop}}{E_b^{bioethanolobj}} \right) \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{B_b}^{bioethanol} \\ E_b^{bioethanol} > E_b^{bioethanolprop} \\ R_b^{bioethanol} = 0 \\ P_b^{bioethanol} = CEmis_b^{Bioref} \cdot x \cdot \left( \frac{E_b^{bioethanol} + E_b^{bioethanolprop}}{2 \cdot E_b^{bioethanolobj}} \right) \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{C_b}^{bioethanol} \\ E_b^{bioethanol} < E_b^{bioethanolprop} \\ R_b^{bioethanol} = CEmis_b^{Bioref} \cdot v \cdot \left( \frac{3 \cdot E_b^{bioethanol} - E_b^{bioethanolprop}}{2 \cdot E_b^{bioethanolobj}} \right) \\ P_b^{bioethanol} = 0 \end{array} \right], \forall b \quad (135)$$

Donde  $Y_{A_b}^{bioethanol}$ ,  $Y_{B_b}^{bioethanol}$  y  $Y_{C_b}^{bioethanol}$  son variables lógicas. El conjunto de ecuaciones se activará cuando su variable lógica asociada sea verdadera, luego se calculará la recompensa o penalización según el caso correspondiente.

#### 4.2.4.2.2 Biodiésel

El biodiésel también es considerado, y las emisiones que se generan están sujetas a los incentivos y/o castigos económicos.

$$\left[ \begin{array}{l} Y_{A_b}^{biodiesel} \\ E_b^{biodiesel} = E_b^{biodieselprop} \\ R_b^{biodiesel} = 0 \\ P_b^{biodiesel} = CEmis_b^{Biorref} \cdot u^b \cdot \left( \frac{E_b^{biodieselprop}}{E_b^{biodieselobj}} \right) \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{B_b}^{biodiesel} \\ E_b^{biodiesel} > E_b^{biodieselprop} \\ R_b^{biodiesel} = 0 \\ P_b^{biodiesel} = CEmis_b^{Biorref} \cdot x^b \cdot \left( \frac{E_b^{biodiesel} + E_b^{biodieselprop}}{2 \cdot E_b^{biodieselobj}} \right) \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{C_b}^{biodiesel} \\ E_b^{biodiesel} < E_b^{biodieselprop} \\ R_b^{biodiesel} = CEmis_b^{Biorref} \cdot v^b \cdot \left( \frac{3 \cdot E_b^{biodiesel} - E_b^{biodieselprop}}{2 \cdot E_b^{biodieselobj}} \right) \\ P_b^{biodiesel} = 0 \end{array} \right], \forall b \quad (136)$$

#### 4.2.5 Matching law

Herrnstein [7] encontró que el flujo relativo de respuesta es proporcional al flujo relativo de recompensa. Esta igualdad se llama matching, y el enunciado de la igualdad se llama matching law. La matching law se extendió del laboratorio al comportamiento humano cotidiano, incluido el comportamiento económico. Las unidades de la matching law son flujos de comportamiento y flujos de recompensa en lugar de actos individuales y consecuencias individuales. La matching law pone a prueba el análisis basado en reflejos al mostrar que un acto dado puede ser manipulado a través de las consecuencias de otros actos [41]. La forma más simple de la matching law se presenta en la ecuación (137), donde B representa el comportamiento de cada programa 1 y 2. R es la recompensa dada y P es el castigo.

$$\frac{B_1}{B_1 + B_2} = \frac{(R_1 - P_1)}{(R_1 - P_1) + (R_2 - P_2)} \quad (137)$$

De acuerdo con la idea de la matching law, debe compararse con el mismo tipo de combustible para predecir la preferencia del CEO donde se involucran recompensas y sanciones relacionadas con las emisiones de CO<sub>2</sub>. En este sentido, se estudia la inclinación de la preferencia entre el uso de gasolina regular y premium frente al uso de bioetanol.

La respuesta relativa de la gasolina regular es igual a la recompensa relativa de la gasolina regular.

$$\frac{B_i^{regular}}{B_i^{regular} + B_i^{premium} + B_b^{bioethanol}} = \frac{(R_i^{regular} - P_i^{regular})}{(R_i^{regular} - P_i^{regular}) + (R_i^{premium} - P_i^{premium}) + (R_b^{bioethanol} - P_b^{bioethanol})}, \forall i, \forall b \quad (138)$$

Lo mismo se aplica a la respuesta relativa de la gasolina premium ( $B_i^{premium}$ ).

$$\frac{B_i^{premium}}{B_i^{regular} + B_i^{premium} + B_b^{bioethanol}} = \frac{(R_i^{premium} - P_i^{premium})}{(R_i^{regular} - P_i^{regular}) + (R_i^{premium} - P_i^{premium}) + (R_b^{bioethanol} - P_b^{bioethanol})}, \forall i, \forall b \quad (139)$$

En cuanto a la respuesta relativa del bioetanol ( $B_b^{bioethanol}$ ).

$$\frac{B_b^{bioethanol}}{B_i^{regular} + B_i^{premium} + B_b^{bioethanol}} = \frac{(R_b^{bioethanol} - P_b^{bioethanol})}{(R_i^{regular} - P_i^{regular}) + (R_i^{premium} - P_i^{premium}) + (R_b^{bioethanol} - P_b^{bioethanol})}, \forall i, \forall b \quad (140)$$

Las ecuaciones (141) y (142) muestran la comparación entre la preferencia por utilizar diésel o biodiésel respectivamente.

$$\frac{B_i^{diesel}}{B_i^{diesel} + B_b^{biodiesel}} = \frac{(R_i^{diesel} - P_i^{diesel})}{(R_i^{diesel} - P_i^{diesel}) + (R_b^{biodiesel} - P_b^{biodiesel})}, \forall i, \forall b \quad (141)$$

$$\frac{B_b^{biodiesel}}{B_i^{diesel} + B_b^{biodiesel}} = \frac{(R_b^{biodiesel} - P_b^{biodiesel})}{(R_i^{diesel} - P_i^{diesel}) + (R_b^{biodiesel} - P_b^{biodiesel})}, \forall i, \forall b \quad (142)$$

También se incluyen las ecuaciones de los ingresos de los productos de refinería y biorefinería; las ganancias de las refinerías, biorefinerías y ecoindustrias, la demanda de diésel y gasolina, así como los empleos generados en toda la cadena de suministro.

#### 4.2.6 Funciones objetivo

Las funciones objetivo consideradas son la maximización de la función objetivo económica (EOF), la minimización de las emisiones netas y la maximización de los empleos totales, como se puede apreciar en las ecuaciones (143) a la (145).

$$\text{Max} \left\{ \text{EOF} = \left[ \begin{aligned} & \text{Profit}^{\text{Refinery}} + \text{Profit}^{\text{Bioref}} + \text{Profit}^{\text{Ecoind}} + \\ & \sum_i (R_i^{\text{regular}} - P_i^{\text{regular}}) + (R_i^{\text{premium}} - P_i^{\text{premium}}) + (R_i^{\text{diesel}} - P_i^{\text{diesel}}) + \\ & \sum_b (R_b^{\text{bioethanol}} - P_b^{\text{bioethanol}}) + (R_b^{\text{biodiesel}} - P_b^{\text{biodiesel}}) \end{aligned} \right] \right\} \quad (143)$$

$$\text{Min} \left\{ \text{NetEmission} = \sum_i \text{Em}_i^{\text{Refinery}} + \sum_b \text{Em}_b^{\text{Bioref}} - \sum_e \text{Em}_e^{\text{Ecoind}} \right\} \quad (144)$$

$$\text{Max} \left\{ \text{TOTALJOBS} = \text{Jobs}^{\text{Refinery}} + \text{Jobs}^{\text{Bioref}} + \text{Jobs}^{\text{Ecoind}} \right\} \quad (145)$$

El modelo matemático propuesto es un problema de optimización multiobjetivo.

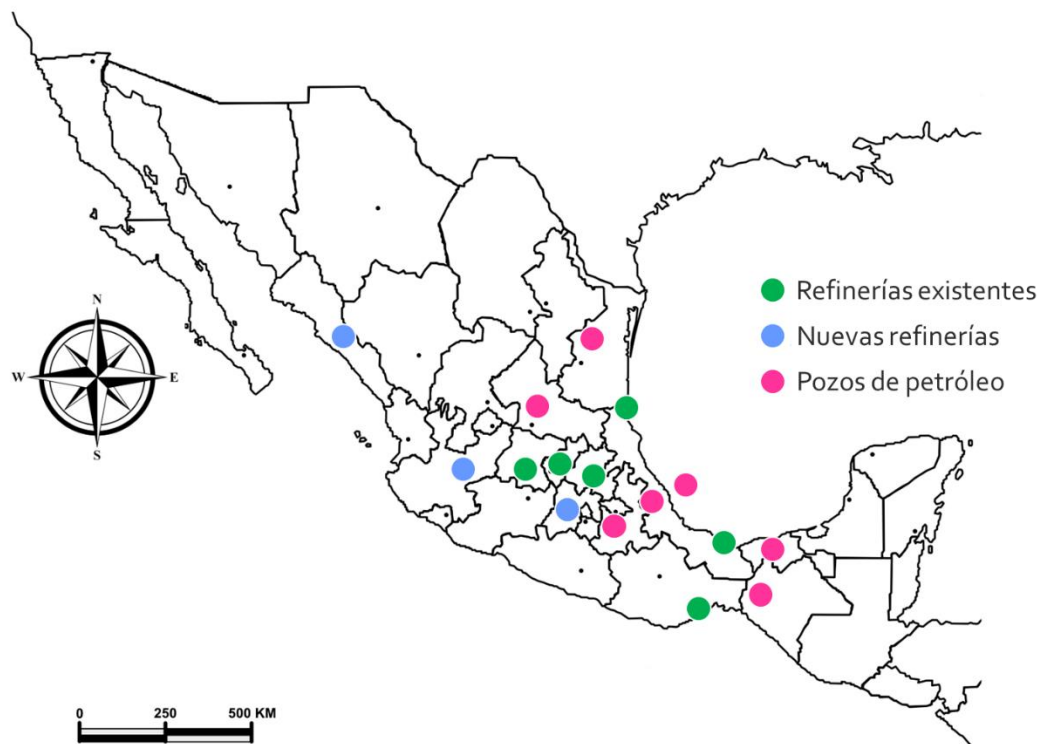
### 4.3 Caso de estudio

El modelo propuesto es general y se puede aplicar a diferentes casos de estudio realizando los ajustes adecuados en los parámetros. En este caso, el modelo matemático desarrollado se aplica a un caso de estudio en México. La Comisión Nacional de Hidrocarburos tiene como objetivo principal regular y supervisar la exploración y extracción de hidrocarburos que se encuentran en yacimientos del territorio mexicano. Para este caso de estudio, en 2020, según la Comisión Nacional de Hidrocarburos [69], las reservas totales de hidrocarburos fueron de 23,088 millones de barriles de petróleo equivalente (mmbpe), de los cuales el 58.0% corresponde a aguas someras, el 41.2% a terrestres y el 0.8% aguas profundas. A lo largo del territorio existen 390 campos productores de crudo en los cuales hay 5 pozos perforados, 8 pozos terminados y 6,928 pozos en operación [70]. De la producción total de petróleo (659.3 mbdpe), el 35.5% se concentró en la obtención de crudo, el 32.3% en gasolina, el 23.3% en diésel, el 5.9% en turbosina y el 2.9% en coque de petróleo [71]. La biomasa, y específicamente la biomasa residual agroindustrial y los residuos sólidos urbanos, tienen un importante potencial para la generación de energía eléctrica y térmica, incluidos están los usos vehiculares, la inyección de biometano a las redes de gas natural y la producción de pellets [72]. Por lo tanto, México tiene el potencial para incluir tanto combustibles como biocombustibles en la cadena de suministro de energía. En el presente estudio, la biomasa considerada se relaciona con los residuos agroindustriales, los cuales corresponden a astillas de madera, caña de azúcar, sorgo dulce, jatrofa, palma africana y desperdicios de agave.

La ubicación de los pozos de petróleo, las refinerías existentes y las potenciales nuevas refinerías se muestran en la **Figura 4.3**. Sólo se consideran nuevas biorefinerías que pueden instalarse potencialmente en cada estado de México porque no hay biorefinerías existentes en México, pero México tiene el potencial para instalación debido a la amplia disponibilidad de biomasa [73]. Los principales desafíos para instalar nuevas biorefinerías son el nivel tecnológico, las preocupaciones ambientales, la asignación y la incertidumbre [74]. Los días operativos por año (Hy) considerados son 365.

Para analizar la preferencia del CEO por la instalación de nuevas refinerías o nuevas biorrefinerías, de los 32 campos de biomasa propuestos, se seleccionaron 3 lugares que corresponden a lugares donde se pueden instalar tanto nuevas refinerías como biorefinerías y de esta manera poder hacer la comparación. Esos lugares son Jalisco, Estado de México y Sinaloa.

La dinámica neta de fuente/sumidero de CO<sub>2</sub> a largo plazo de los bosques cambia a lo largo del tiempo debido principalmente al ciclo de los árboles (crecer, morir, decaer) y a las influencias humanas (emisiones de combustibles fósiles y recolección/utilización de biomasa). Sin embargo, aumentar el número de árboles podría ralentizar potencialmente la acumulación de carbono atmosférico [75]. Las refinerías y biorefinerías se contemplan como ecoindustrias porque aprovechan las emisiones que pueden ser vistas como residuos en otra situación. Las ecoindustrias capturan las emisiones (ecuación (100)) que se requieren en las plantaciones forestales (ecuación (99)). Además, se tienen en cuenta los árboles necesarios que se pueden plantar en el terreno disponible. Las ecoindustrias se pueden instalar en cada estado de la República Mexicana considerando la tierra disponible para la reforestación.



**Figura 4.3.** Ubicación de las instalaciones en el caso de estudio considerado.

El propósito del enfoque propuesto es satisfacer las demandas futuras de energía y reducir las emisiones generadas considerando la situación actual. De esta forma, las emisiones objetivo (fijadas por el gobierno) corresponden a las emisiones mínimas que se pueden generar en las condiciones actuales. Por otro lado, las emisiones propuestas que establezca el Director General deben ser un número confiable y alcanzable, en este caso será un 15% superior al mínimo posible.

#### 4.4 Resultados

El modelo de optimización propuesto es un problema de programación multi-objetivo mixto-entero no lineal. Para el caso de estudio abordado, el modelo consta de 7,061 variables continuas, 2,278 variables binarias y 6,085 restricciones. Se codificó en el software GAMS [76] y se resolvió en una computadora con procesador i7 a 3.2 GHz y 12 GB de RAM. El tiempo promedio de CPU para cada solución fue alrededor de 0.42 s utilizando el solucionador DICOPT [77] para el problema de programación mixto-entero no lineal junto

con CPLEX [78] para la parte de programación mixto-entero lineal y el CONOPT [79] para la parte de programación no lineal.

La matching law es una herramienta matemática robusta a la que no se le ha prestado la atención que merece, a pesar de que ha sido estudiada en el laboratorio y se puede aplicar al comportamiento de la población en aspectos de elección de la vida diaria. Al incorporar la matching law con un modelo de optimización matemática que al mismo tiempo considera la planificación de la cadena de suministro, es posible estudiar el comportamiento de todas las partes involucradas desde diferentes perspectivas. En este caso, los valores utilizados son flujos económicos, para incentivos (R), sanciones (P) y respuestas (B). “B” es un número adimensional y se supone que donde el valor de B es mayor corresponde a la opción más preferida.

El incentivar o castigar las emisiones puede ser visto como impuestos aplicados; el objetivo de los impuestos sobre las emisiones es reducir las emisiones de dióxido de carbono. El esquema de incentivos utilizado para obtener los resultados presentados (**Tabla 4.1**) implica que se castiga más la generación de emisiones en las refinerías que en las biorefinerías; sin embargo, si las refinerías reducen sus emisiones, el incentivo económico es mejor que el de las biorefinerías. La selección del tipo de combustible se presenta en la **Tabla 4.1**. Si bien se puede seleccionar entre astillas de madera, caña de azúcar, sorgo dulce y desechos de agave para producir biocombustibles, para maximizar la ganancia se prefiere utilizar bioetanol y biodiesel producidos a partir de astillas de madera en lugar de gasolina regular y premium en Jalisco, Estado de México y Sinaloa. En Jalisco, al minimizar la emisión neta, se prefiere utilizar bioetanol a partir de residuos de agave y diésel cuando se compara con la producción de biodiesel a partir de sorgo dulce. En el Estado de México y Sinaloa se prefiere utilizar bioetanol y biodiesel a partir de astillas de madera. Al maximizar los empleos totales, en Jalisco y Sinaloa se prefiere producir bioetanol a partir de los desechos del agave; sin embargo, en el Estado de México se prefiere utilizar gasolina regular en comparación con la producción de bioetanol a partir de la caña de azúcar. El número de trabajos generados está relacionado con el flujo producido en cada caso. Por ejemplo, en las refinerías depende de las toneladas de crudo procesadas, en las biorefinerías depende de las toneladas de biomasa producida, biomasa transportada y biomasa procesada, y finalmente en la ecoindustria depende de los árboles plantados. Es importante resaltar que no hay restricción de trabajos

máximos generados, depende del flujo máximo producido según el caso. En el caso del diésel y biodiésel, en Jalisco se prefiere usar diésel en lugar de producción de biodiésel a partir de astillas de madera, en el Estado de México se prefiere usar diésel a biodiésel de caña de azúcar y en Sinaloa se prefiere a usar diésel sobre biodiésel de sorgo dulce.

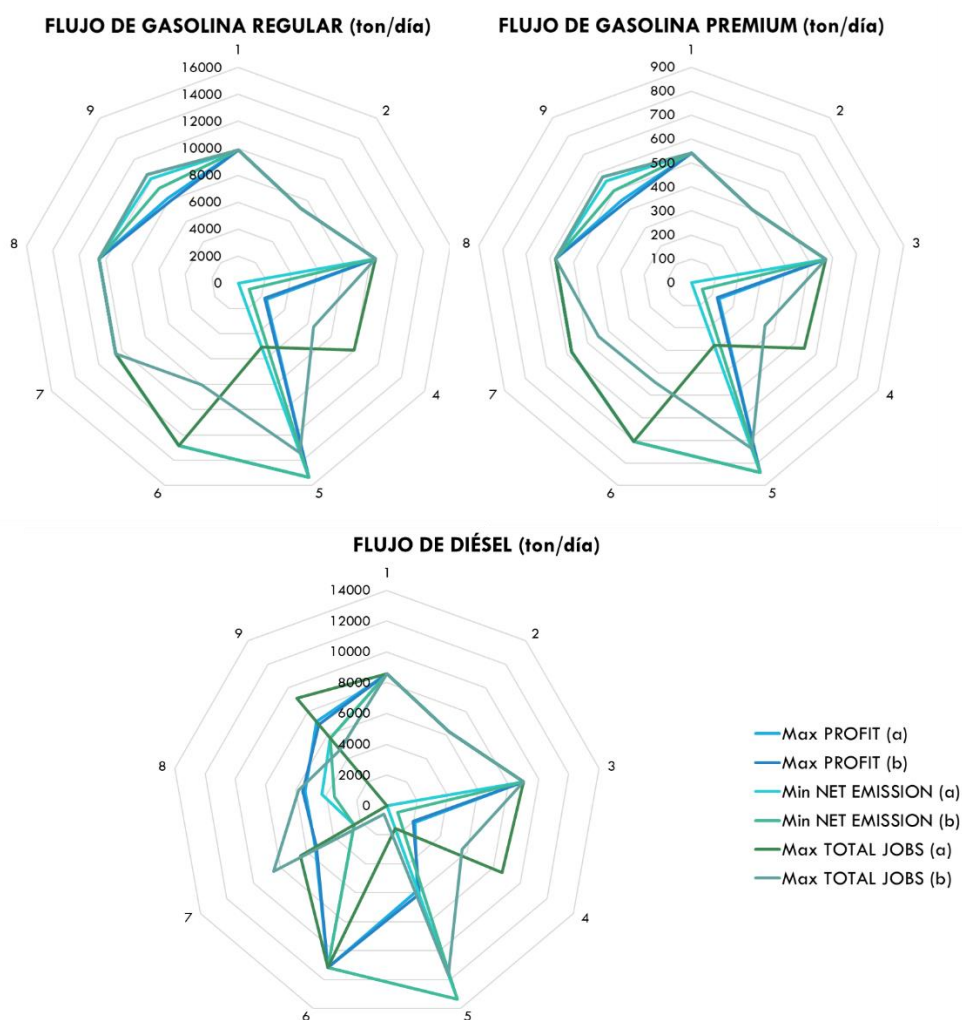
Vale la pena notar que al usar la matching law para relacionar incentivos o castigos económicos, es posible cuantificar la preferencia del tipo de combustible. Asimismo, por el impuesto a las emisiones, es posible incluir los combustibles fósiles junto con los biocombustibles. Además, al incorporar la matching law en este tipo de estudios, permite obtener resultados cuantitativos y luego establecer diferentes escenarios para poder modificar las condiciones según las necesidades del tomador de decisiones.

**Tabla 4.1.** Tipo de combustible preferido.

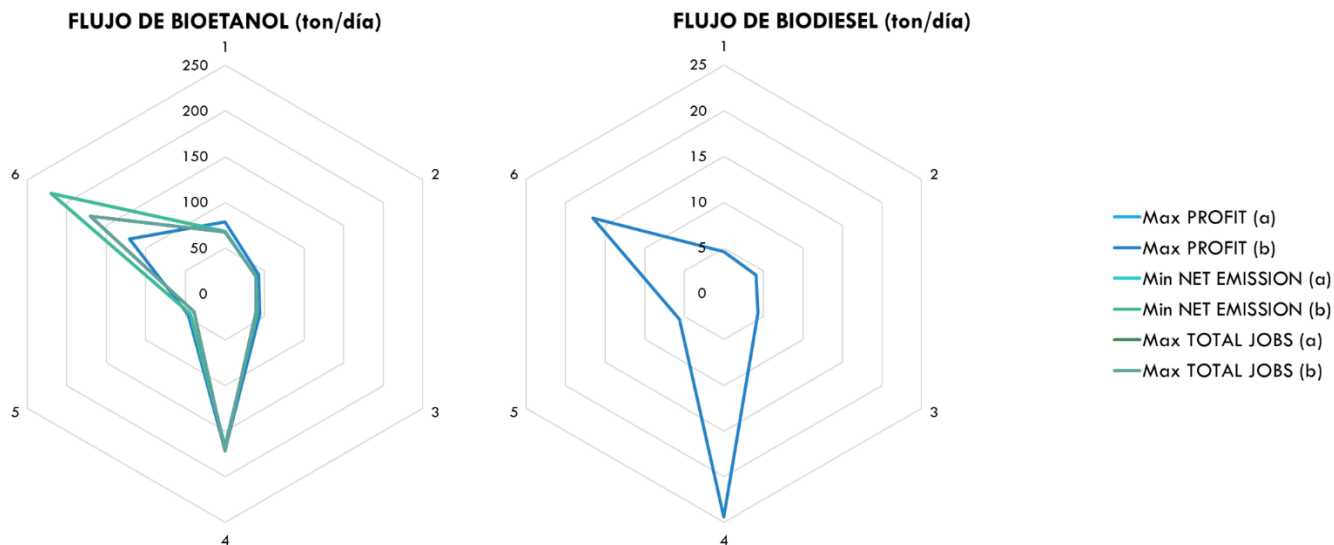
|                                     | MAX GANANCIAS |              |              | MIN EMISIONES NETAS |              |              | MAX TRABAJOS<br>GENERADOS |              |              |
|-------------------------------------|---------------|--------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|---------------------------|--------------|--------------|
|                                     | ESTADO DE     |              |              | ESTADO DE           |              |              | ESTADO DE                 |              |              |
|                                     | JALISCO       | MÉXICO       | SINALOA      | JALISCO             | MÉXICO       | SINALOA      | JALISCO                   | MÉXICO       | SINALOA      |
| <b>REFINERÍA/ASTILLAS DE MADERA</b> |               |              |              |                     |              |              |                           |              |              |
| B <sup>REGULAR</sup>                | 0.088         | 0.298        | 0.238        | 0.089               | 0.298        | 0.238        | 0.166                     | 0.529        | 0.408        |
| B <sup>PREMIUM</sup>                | 0.008         | 0.016        | 0.015        | 0.009               | 0.016        | 0.015        | 0.014                     | 0.029        | 0.025        |
| B <sup>BIOETANOL</sup>              | <b>0.904</b>  | <b>0.685</b> | <b>0.747</b> | 0.902               | <b>0.685</b> | <b>0.747</b> | 0.820                     | 0.442        | 0.567        |
| B <sup>DIESEL</sup>                 | 0.401         | 0.278        | 0.308        | 0.474               | 0.278        | 0.308        | <b>3.842</b>              | 0.516        | 0.5          |
| B <sup>BIODIESEL</sup>              | <b>0.599</b>  | <b>0.722</b> | <b>0.692</b> | 0.526               | <b>0.722</b> | <b>0.692</b> | -2.842                    | 0.484        | 0.5          |
| <b>REFINERÍA/CAÑA DE AZÚCAR</b>     |               |              |              |                     |              |              |                           |              |              |
| B <sup>REGULAR</sup>                | 0.157         | 0.369        | 0.374        | 0.159               | 0.369        | 0.374        | 0.267                     | <b>0.617</b> | 0.553        |
| B <sup>PREMIUM</sup>                | 0.014         | 0.020        | 0.023        | 0.016               | 0.020        | 0.023        | 0.023                     | 0.034        | 0.034        |
| B <sup>BIOETANOL</sup>              | 0.829         | 0.611        | 0.603        | 0.825               | 0.611        | 0.603        | 0.710                     | 0.349        | 0.413        |
| B <sup>DIESEL</sup>                 | 0.462         | 0.448        | 0.363        | 0.538               | 0.448        | 0.363        | 2.500                     | <b>0.706</b> | 0.552        |
| B <sup>BIODIESEL</sup>              | 0.538         | 0.552        | 0.637        | 0.462               | 0.552        | 0.637        | -1.500                    | 0.294        | 0.448        |
| <b>REFINERÍA/SORGO DULCE</b>        |               |              |              |                     |              |              |                           |              |              |
| B <sup>REGULAR</sup>                | 0.118         |              | 0.301        | 0.119               |              | 0.301        | 0.225                     |              | 0.499        |
| B <sup>PREMIUM</sup>                | 0.010         |              | 0.019        | 0.012               |              | 0.019        | 0.019                     |              | 0.031        |
| B <sup>BIOETANOL</sup>              | 0.872         |              | 0.681        | 0.869               |              | 0.681        | 0.755                     |              | 0.470        |
| B <sup>DIESEL</sup>                 | 0.585         |              | 0.483        | <b>0.656</b>        |              | 0.483        | 1.490                     |              | <b>0.692</b> |
| B <sup>BIODIESEL</sup>              | 0.415         |              | 0.517        | 0.344               |              | 0.517        | -0.490                    |              | 0.308        |
| <b>REFINERÍA/DESECHO DE AGAVE</b>   |               |              |              |                     |              |              |                           |              |              |
| B <sup>REGULAR</sup>                | 0.161         | 0.454        | 0.380        | 0.030               | 0.454        | 0.380        | 0.114                     | 0.425        | 0.310        |
| B <sup>PREMIUM</sup>                | 0.014         | 0.025        | 0.024        | 0.003               | 0.025        | 0.024        | 0.010                     | 0.023        | 0.019        |
| B <sup>BIOETANOL</sup>              | 0.825         | 0.521        | 0.596        | <b>0.967</b>        | 0.521        | 0.596        | <b>0.876</b>              | 0.552        | <b>0.671</b> |
| B <sup>DIESEL</sup>                 | 0.521         | 0.385        | 0.419        | 0.187               | 0.385        | 0.419        | -2.355                    | 0.356        | 0.342        |
| B <sup>BIODIESEL</sup>              | 0.479         | 0.615        | 0.581        | 0.813               | 0.615        | 0.581        | 3.355                     | 0.644        | 0.658        |

La matching law es una herramienta matemática que se utiliza para determinar la preferencia en acciones repetitivas y puede ayudar a establecer el entorno correcto para que el tomador de decisiones elija entre diferentes opciones y de esta manera predecir preferencias futuras. Las **Figuras 4.4** y **4.5** muestran el flujo de cada producto bajo diferentes escenarios como ganancia máxima, emisión neta mínima y empleos totales máximos y se pueden notar las diferencias entre usar incentivos y no usar incentivos. Uno de los principales

puntos a destacar es que utilizando el esquema de incentivos propuesto anteriormente para promover la producción de biocombustibles (**Figura 4.4**) e incluyendo la matching law se puede calcular la proporción de preferencia de cada componente en comparación con el resto, también se pueden establecer las condiciones para comportarse de determinada manera. Vale la pena notar que en la **Figura 4.5** hay más producción de bioetanol que de biodiesel. El bioetanol es una mejor opción en comparación con el biodiesel debido a sus menores emisiones de gases de efecto invernadero y menores costos de producción. Es necesario incentivar la producción de biodiesel para que su uso sea atractivo.



**Figura 4.4.** Comparación de productos en cada refinería (1-9). (a) Sin usar incentivos, (b) usando incentivos



**Figura 4.5.** Comparación de bioproductos en cada biorefinería (1-6). (a) Sin usar incentivos, (b) Usando incentivos

Además, se estudian escenarios positivos y negativos desde el punto de vista del productor:

- Positivo: Más incentivo (+50%) que el incentivo base, menor castigo (-50%) que el base.
- Negativo: Menos incentivos (-50%) que el incentivo base, más castigo (+50%) que el base.

En el caso de las refinerías, los incentivos se estiman en base al producto interno bruto (PIB), donde el valor más bajo es el valor de referencia para obtener el incentivo base modificado (**Tabla 4.2**), la base económica en las refinerías es 10. En el **Tabla 4.3** se observa que para las biorefinerías la base económica es 8 y la base económica modificada está relacionada con el costo de operación de cada biorefinería. Para las biorefinerías, se incentiva en mayor medida a las que implica costos de operación menores (**Tabla 4.3**).

**Tabla 4.2.** Incentivos y castigos económicos para refinerías (\$USD/tonelada).

| Lugar/Escenario         |     |                |                           | POSITIVO |       | NEGATIVO |      |
|-------------------------|-----|----------------|---------------------------|----------|-------|----------|------|
| Estado                  | PIB | Base económica | Base económica modificada | +50%     | -50%  | -50%     | +50% |
| <b>Querétaro</b>        | 2.3 | 10             | 15.33                     | 23       | 7.66  | 7.66     | 23   |
| <b>Tamaulipas</b>       | 2.9 | 10             | 19.33                     | 29       | 9.66  | 9.66     | 29   |
| <b>Veracruz</b>         | 4.5 | 10             | 30.00                     | 45       | 15.00 | 15.00    | 45   |
| <b>Guanajuato</b>       | 4.0 | 10             | 26.66                     | 40       | 13.33 | 13.33    | 40   |
| <b>Oaxaca</b>           | 1.5 | 10             | 10.00                     | 15       | 5.00  | 5.00     | 15   |
| <b>Hidalgo</b>          | 1.6 | 10             | 10.66                     | 16       | 5.33  | 5.33     | 16   |
| <b>Jalisco</b>          | 6.8 | 10             | 45.33                     | 68       | 22.66 | 22.66    | 68   |
| <b>Estado de México</b> | 9.1 | 10             | 60.66                     | 91       | 30.33 | 30.33    | 91   |
| <b>Sinaloa</b>          | 2.2 | 10             | 14.66                     | 22       | 7.33  | 7.33     | 22   |

**Tabla 4.3.** Incentivos económicos y castigos para biorefinerías (\$USD/tonelada).

| Recurso/Escenario         |        |                |                           | POSITIVO |      | NEGATIVO |       |
|---------------------------|--------|----------------|---------------------------|----------|------|----------|-------|
|                           | COP    | Base económica | Base económica modificada | +50%     | -50% | -50%     | +50%  |
| <b>Astillas de madera</b> | 100.00 | 8              | 12.99                     | 19.49    | 6.49 | 6.49     | 19.49 |
| <b>Caña de azúcar</b>     | 39.52  | 8              | 14.81                     | 22.22    | 7.40 | 7.40     | 22.22 |
| <b>Sorgo dulce</b>        | 20.93  | 8              | 15.37                     | 23.05    | 7.68 | 7.68     | 23.05 |
| <b>Jatrofa</b>            | 113.31 | 8              | 12.59                     | 18.89    | 6.29 | 6.29     | 18.89 |
| <b>Palma africana</b>     | 71.56  | 8              | 13.85                     | 20.77    | 6.92 | 6.92     | 20.77 |
| <b>Desecho de agave</b>   | 266.60 | 8              | 8.00                      | 12.00    | 4.00 | 4.00     | 12.00 |

Las emisiones objetivo se calcularon a partir de las emisiones mínimas generadas por las emisiones durante el transporte de biomasa, el proceso de producción, el transporte del producto hasta el destino final y las emisiones debido al uso del producto. Luego, las emisiones propuestas se calculan como un 15% más que las emisiones objetivo, como se puede ver en la **Tabla 4.4** para productos de refinería y la **Tabla 4.5** para productos de biorefinería.

La **Tabla 4.6** muestra los valores de los parámetros utilizados en el esquema de incentivos y también el valor de delta que se utiliza para asegurar que se ha cumplido la desigualdad.

**Tabla 4.4.** Emisiones objetivo y propuestas para productos de combustibles fósiles.

| <b>i</b> | <b>EMISIONES OBJETIVO, CO<sub>2</sub>e/año</b> |                |               | <b>EMISIONES PROPUESTAS, CO<sub>2</sub>e/año</b> |                |                |
|----------|------------------------------------------------|----------------|---------------|--------------------------------------------------|----------------|----------------|
|          | <b>Regular</b>                                 | <b>Premium</b> | <b>Diésel</b> | <b>Regular</b>                                   | <b>Premium</b> | <b>Diésel</b>  |
| <b>1</b> | 16,026,177.67                                  | 880,217.26     | 13,932,328.56 | 18,430,104.32                                    | 1,012,249.85   | 106,022,177.85 |
| <b>2</b> | 11,559,977.14                                  | 634,916.26     | 10,049,644.82 | 13,293,973.71                                    | 730,153.70     | 11,557,091.54  |
| <b>3</b> | 16,453,245.06                                  | 903,673.37     | 14,303,598.24 | 18,921,231.82                                    | 1,039,224.37   | 16,449,137.97  |
| <b>4</b> | 3,995,693.33                                   | 219,458.31     | 3,473,648.43  | 4,595,047.33                                     | 252,377.06     | 3,994,695.69   |
| <b>5</b> | 20,073,075.88                                  | 1,102,487.44   | 14,943,450.91 | 23,084,037.26                                    | 1,267,860.56   | 17,184,968.55  |
| <b>6</b> | 20,844,377.56                                  | 1,144,850.23   | 18,121,021.12 | 23,971,034.19                                    | 1,316,577.77   | 20,839,174.29  |
| <b>7</b> | 17,517,349.41                                  | 962,118.48     | 8,726,879.97  | 20,144,951.82                                    | 1,106,436.25   | 10,035,911.97  |
| <b>8</b> | 25,829,876.10                                  | 1,418,673.60   | 0.00          | 29,704,357.52                                    | 1,631,474.64   | 0.00           |
| <b>9</b> | 13,941,865.73                                  | 865,184.21     | 10,933,726.80 | 16,033,145.59                                    | 994,961.84     | 12,573,785.82  |

**Tabla 4.5.** Emisiones objetivo y propuestas para bioproductos.

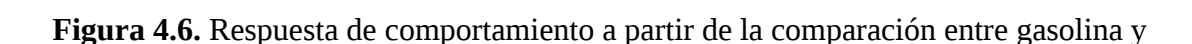
| <b>b</b> | <b>EMISIONES<br/>OBJETIVO, CO<sub>2</sub>e/año</b> |                  | <b>EMISIONES<br/>PROPUESTAS,<br/>CO<sub>2</sub>e/año</b> |                  |
|----------|----------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------------------|------------------|
|          | <b>Bioetanol</b>                                   | <b>Biodiesel</b> | <b>Bioetanol</b>                                         | <b>Biodiesel</b> |
| <b>1</b> | 34,976.00                                          | 19,674.00        | 40,222.40                                                | 22,625.10        |
| <b>2</b> | 17,928.82                                          | 15,272.70        | 20,618.15                                                | 17,563.61        |
| <b>3</b> | 25,251.51                                          | 9,339.60         | 29,039.23                                                | 10,740.54        |
| <b>4</b> | 75,672.07                                          | 67,105.42        | 87,022.89                                                | 77,171.24        |
| <b>5</b> | 22,861.36                                          | 14,616.28        | 26,290.57                                                | 16,808.72        |
| <b>6</b> | 111,269.75                                         | 77,323.04        | 127,960.21                                               | 88,921.50        |

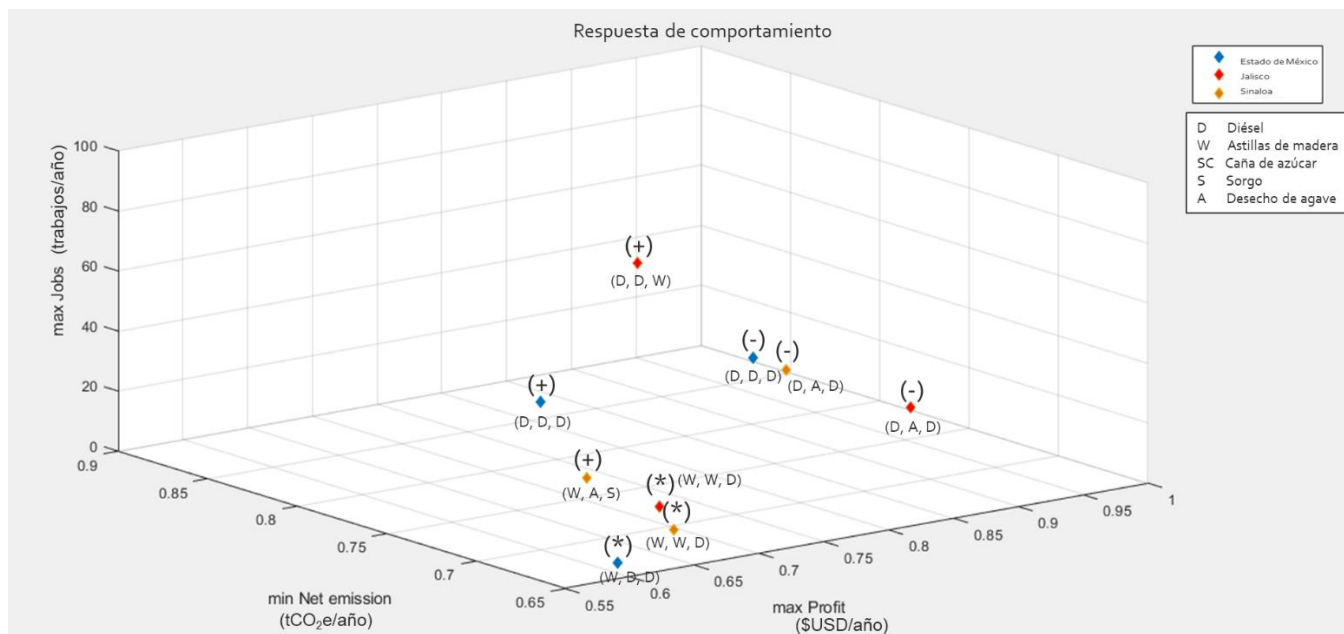
**Tabla 4.6.** Valor adimensional para parámetros

| Parámetro            | Valor adimensional |
|----------------------|--------------------|
| <b>u</b>             | 1                  |
| <b>v</b>             | 1                  |
| <b>x</b>             | 1                  |
| <b>u<sup>b</sup></b> | $1 \times 10^7$    |
| <b>v<sup>b</sup></b> | $1 \times 10^7$    |
| <b>x<sup>b</sup></b> | $1 \times 10^7$    |
| <b>δ</b>             | $1 \times 10^{-5}$ |

En la **Figura 4.6** se colectan los valores más altos de cada función objetivo, es decir, los valores más preferentes para cada caso. Cabe señalar que en cualquier caso se prefiere la gasolina premium. La forma en que se ordenan los puntos es la siguiente: la preferencia se obtiene maximizando la utilidad, minimizando las emisiones netas y maximizando los empleos generados. Esto se hace para un escenario base, un escenario positivo (50% mayor que la base) y un escenario negativo (50% menor que la base). Por ejemplo, para el escenario base (\*) del estado de México (W, A, A), significa que al maximizar la utilidad se prefiere el uso de bioetanol a partir de astillas de madera (W), al minimizar las emisiones se prefiere bioetanol a partir de residuos de agave (A), y cuando se maximizan los puestos de trabajo, se prefiere el bioetanol a partir de residuos de agave (A).

Al comparar la preferencia de la gasolina contra el bioetanol (**Figura 4.6**), una solución interesante es un escenario positivo en Jalisco (R, R, A), donde se prefiere el bioetanol de desecho de agave 41 unidades más que las otras opciones disponibles, pero al mismo tiempo, se considera gasolina regular. La **Figura 4.7** muestra la preferencia al comparar el diésel frente al biodiésel. Una solución que se puede destacar es un escenario positivo en Jalisco (D, D, W), donde se prefiere el bioetanol a partir de astillas de madera 93 unidades más que las otras opciones. Se puede señalar que en ambos casos, gasolina/bioetanol y diesel/biodiesel, el escenario positivo en Jalisco tiene la mayor preferencia a la hora de maximizar empleos. En este sentido, se pueden modelar escenarios para determinar la





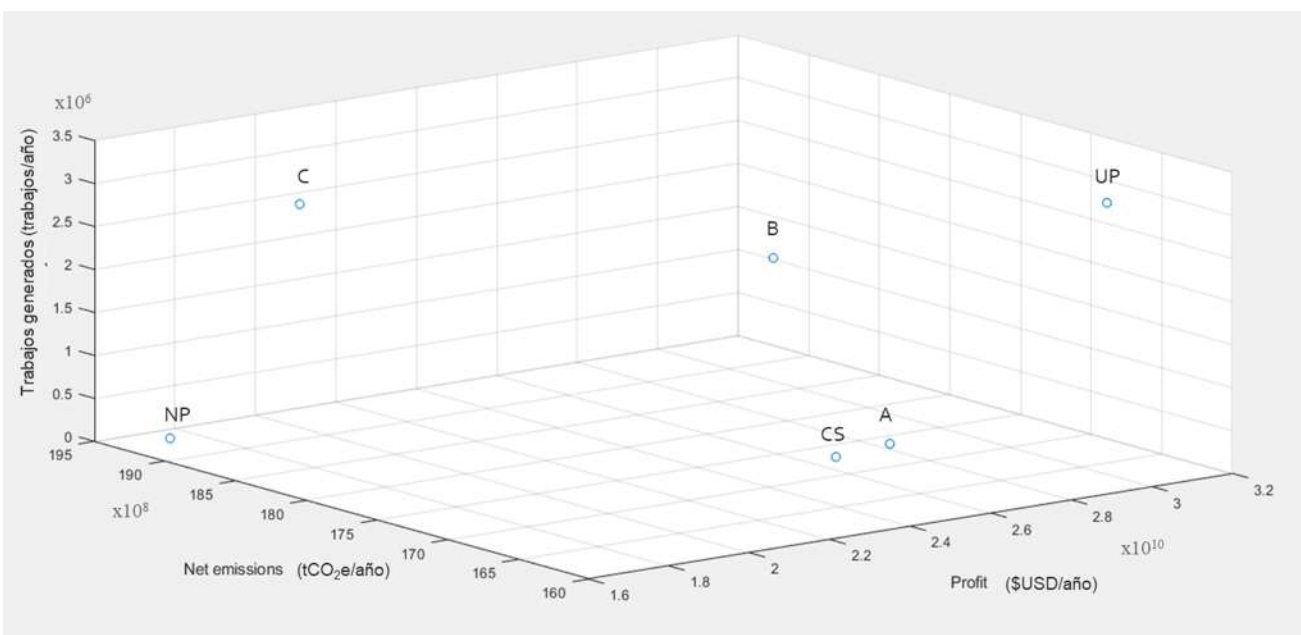
**Figura 4.7.** Respuesta de comportamiento a partir de la comparación entre diésel y biodiésel. (\*) Escenario base, (+) Escenario positivo y (-) Escenario negativo

La curva de pareto es difícil de construir cuando se consideran múltiples funciones objetivo simultáneamente ya que la solución de un problema de optimización multiobjetivo considera criterios conflictivos. Por lo tanto, el enfoque de toma de decisiones de múltiples tomadores de decisión trata de identificar las soluciones ideales y peores y las compensaciones asociadas para el sistema, buscando tomar la decisión final que llegue a una forma de consenso o solución de compromiso [80].

Para resolver el problema de optimización multiobjetivo aplicando el enfoque multistakeholder, en primer lugar, es necesario establecer las funciones objetivo consideradas: ganancia de la cadena de suministro, emisiones netas y empleos generados. Luego, cada función objetivo se maximiza y/o minimiza para determinar los límites inferior y superior; estas soluciones definen las coordenadas de los puntos utópico y nadir. El punto utópico (UP) se obtiene a través de la “mejor solución” para cada objetivo considerado. El punto utópico no se puede implementar, ya que los objetivos son contradictorios, pero se utiliza como una referencia ideal. La solución nadir (NS) se obtiene a través de los peores valores de los objetivos en el punto utópico [80]. Luego, se establecen pesos para reflejar las

prioridades de los diferentes tomadores de decisiones para calcular la solución compromiso para cada parte interesada. Finalmente, se obtiene una solución compromiso global.

El punto A (**Figura 4.8**) representa la solución de máxima ganancia sin considerar los objetivos de emisiones y empleos generados. Es importante resaltar que los valores de emisiones y empleos generados están lejos de sus mejores valores. El punto B representa solo la solución con las emisiones más bajas. El punto C viene dado por el máximo de puestos de trabajo generados. Cuanto más cerca esté el punto del punto de la utopía, mejor. El punto A podría ser una solución factible porque es el más cercano a la mejor solución (UP) y muestra que el objetivo económico es más significativo al elegir soluciones óptimas.

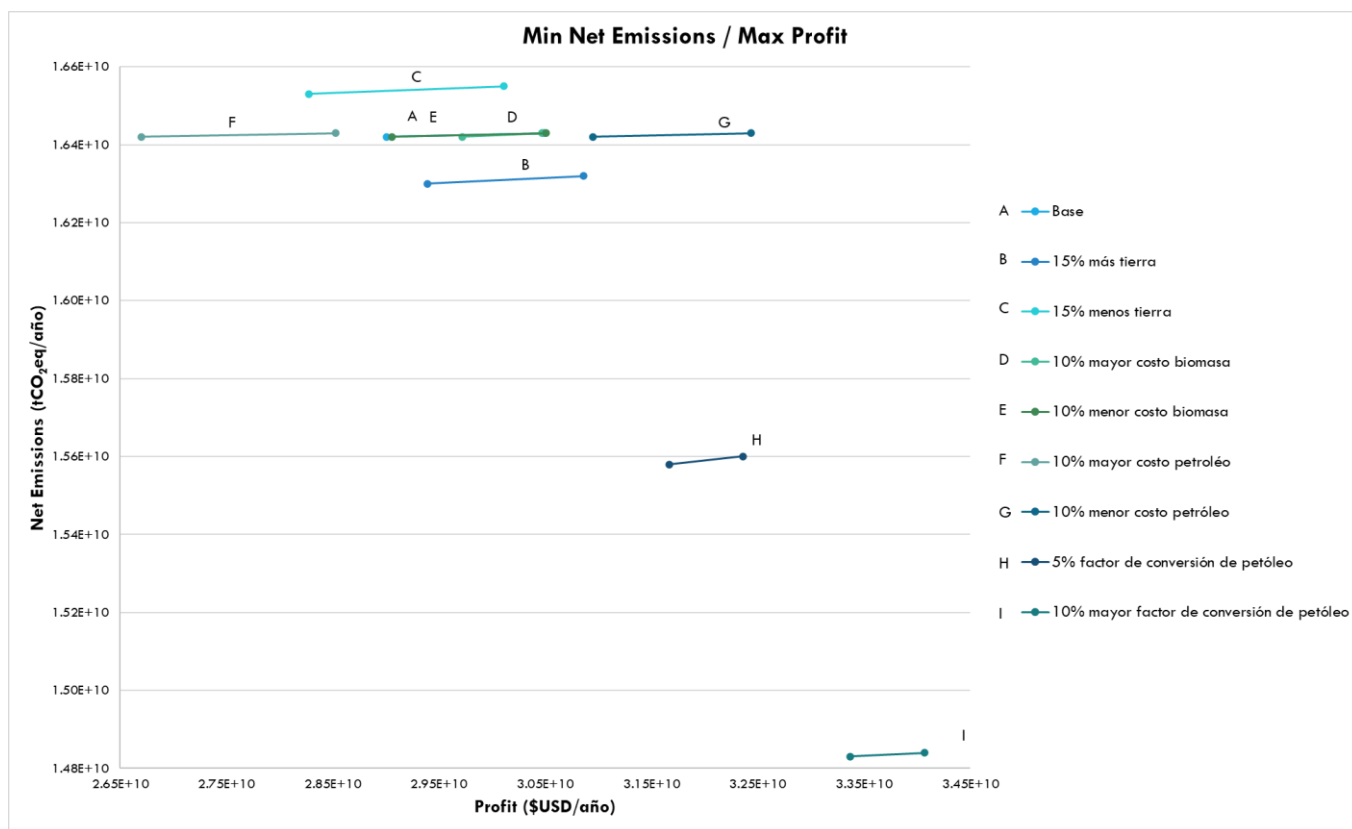


**Figure 4.8.** Representación del enfoque multistakeholder

El análisis de sensibilidad le permite al tomador de decisiones predecir los resultados de un problema, lo que ayuda a comprender las incertidumbres, las limitaciones y el alcance de un modelo matemático. La **Figura 4.9** muestra soluciones minimizando las emisiones netas y maximizando las ganancias para diferentes casos para determinar la sensibilidad del problema. Los empleos generados no fueron considerados para este análisis. Los parámetros

seleccionados son el suelo disponible que puede ser un 15% más o un 15% menos que el inicial, el costo de la biomasa (un 10% más y un 10% menos que la media), el coste del petróleo (un 10% más y un 10% menos), y el factor de conversión del crudo (5% y 10% más).

Se puede observar que la solución I representa las emisiones netas mínimas ( $1.48 \times 10^{10}$  tCO<sub>2</sub>e/año) y la ganancia máxima ( $3.41 \times 10^{10}$  \$USD/año) de todas las soluciones; sin embargo, lograr un 10% más en el factor de conversión depende de la tecnología de transformación y de la industria. La Solución C representa las emisiones más altas ( $1.66 \times 10^{10}$  tCO<sub>2</sub>e/año) cuando se restringe al área terrestre. La solución B puede ser una solución factible, de esta manera las emisiones no son tan altas ( $1.63 \times 10^{10}$  tCO<sub>2</sub>e/año) como otras soluciones al tener más tierra para cosechar, y la ganancia es mejor ( $3.09 \times 10^{10}$  \$USD/año) en comparación con las otras soluciones.



**Figura 4.9.** Soluciones para el análisis de sensibilidad. El punto izquierdo de cada línea representa la emisión neta mínima, el punto derecho representa la ganancia máxima.

## 4.5 Nomenclatura

### 4.5.1 Conjuntos

|    |                                      |
|----|--------------------------------------|
| b  | Biorefinerías                        |
| bm | Tipo de biomas                       |
| e  | Eco-industrias                       |
| i  | Refinerías                           |
| j  | Centro de distribución               |
| m  | Sitios de cosecha o campo de biomasa |
| o  | Pozos de petróleo crudo              |
| p1 | Productos de refinerías              |
| p2 | Productos de biorefinerías           |

### 4.5.2 Variables

|                           |                                                        |
|---------------------------|--------------------------------------------------------|
| $B_b^{biodiesel}$         | Respuesta por el uso de biodiesel                      |
| $B_b^{bioethanol}$        | Respuesta por el uso de bioetanol                      |
| $B_i^{diesel}$            | Respuesta por el uso de diésel                         |
| $B_i^{premium}$           | Respuesta por el uso de gasolina premium               |
| $B_i^{regular}$           | Respuesta por el uso de gasolina regular               |
| $E_b^{biodiesel}$         | Emisiones relacionadas al biodiesel                    |
| $E_b^{Bioref-product}$    | Emisiones del transporte de biomasa                    |
| $E_i^{product-ref}$       | Emisiones del transporte de petróleo                   |
| $E_i^{trans-product-ref}$ | Emisiones del transporte de los productos petrolíferos |

|                             |                                                              |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------|
| $E_b^{use-prod-bioref}$     | Emisiones por el uso de bioproductos                         |
| $F_{p2,b}^{product-Bioref}$ | Flujo total de productos en biorefinerías                    |
| $F_{p1,i}^{product-ref}$    | Flujo total de productos en refinerías                       |
| $P_b^{biodiesel}$           | Castigo económico por consumo de biodiesel                   |
| $R_i^{diesel}$              | Recompensa económica por el consumo de diésel                |
| $\theta_b^{bd}$             | Fracción de biodiésel en el caudal total de bioproductos     |
| $\theta_b^{be}$             | Fracción de bioetanol en caudal total en bioproductos        |
| $\theta_i^d$                | Fracción de diésel en caudal total de petrolíferos           |
| $\theta_i^m$                | Fracción de gasolina regular en caudal total de petrolíferos |
| $\theta_i^p$                | Fracción de gasolina premium en caudal total de petrolíferos |

#### 4.5.3 Variables binarias

|           |                                                                                                                     |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $y_{A_b}$ | Activación de incentivo económico en productos de biorrefinerías cuando las emisiones sean iguales a las propuestas |
| $y_{B_b}$ | Activación de incentivo económico en productos de biorrefinerías cuando las emisiones sean mayores a las propuestas |
| $y_{C_b}$ | Activación de incentivo económico en productos de biorrefinerías cuando las emisiones sean menores a las propuestas |
| $y_A$     | Activación de incentivo económico en productos de refinerías cuando las emisiones sean iguales a las propuestas     |

|           |                                                                                                                 |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $y_{B_i}$ | Activación de incentivo económico en productos de refinerías cuando las emisiones sean mayores a las propuestas |
| $y_{C_i}$ | Activación de incentivo económico en productos de refinerías cuando las emisiones sean menores a las propuestas |

#### 4.5.4 Parámetros

|                    |                                                                          |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| $CEmis_b^{Bioref}$ | Incentivo económico base para biorefinerías                              |
| $CEmis_i^{Ref}$    | Incentivo económico base para refinerías                                 |
| $E_b^{bioobj}$     | Emisiones objetivo relacionadas con productos de biorefinerías           |
| $E_b^{bioprop}$    | Emisiones propuestas relacionadas con bioproductos                       |
| $E_i^{obj}$        | Emisiones objetivo relacionadas con los productos de las refinerías      |
| $E_i^{prop}$       | Emisiones propuestas relacionadas con los productos de las refinerías    |
| $\delta$           | Valor usado en disyunción para hacer una ligera diferencia en igualdades |

## **CAPÍTULO CINCO**

### **INTENSIFICACIÓN DEL PROCESO DE FRACTURACIÓN HIDRÁULICA INVOLUCRANDO ESQUEMAS DE INCENTIVOS Y EL USO DE LA MATCHING LAW**

#### **5.a Resumen**

Debido a las grandes cantidades de agua requeridas en la fracturación del gas shale es necesario buscar la correcta planificación y gestión de los recursos hídricos. En este capítulo se propone un modelo de programación matemática capaz de obtener la solución óptima que considera la incertidumbre asociada a la cantidad de agua requerida por pozo, así como la fracción de agua que retorna a la superficie. Se involucran esquemas de incentivos económicos para promover la reutilización del agua y el uso de tratamientos para aguas contaminadas. Se considera el comportamiento de los involucrados a través del estudio de preferencia entre tratamientos. El proceso es intensificado al promover la conservación de los recursos naturales y disminuir los flujos de sustancias peligrosas. La función objetivo es reducir costos y satisfacer las necesidades de agua. El enfoque propuesto se aplicó a un caso de estudio de las formaciones de shale de Marcellus y Barnett. Los resultados muestran que existe un mejor desempeño mediante el uso de esquemas de incentivos económicos, demostrando que se pueden reducir los costos en un 98.6% y el consumo de agua dulce en un 98.1%. Además, conociendo las preferencias de los tratamientos a través de la matching law es posible modificar los incentivos para favorecer la intensificación de procesos, así como las necesidades de las decisiones de los tomadores de decisiones.

## 5.1 Planteamiento del problema

La producción de gas shale requiere una gran cantidad de agua para la fracturación hidráulica que va de 2 a 4 millones de galones de agua por pozo [81]. Es necesario desarrollar una planificación estratégica que considere la gestión del agua para la producción de gas shale [82], además de incluir la incertidumbre relacionada con el agua requerida en cada pozo para la fractura y la incertidumbre del porcentaje de agua de retorno. Se considera que un conjunto de escenarios que se generan con la misma probabilidad representan las incertidumbres inherentes a la gestión del agua en las operaciones de gas shale. Cuando hay información incierta lo que se recomienda es considerar datos del pasado para incluir diferentes escenarios probabilísticos que van a ser modelados como optimización bajo incertidumbre [82], en el caso de la fracturación hay una distribución uniforme de los datos con la misma probabilidad de ocurrencia y no se muestra otra distribución diferente [83, 84]. Sin embargo, puede haber otro tipo de problemas donde se presente diferente probabilidad. Generalmente, el agua de retorno está altamente contaminada y debe ser tratada antes de su disposición final, además, el agua tratada puede reutilizarse para la fracturación hidráulica.

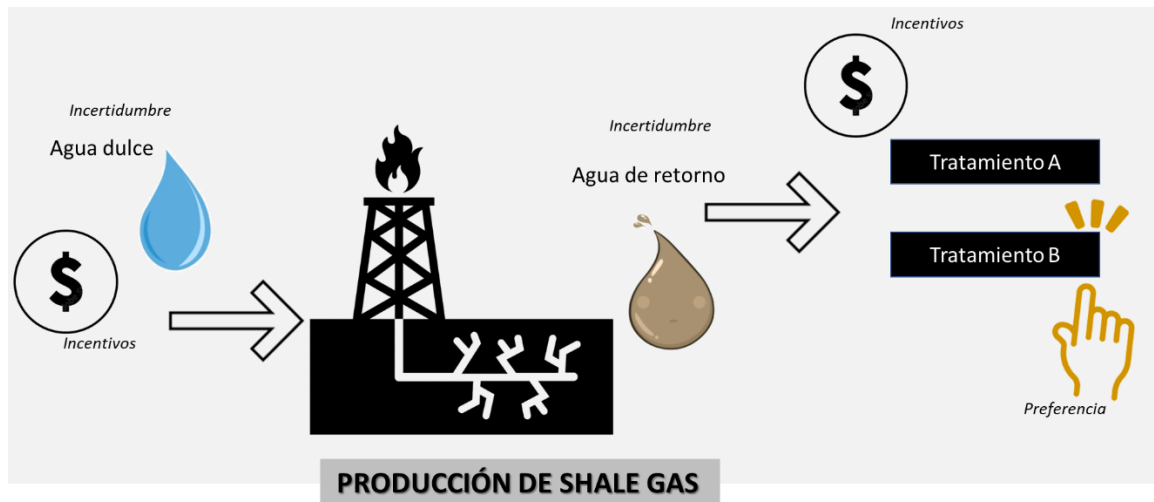
El ente regulador es el gobierno, por lo tanto, el gobierno es el que cede los incentivos económicos. Los esquemas de incentivos o impuestos se utilizan para promover el cumplimiento de objetivos que ayuden al medio ambiente [85]. El gobierno ofrece incentivos económicos al productor (el propietario de la cuadrilla de gas de esquisto) para reducir el consumo de agua dulce. El gobierno establece límites al agua dulce, si el productor cumple esos límites, se reciben incentivos económicos, si no, hay sanciones económicas. Asimismo, se incentiva el tratamiento del agua de retorno para asegurar la correcta disposición final y la factibilidad de reutilización del agua contaminada después de haber sido tratada. Además, es importante comprender la preferencia del tipo de tratamiento por el uso de la matching law.

La función objetivo es minimizar el costo total anual bajo escenarios de incertidumbre que involucran un esquema de incentivos y el comportamiento de los involucrados (**Figura 5.1**). El problema abordado puede enunciarse de la siguiente manera.

Se cuenta con la siguiente información:

- Horas de operación
- Eficiencias de los tratamientos
- Límites máximos
  - Agua dulce
  - Tratamiento de los flujos de agua
  - Almacenamiento
  - Disposición final
- Costos unitarios
  - Agua dulce
  - Transporte
  - Tratamiento
  - Disposición final
  - Almacenamiento
- Flujo requerido por pozo
  - Flujo de entrada
  - Flujo de salida
- Disponibilidad de agua
- Incentivo económico base
  - Esquema de agua dulce
  - Esquema de tratamiento
- Objetivo (establecido por el gobierno)
  - Agua dulce
  - Agua tratada
- Propuesta (establecido por el productor)
  - Agua dulce
  - Agua tratada
- Máximo incentivo y castigo económico
  - Uso de agua dulce
  - Uso de tratamientos

- Mínimo incentivo y castigo económico
  - Uso de agua dulce
  - Uso de tratamiento



**Figura 5.1.** Descripción del planteamiento del problema

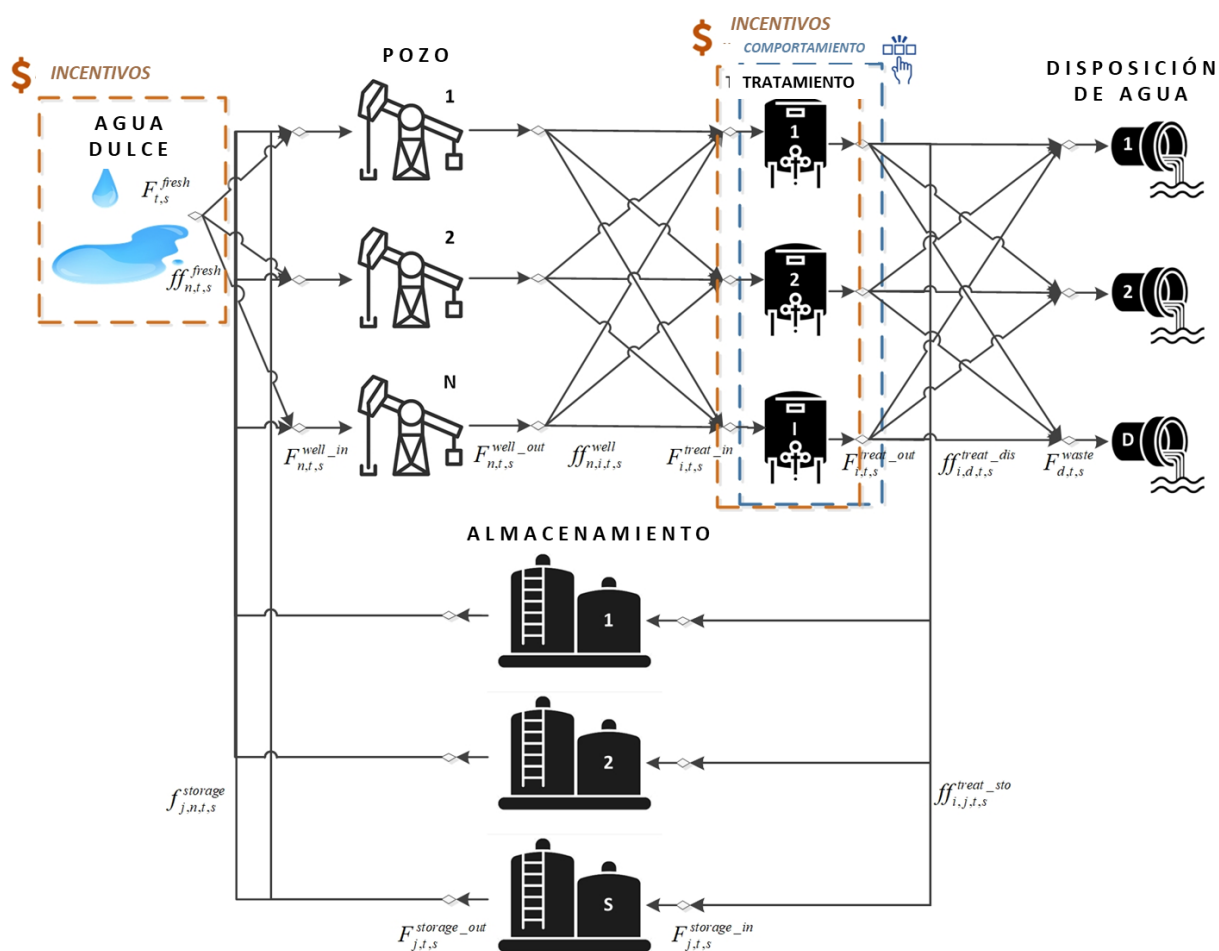
La matching law puede ser utilizada como herramienta para favorecer la intensificación de este tipo de procesos mediante el uso de un esquema de incentivos/penalizaciones económicas para incrementar la reutilización del agua y promover el uso de tratamientos para aguas de retorno, y al mismo tiempo determinar la preferencia por cada tipo de tratamiento propuesto. En trabajos anteriores, la matching law no se había utilizado en los casos en los que interviene la incertidumbre de los procesos, donde no se trata sólo de combinar los conceptos sino, a partir de ambas ideas, proponer un modelo matemático capaz de resolver el problema planteado.

## 5.2 Modelo

El modelo matemático propuesto se basa en la superestructura presentada en la **Figura 5.2**. Se consideran fuentes de agua dulce para ser utilizadas en operaciones de fracturación hidráulica  $n$ . El agua de retorno debe someterse a cualquiera de los tratamientos disponibles

$i$  que pueden ser enviados a disposición final  $d$  o almacenamiento  $j$ . El agua tratada que se almacena se puede reutilizar en otras operaciones de fracturación.

Se busca fomentar la reutilización del agua y se establecen límites para el consumo de agua dulce; si el consumo es superior al indicado, se penaliza económicamente. Por otro lado, si se alcanza o reduce la cantidad de agua dulce establecida, se incentiva económicamente. También se promueve el uso del tratamiento de agua, cuanto más agua se trata, mayor es el incentivo. Para cada tipo de tratamiento, el incentivo es diferente. Además, se determina cuantitativamente la preferencia por el tipo de tratamiento que se relaciona con los incentivos económicos otorgados mediante el uso de la matching law.



**Figura 5.2.** Superestructura propuesta para intensificar la reutilización de agua en operaciones de fracturación hidráulica

### 5.2.1 Balances de masa

#### 5.2.1.1 Agua dulce

El agua dulce requerida para ser utilizada en el fluido de fracturación para liberar el gas proviene de un depósito de agua disponible. Luego, el agua extraída en el periodo  $t$  y escenario  $s$  ( $F_{t,s}^{fresh}$ ) se envía a cada pozo  $n$  que requiera agua ( $ff_{n,t,s}^{fresh}$ ):

$$F_{t,s}^{fresh} = \sum_n ff_{n,t,s}^{fresh}, \forall t, \forall s \quad (146)$$

El agua requerida por el pozo  $n$  en el período  $t$  y el escenario  $s$  ( $F_{n,t,s}^{well\_in}$ ) puede ser satisfecha por los recursos de agua dulce ( $ff_{n,t,s}^{fresh}$ ) y por las corrientes reutilizadas provenientes del almacenamiento  $j$  ( $ff_{j,n,t,s}^{storage}$ ).

$$F_{n,t,s}^{well\_in} = ff_{n,t,s}^{fresh} + \sum_j ff_{j,n,t,s}^{storage}, \forall n, \forall t, \forall s \quad (147)$$

#### 5.2.1.2 Agua de retorno

Una vez terminada la fase de finalización en cada pozo, una determinada cantidad de agua vuelve a la superficie principalmente en las dos primeras semanas, lo que se denomina “agua de retorno”. El agua de retorno en el pozo  $n$  durante el período  $t$  y para el escenario  $s$  ( $F_{n,t,s}^{well\_out}$ ) se puede enviar a cualquier tratamiento  $i$  ( $ff_{n,i,t,s}^{well}$ ).

$$F_{n,t,s}^{well\_out} = \sum_i ff_{n,i,t,s}^{well}, \forall n, \forall t, \forall s \quad (148)$$

#### 5.2.1.3 Tratamiento

El agua de retorno debe ser tratada para asegurar buenas condiciones de calidad para ser almacenada o eliminada. Se utilizan unidades móviles de tratamiento que llegan a los yacimientos de gas shale donde se produce el agua de retorno. Los flujos de salida de los pozos  $n$  ( $ff_{n,i,t,s}^{well}$ ) son enviados a la unidad de tratamiento  $i$  en el periodo  $t$  y escenario  $s$  ( $F_{i,t,s}^{treat\_in}$ ).

$$F_{i,t,s}^{treat\_in} = \sum_n ff_{n,i,t,s}^{well}, \forall i, \forall t, \forall s \quad (149)$$

El agua tratada  $i$  en el periodo  $t$  y escenario  $s$  ( $F_{i,t,s}^{treat\_out}$ ) puede ser enviada a cualquier unidad de almacenamiento  $j$  ( $ff_{i,j,t,s}^{treat\_sto}$ ) y cualquier disposición final  $d$  ( $ff_{i,d,t,s}^{treat\_dis}$ ).

$$F_{i,t,s}^{treat\_out} = \sum_j ff_{i,j,t,s}^{treat\_sto} + \sum_d ff_{i,d,t,s}^{treat\_dis}, \forall i, \forall t, \forall s \quad (150)$$

#### 5.2.1.4 Eliminación y descarga de residuos

El flujo residual ( $F_{d,t,s}^{waste}$ ) es la suma de todos los flujos segregados de tratamiento  $i$  enviados a disposición final  $d$  durante el periodo  $t$  para el escenario  $s$  ( $f_{i,d,t,s}^{treat\_dis}$ ).

$$F_{d,t,s}^{waste} = \sum_i ff_{i,d,t,s}^{treat\_dis}, \forall d, \forall t, \forall s \quad (151)$$

#### 5.2.1.5 Entrada de agua a las unidades de almacenamiento

El flujo de entrada a cada unidad de almacenamiento ( $F_{j,t,s}^{storage\_in}$ ) es la suma de los flujos provenientes del tratamiento  $i$  enviados al almacenamiento  $j$  en el periodo  $t$  y escenario  $s$  ( $f_{i,j,t,s}^{treat\_sto}$ ).

$$F_{j,t,s}^{storage\_in} = \sum_i ff_{i,j,t,s}^{treat\_sto}, \forall j, \forall t, \forall s \quad (152)$$

#### 5.2.1.6 Salida de agua a las unidades de almacenamiento

El flujo a la salida del almacenamiento  $j$  en el tiempo  $t$  y escenario  $s$  ( $F_{j,t,s}^{storage\_out}$ ) se envía a cualquier pozo  $n$  que necesite agua ( $ff_{j,n,t,s}^{storage}$ ). El almacenamiento de agua se realiza en pozos debido a su gran capacidad mostrando gran tiempo de residencia y disponibilidad para su reutilización de acuerdo al requerimiento de fluido de fracturación de los pozos.

$$F_{j,t,s}^{storage\_out} = \sum_n ff_{j,n,t,s}^{storage}, \forall j, \forall t, \forall s \quad (153)$$

### 5.2.1.7 Unidades de tratamiento

Es necesario modelar las pérdidas de agua durante el tratamiento mediante un factor de eficiencia asociado al volumen para cada tecnología  $i$  ( $\alpha_i^{treat}$ ).

$$F_{i,t,s}^{treat\_out} = \alpha_i^{treat} \cdot F_{i,t,s}^{treat\_in}, \forall i, \forall t, \forall s \quad (154)$$

### 5.2.1.8 Unidades de almacenamiento

Se considera un volumen inicial para cada unidad ( $V_j^{storage\_initial}$ ). Luego, el volumen para el almacenamiento  $j$  y el periodo  $t$  en el escenario  $s$  ( $V_{j,t,s}^{storage}$ ) se calcula a partir del volumen anterior en el periodo  $t-1$  ( $V_{j,t-1,s}^{storage}$ ) más el producto del factor de conversión del tiempo ( $H^{time}$ ) y la diferencia entre los flujos de entrada ( $F_{j,t,s}^{storage\_in}$ ) y salida ( $F_{j,t,s}^{storage\_out}$ ), que se pueden modelar de la siguiente manera.

$$V_{j,t,s}^{storage} = V_j^{storage\_initial} + H^{time} \cdot (F_{j,t,s}^{storage\_in} - F_{j,t,s}^{storage\_out}), \forall j, \forall t = 1, \forall s \quad (155)$$

$$V_{j,t,s}^{storage} = V_{j,t-1,s}^{storage} + H^{time} \cdot (F_{j,t,s}^{storage\_in} - F_{j,t,s}^{storage\_out}), \forall j, \forall t > 1, \forall s \quad (156)$$

La ecuación (157) asegura la continuidad de los ciclos de la siguiente manera.

$$V_j^{storage\_initial} = V_{j,t,s}^{storage}, \forall j, \forall t = t^{final}, \forall s \quad (157)$$

## 5.2.2 Restricciones de capacidad y diseño

El modelo optimiza la capacidad para cada unidad requerida, la cual debe ser inferior a la capacidad máxima disponible en cada caso.

### 5.2.2.1 Unidades de tratamiento

La capacidad óptima para la tecnología  $i$  ( $F_i^{treat\_cap}$ ) debe ser menor que el límite superior ( $F_i^{treat\_max}$ ), siendo una variable binaria  $y_i^{treat}$  que modela la existencia de la unidad de tratamiento  $i$ .

$$F_i^{treat\_cap} \geq F_{i,t,s}^{treat\_in}, \forall i, \forall t, \forall s \quad (158)$$

$$F_i^{treat\_cap} \leq F_i^{treat\_max} y_i^{treat}, \forall i \quad (159)$$

La **ecuación 160** representa la capacidad total de tecnologías de tratamiento que se deben instalar.

$$TotCap^{treatment} = \sum_i F_i^{treat\_cap} \quad (160)$$

### 5.2.2.2 Unidades de almacenamiento

Para modelar el almacenamiento se utilizan las ecuaciones (161) a (163). Donde  $V_j^{storage\_cap}$  representa la capacidad de la unidad de almacenamiento  $j$ ,  $V_j^{storage\_max}$  es la capacidad superior de la unidad  $j$ ,  $y_j^{storage}$  es una variable binaria utilizada para modelar la existencia de la unidad de almacenamiento  $j$  y  $TotCap^{storage}$  representa la capacidad total de unidades de almacenamiento/pozo requeridas para almacenar el fluido. El almacenamiento que se considera es para reúso del agua, se realiza en tanques y no se toman en cuenta las pérdidas. Cuando se utilizan pozos típicos de clase II, es para disposición final y las ecuaciones relacionadas no están incluidas. Se considera únicamente como la cantidad total de agua para disposición final. Lo que se busca es reducir el agua que se inyecta y reutilizarla en la mayor medida de lo posible.

$$V_j^{storage\_cap} \geq V_{j,t,s}^{storage}, \forall j, \forall t, \forall s \quad (161)$$

$$V_j^{storage\_cap} \leq V_j^{storage\_max} y_j^{storage}, \forall j \quad (162)$$

$$TotCap^{storage} = \sum_j V_j^{storage\_cap} \quad (163)$$

### 5.2.2.3 Disposición final

La ecuación (164) calcula la capacidad óptima de disposición  $d$  en el escenario  $s$  ( $V_{d,s}^{waste\_scen}$ ).

$V_d^{waste\_cap}$  es la capacidad de disposición  $d$ ,  $V_d^{waste\_max}$  representa la capacidad máxima de disposición  $d$ ,  $y_d^{waste}$  se utiliza para modelar la existencia de disposición  $d$  y  $TotCap^{disposal}$  representa la capacidad total de disposición. La capacidad de disposición se refiere a la capacidad requerida para almacenar aguas residuales, es importante considerarla ya que de

ella depende parte de los costos de capital. Hasta hace poco, la estrategia de gestión más popular para las aguas residuales de la fracturación hidráulica era la eliminación a través de pozos de inyección subterráneos en comparación con otras opciones, como la eliminación en la superficie, la reutilización/reciclado y el tratamiento de aguas residuales en instalaciones industriales/municipales. Sin embargo, la práctica de eliminación se está volviendo menos factible debido al acceso limitado a los pozos de eliminación permitidos en los sitios de fracturación hidráulica y al aumento de la presión para desarrollar una solución más sostenible [86]. En este capítulo se considera el almacenamiento de aguas residuales como disposición final en el subsuelo con el uso de Pozos clase II, esto requiere de un sistema que permita dejar allí los residuos, que no salgan de la instalación ya que no se aprovechan posteriormente debido a los contaminantes. Los Pozos Clase II se utilizan únicamente para inyectar fluidos asociados con la producción de petróleo y gas natural. Los pozos de clase II se clasifican en una de tres categorías: pozos de eliminación, pozos de recuperación mejorada y pozos de almacenamiento de hidrocarburos [87].

$$V_{d,s}^{waste\_scen} = H^{time} \cdot \sum_t F_{d,t,s}^{waste}, \forall d, \forall s \quad (164)$$

$$V_d^{waste\_cap} \geq V_{d,s}^{waste\_scen}, \forall d, \forall s \quad (165)$$

$$V_d^{waste\_cap} \leq V_d^{waste\_max} \cdot y_d^{waste}, \forall d \quad (166)$$

$$TotCap^{disposal} = \sum_d V_d^{waste\_cap} \quad (167)$$

### 5.2.3 Requerimientos totales de agua

El agua dulce total ( $TWR_s$ ) se determina por la suma de agua dulce requerida ( $F_{t,s}^{fresh}$ ) durante el periodo total de tiempo  $t$ .

$$TWR_s = H^{time} \cdot \sum_t F_{t,s}^{fresh}, \forall s \quad (168)$$

El requerimiento total esperado de agua dulce (ETWR) se determina a través de la siguiente relación.

$$ETWR = \sum_s prob_s TWR_s \quad (169)$$

### 5.2.4 Incentivos y castigos económicos

Se propone un esquema de incentivos económicos junto con la matching law aplicado a la producción de gas shale bajo incertidumbre. Los incentivos económicos estimulan a las personas a desempeñarse mejor en su respectivo trabajo y la matching law estudia la preferencia de las personas en relación con la elección entre una opción u otra. Además, se considera la incertidumbre asociada al agua dulce disponible para la fracturación. Los incentivos y castigos económicos que se proponen se utilizan con la intención de que se reduzca el consumo de agua dulce y de esta manera asegurar la reutilización del agua de retorno. Al mismo tiempo, se promueve el tratamiento de aguas de retorno al usar la matching law que se puede relacionar con los flujos de incentivos y castigos económicos para determinar la preferencia de los involucrados hacia los diferentes tratamientos. Se pretende que haya un mayor reúso de agua a tratar. Mediante la variación de los incentivos considerados, tanto en el consumo de agua dulce como en los tratamientos, es posible estudiar el comportamiento de todo el sistema.

Se ha determinado que al incluir incentivos/sanciones económicas en los esquemas de planificación, es posible obtener mejores resultados [46]. En el problema considerado, los esquemas de incentivos y castigos económicos se aplican de la siguiente manera.

#### 5.2.4.1 Esquema de incentivos de Gonik-IBM [52]

La función principal de un incentivo es motivar a la persona que recibe el incentivo (denominada "A") a desarrollar un mayor nivel de esfuerzo, de modo que el producto derivado de su trabajo sea mayor. Un incentivo económico es una retribución variable, que depende de los resultados del trabajo de la persona implicada.

El análisis de Gonik-IBM se basa en diseñar fórmulas de incentivos que eliminen el efecto de ocultación y que recompensen a los "A" no sólo por los resultados obtenidos, sino también por su esfuerzo y su capacidad para proponer previsiones acertadas.

Cada "A" trabaja en condiciones diferentes, lo que significa que el mismo grado de esfuerzo no conducirá a los mismos resultados en un área que en otra. Teniendo esto en cuenta, el

gobierno (que asigna los incentivos) establece un objetivo a alcanzar y un incentivo base determinado. Posteriormente, se le pide a “A” que haga una propuesta que considere razonable, alta y confiable, haciéndole saber que el incentivo que recibirá al final del período se determinará de acuerdo con la siguiente disyunción:

$$\begin{bmatrix} Y_A \\ F = F^p \\ R = E \cdot u \cdot \frac{F^p}{F^0} \\ P = 0 \end{bmatrix} \vee \begin{bmatrix} Y_B \\ F > F^p \\ R = 0 \\ P = E \cdot x \cdot \frac{F - F^p}{2 \cdot F^0} \end{bmatrix} \vee \begin{bmatrix} Y_C \\ F < F^p \\ R = E \cdot v \cdot \frac{3 \cdot F + F^p}{2 \cdot F^0} \\ P = 0 \end{bmatrix} \quad (170)$$

Donde F representa el resultado,  $F^p$  es el monto que propuso el “A”,  $F^0$  es el monto que estableció el gobierno, E es la base de incentivos, R representa la recompensa y P representa la sanción; u, x y v son parámetros. Como se puede observar, el incentivo base es el monto que cobraría “A” si acepta el objetivo planteado por el gobierno y luego lo cumple.

Al estudiar el esquema de incentivos en su conjunto, se encuentran las siguientes propiedades:

- El “A” estará incentivado a dar como pronóstico propio el valor máximo probable, porque su incentivo definitivo será mayor que si da un pronóstico bajo que luego es superado por los resultados reales.
- El “A” tenderá a dar como propuesta un valor probable que no sea exagerado, ya que dar una propuesta que no se puede lograr es penalizado en términos del incentivo.

#### 5.2.4.2 Consumo de agua fresca

Siguiendo el esquema de incentivos de Gonik-IBM [52], se desarrolla la ecuación (171). Es necesario minimizar el consumo de agua ( $F_{t,s}^{fresh}$ ). El gobierno establece un flujo objetivo ( $F_{t,s}^{fresho}$ ) y el productor propone un flujo que debe ser viable y alcanzable ( $F_{t,s}^{freshp}$ ). Si el flujo de agua dulce utilizado es igual o menor a la cantidad propuesta, se obtiene un incentivo económico ( $R_{t,s}^{fresh}$ ), si el flujo de agua dulce es mayor al propuesto, se obtiene un castigo económico ( $P_{t,s}^{fresh}$ ). La diferencia entre la primera y la tercera parte de la disyunción es que

si se cumple el objetivo propuesto establecido por “A”, se obtiene una cantidad de incentivo económico, pero si se mejora el objetivo mediante un menor flujo de agua dulce consumida, el incentivo económico será mayor que la primera parte, lo que implica una reducción en el consumo de agua dulce. Esto se modela a través de la siguiente disyunción:

$$\left[ \begin{array}{l} Y_{A_s}^{fresh} \\ F_{t,s}^{fresh} = F_{t,s}^{freshp} \\ R_{t,s}^{fresh} = E_{t,s}^{fresh} \cdot u^f \cdot \frac{F_{t,s}^{freshp}}{F_{t,s}^{fresho}} \\ P_{t,s}^{fresh} = 0 \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{B_s}^{fresh} \\ F_{t,s}^{fresh} > F_{t,s}^{freshp} \\ R_{t,s}^{fresh} = 0 \\ P_{t,s}^{fresh} = E_{t,s}^{fresh} \cdot x^f \cdot \frac{F_{t,s}^{fresh} - F_{t,s}^{freshp}}{2 \cdot F_{t,s}^{fresho}} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{C_s}^{fresh} \\ F_{t,s}^{fresh} < F_{t,s}^{freshp} \\ R_{t,s}^{fresh} = E_{t,s}^{fresh} \cdot v^f \cdot \frac{3 \cdot F_{t,s}^{fresh} + F_{t,s}^{freshp}}{2 \cdot F_{t,s}^{fresho}} \\ P_{t,s}^{fresh} = 0 \end{array} \right], \forall t, \forall s \quad (171)$$

En la disyunción se utilizan diferentes variables: binarias y booleanas. La variable booleana se usa para modelar una disyunción y tener una mejor comprensión de lo que se quiere hacer, pero esta representación debe ser reformulada para convertirse en un problema algebraico, la variable booleana se transforma en una variable binaria. Haciendo notar que la variable booleana se rige por "verdadero" y "falso" mientras que la variable binaria puede tener valores de "0" y "1"; donde "1" representa existencia y "0" es inexistencia. Donde  $Y_{A_s}^{fresh}$  es una variable booleana que es verdadera cuando  $F_{t,s}^{fresh} = F_{t,s}^{freshp}$ , y las variables booleanas  $Y_{B_s}^{fresh}$  y  $Y_{C_s}^{fresh}$  son falsas; en este caso, el incentivo económico se calcula a través de un incentivo base  $E_{t,s}^{fresh}$ , el flujo objetivo determinado por el Gobierno ( $F_{t,s}^{fresho}$ ) y el flujo propuesto por el productor ( $F_{t,s}^{freshp}$ ), la sanción económica es cero. Por otro lado, cuando  $F_{t,s}^{fresh} > F_{t,s}^{freshp}$ , las variables booleanas  $Y_{A_s}^{fresh}$  y  $Y_{C_s}^{fresh}$  son falsas, el incentivo económico es cero y la penalización se calcula a partir del flujo de agua dulce consumido, el flujo propuesto y el flujo objetivo. Finalmente, cuando  $F_{t,s}^{fresh} < F_{t,s}^{freshp}$ , las variables booleanas  $Y_{A_s}^{fresh}$  y  $Y_{B_s}^{fresh}$  son falsas, en este caso la penalización económica es cero ya que se reduce el caudal de agua dulce consumido ( $F_{t,s}^{fresh}$ ). La variable binaria  $Y_{A_s}^{fresh}$  se utiliza para modelar la variable

booleana  $Y_{A_s}^{fresh}$ , por lo tanto,  $y_{A_s}^{fresh}$  es igual a uno cuando  $Y_{A_s}^{fresh}$  es verdadera y cero cuando  $Y_{A_s}^{fresh}$  es falsa.

Al tener una representación lógica de la disyunción, se necesita un algoritmo para poder resolverla, se requiere reformularla a través de ecuaciones algebraicas y esto se logra utilizando un convex hull [68]. La programación disyuntiva generalizada (GDP) es un modelo alternativo al MINLP para representar problemas de optimización discretos/continuos mediante el uso de disyunciones y restricciones con proposiciones lógicas. Se utiliza una relajación no lineal que se basa en el uso de convex hull de cada una de las disyunciones que involucran desigualdades no lineales. El modelo GDP permite una combinación de ecuaciones algebraicas y lógicas, lo que facilita la representación de decisiones discretas. Las ecuaciones que describen el convex hull se utilizan como base para desarrollar una relajación no lineal convexa del problema del GDP. En general, el modelo del GDP incluye variables booleanas, disyunciones y proposiciones lógicas.

La ecuación (171) se puede modelar algebraicamente como se muestra a continuación.

Solo se puede seleccionar una opción de la disyunción, y esta se modela mediante la elección de una de las variables binarias.

$$y_{A_s}^{fresh} + y_{B_s}^{fresh} + y_{C_s}^{fresh} = 1, \forall s \quad (172)$$

Las variables continuas se desagregan mediante las siguientes relaciones (se incorpora una variable continua y positiva por cada término de la disyunción).

$$F_{t,s}^{fresh} = F_{t,s}^{fresh1} + F_{t,s}^{fresh2} + F_{t,s}^{fresh3}, \forall t, \forall s \quad (173)$$

$$R_{t,s}^{fresh} = R_{t,s}^{fresh1} + R_{t,s}^{fresh2} + R_{t,s}^{fresh3}, \forall t, \forall s \quad (174)$$

$$P_{t,s}^{fresh} = P_{t,s}^{fresh1} + P_{t,s}^{fresh2} + P_{t,s}^{fresh3}, \forall t, \forall s \quad (175)$$

Las ecuaciones de la primera parte de la disyunción se establecen en función de sus correspondientes variables binarias y continuas desagregadas

$$F_{t,s}^{fresh1} = F_{t,s}^{freshp} \cdot y_{A_s}^{fresh}, \forall t, \forall s \quad (176)$$

$$F_{t,s}^{fresh1} \leq F_{t,s}^{freshmax} \cdot y_{A_s}^{fresh}, \forall t, \forall s \quad (177)$$

$$R_{t,s}^{fresh1} = E_{t,s}^{fresh} \cdot u^f \cdot \frac{F_{t,s}^{freshp}}{F_{t,s}^{fresho}} \cdot y_{A_s}^{fresh}, \forall t, \forall s \quad (178)$$

$$R_{t,s}^{fresh1} \leq R_{t,s}^{freshmax} \cdot y_{A_s}^{fresh}, \forall t, \forall s \quad (179)$$

$$P_{t,s}^{fresh1} = 0, \forall t, \forall s \quad (180)$$

Del mismo modo para la segunda parte de la disyunción. Donde se usa delta para resolver el modelo matemático. Debido a que solo se pueden agregar restricciones "mayor o igual que" o "menor o igual que" dentro de la formulación matemática, el delta ayuda a modelar el caso estricto en el que es mayor que. El valor de delta es 0.0001.

$$F_{t,s}^{fresh2} \geq (F_{t,s}^{freshp} - \delta) \cdot y_{B_s}^{fresh}, \forall t, \forall s \quad (181)$$

$$F_{t,s}^{fresh2} \leq F_{t,s}^{freshmax} \cdot y_{B_s}^{fresh}, \forall t, \forall s \quad (182)$$

$$R_{t,s}^{fresh2} = 0, \forall t, \forall s \quad (183)$$

$$P_{t,s}^{fresh2} = E_{t,s}^{fresh} \cdot x^f \cdot \frac{F_{t,s}^{fresh2} - F_{t,s}^{freshp} \cdot y_{B_s}^{fresh}}{2 \cdot F_{t,s}^{fresho}}, \forall t, \forall s \quad (184)$$

$$P_{t,s}^{fresh2} \leq P_{t,s}^{freshmax} \cdot y_{B_s}^{fresh}, \forall t, \forall s \quad (185)$$

Para la última parte de la disyunción.

$$F_{t,s}^{fresh3} \leq (F_{t,s}^{freshp} + \delta) \cdot y_{C_s}^{fresh}, \forall t, \forall s \quad (186)$$

$$F_{t,s}^{fresh3} \leq F_{t,s}^{freshmax} \cdot y_{C_s}^{fresh}, \forall t, \forall s \quad (187)$$

$$R_{t,s}^{fresh3} = E_{t,s}^{fresh} \cdot v^f \cdot \frac{3 \cdot F_{t,s}^{fresh3} + F_{t,s}^{freshp} \cdot y_{C_s}^{fresh}}{2 \cdot F_{t,s}^{fresho}}, \forall t, \forall s \quad (188)$$

$$R_{t,s}^{fresh3} \leq R_{t,s}^{freshmax} \cdot y_{C_s}^{fresh}, \forall t, \forall s \quad (189)$$

$$P_{t,s}^{fresh3} = 0, \forall t, \forall s \quad (190)$$

Se considera un presupuesto máximo para los incentivos, el límite debe existir porque ese monto no puede ser infinito. En el problema descrito se utilizan las siguientes variables para restringir el incentivo o castigo máximo que se puede obtener para el caso del consumo de agua dulce:  $R_{t,s}^{freshmax}$ ,  $P_{t,s}^{freshmax}$  y para el caso del agua tratada:  $R_{i,t,s}^{treatmax}$ ,  $P_{i,t,s}^{treatmax}$ . Estos valores se pueden cambiar según las políticas de cada lugar. Se establecen los valores propuestos para el caso de estudio para obtener soluciones y determinar el comportamiento del modelo matemático. Por otro lado, también se incluyen casos en los que no existe un límite máximo de incentivos para ver cómo mejoran los resultados. Es importante resaltar que el modelo es general y por ello se pueden modificar los valores de los parámetros considerados.

#### 5.2.4.3 Tratamiento

En cuanto a los tratamientos, se pretende estudiar el efecto de cada tratamiento sobre el sistema estudiado y se busca el promover los tratamientos para asegurar un mayor reúso, la reducción de agua dulce y evitar problemas de salud por la disposición final. Según el flujo obtenido al final de cada tratamiento, el productor es recompensado o castigado económicamente. Por lo tanto, se aplica la siguiente disyunción.

$$\left[ \begin{array}{l} Y_{A,i,s}^{treat} \\ F_{i,t,s}^{treat-out} = F_{i,t,s}^{treat-outp} \\ R_{i,t,s}^{treat} = E_{i,t,s}^{treat} \cdot u^t \cdot \frac{F_{i,t,s}^{treat-outp}}{F_{i,t,s}^{treat-outo}} \\ P_{i,t,s}^{treat} = 0 \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{B,i,s}^{treat} \\ F_{i,t,s}^{treat-out} > F_{i,t,s}^{treat-outp} \\ R_{i,t,s}^{treat} = E_{i,t,s}^{treat} \cdot x^t \cdot \frac{F_{i,t,s}^{treat-out} + F_{i,t,s}^{treat-outp}}{2 \cdot F_{i,t,s}^{treat-outo}} \\ P_{i,t,s}^{treat} = 0 \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} Y_{C,i,s}^{treat} \\ F_{i,t,s}^{treat-out} < F_{i,t,s}^{treat-outp} \\ R_{i,t,s}^{treat} = 0 \\ P_{i,t,s}^{treat} = E_{i,t,s}^{treat} \cdot v^t \cdot \frac{3 \cdot F_{i,t,s}^{treat-out} - F_{i,t,s}^{treat-outp}}{2 \cdot F_{i,t,s}^{treat-outo}} \end{array} \right], \forall i, \forall t, \forall s \quad (191)$$

#### 5.2.5 Matching law

La forma más simple de la matching law se presenta en la **ecuación 192**, donde B representa el comportamiento de cada programa 1 y 2. R es la recompensa otorgada y P es la penalización.

$$\frac{B_1}{B_1 + B_2} = \frac{(R_1 - P_1)}{(R_1 - P_1) + (R_2 - P_2)} \quad (192)$$

Al aplicar la matching law al uso de los diferentes tratamientos, se determina la preferencia por cada uno de ellos ya que está relacionada con los flujos económicos de incentivos y castigos otorgados.

$$\frac{B_{i,t,s}^{treat}}{\sum_i B_{i,t,s}^{treat}} = \frac{R_{i,t,s}^{treat} - P_{i,t,s}^{treat}}{\sum_i (R_{i,t,s}^{treat} - P_{i,t,s}^{treat})}, \forall i, \forall t, \forall s \quad (193)$$

Usando las ecuaciones (195) y (196), la ecuación (193) se puede reescribir como se muestra a continuación.

$$\frac{B_{i,t,s}^{treat}}{B_{t,s}^{total}} = \frac{R_{i,t,s}^{treat} - P_{i,t,s}^{treat}}{I_{t,s}^{total}}, \forall i, \forall t, \forall s \quad (194)$$

$$B_{t,s}^{total} = \sum_i B_{i,t,s}^{treat}, \forall t, \forall s \quad (195)$$

$$I_{t,s}^{total} = \sum_i (R_{i,t,s}^{treat} - P_{i,t,s}^{treat}), \forall t, \forall s \quad (196)$$

#### 5.2.5.1 Comportamiento del tratamiento esperado ( $EB_{i,t}^{treat}$ )

El concepto de “comportamiento de tratamiento” se refiere a la preferencia por cada tipo de tratamiento, y la ocurrencia de elección. El “comportamiento de tratamiento esperado” implica la probabilidad de que ocurra cada caso.

Considerando que  $B_{i,t,s}^{treat}$  es incierto, se espera que el perfil de comportamiento en términos de preferencia por cada tipo de tratamiento  $i$  varíe significativamente entre los escenarios. Dado que se obtiene un rendimiento de comportamiento diferente para cada escenario  $s$ , la distribución de comportamiento resultante se determina de la siguiente manera.

$$EB_{i,t}^{treat} = \sum_s prob_s \cdot B_{i,t,s}^{treat}, \forall i, \forall t \quad (197)$$

Donde  $prob_s$  es la probabilidad del escenario  $s$  y  $B_{i,t,s}^{treat}$  es el comportamiento asociado al mismo escenario  $s$ .

## 5.2.6 Función objetivo

### 5.2.6.1 Costo total anual esperado (ETAC)

El principal objetivo es minimizar el costo total anual esperado (ETAC), que se calcula mediante la distribución de costos resultante de todos los escenarios considerados.

$$\text{Min } ETAC = \sum_s prob_s TAC_s \quad (198)$$

donde  $prob_s$  es la probabilidad del escenario  $s$  y  $TAC_s$  es el costo total anual asociado al mismo escenario  $s$ , el cual está compuesto por el costo total de operación (TOCs), el costo de capital anualizado (ACC), el incentivo económico total y la penalización relacionada con el consumo de agua dulce ( $I_s^{fresh}$ ) y el total de incentivos otorgados para el uso del tratamiento de agua de retorno ( $I_s^{treat}$ ).

$$TAC_s = TOC_s + ACC + I_s^{fresh} + I_s^{treat}, \forall s \quad (199)$$

Los costos operativos cambian según el escenario, mientras que los costos de capital no dependen del escenario. Los costos de operación ( $TOC_s$ ) incluyen el costo del agua dulce ( $UC^{fresh}$ ), los costos de operación de las unidades de tratamiento ( $UOC_i^{treat}$ ) y los costos de transporte (UTC). En general, el modelo propuesto puede considerar la economía de escala; sin embargo, para resolver fácilmente el modelo propuesto, en el caso de estudio abordado no se consideró la economía de escala.

$$TOC_s = H^{time} \cdot \left[ UC^{fresh} \cdot \sum_t F_{t,s}^{fresh} + \sum_i \sum_t UOC_i^{treat} \cdot F_{i,t,s}^{treat\_in} + \sum_n \sum_t UTC_n^{fresh} \cdot ff_{n,t,s}^{fresh} + \right. \\ \left. \sum_n \sum_i \sum_t UTC_{n,i}^{used} \cdot ff_{n,i,t,s}^{well} + \sum_i \sum_j \sum_t UTC_{i,j}^{treat\_sto} \cdot ff_{i,j,t,s}^{treat\_sto} + \right. \\ \left. \sum_j \sum_n \sum_t UTC_{j,n}^{sto\_well} \cdot ff_{j,n,t,s}^{storage} + \sum_i \sum_d \sum_t UTC_{i,d}^{treat\_dis} \cdot ff_{i,d,t,s}^{treat\_dis} \right], \forall s \quad (200)$$

Asimismo, el costo de capital corresponde a la adquisición de equipos asociados a las tecnologías de tratamiento, unidades de almacenamiento, así como a la construcción de las disposiciones finales. Donde “ $k_F$ ” es un factor de anualidad utilizado para calcular el valor presente de los pagos de anualidades futuras, sus unidades son  $\text{año}^{-1}$ . El costo de capital (ACC) se anualiza por el factor “ $k_F$ ”. Así, el costo de capital anualizado incluye costos fijos (FC) y costos variables (VC).

$$ACC = k_F \cdot \left[ \begin{aligned} &\sum_i (FC^{\text{treat}} \cdot y_i^{\text{treat}} + VC^{\text{treat}} \cdot F_i^{\text{treat\_cap}}) + \\ &\sum_j (FC^{\text{storage}} \cdot y_j^{\text{storage}} + VC^{\text{storage}} \cdot V_j^{\text{storage\_cap}}) + \\ &\sum_d (FC^{\text{waste}} \cdot y_d^{\text{waste}} + VC^{\text{waste}} \cdot V_d^{\text{waste\_cap}}) \end{aligned} \right] \quad (201)$$

Según el esquema de incentivos económicos, se trata de un “incentivo base” que representa el 10% del costo operativo tanto de agua dulce como de tratamiento. A partir de ello se establecen los objetivos a cumplir y se determina si se obtiene un incentivo económico o un castigo. A su vez, está relacionado con el flujo de agua dulce que se consume y el flujo de agua que se trata según las restricciones que se incluyen en las disyunciones. Finalmente, el cálculo se realiza con las ecuaciones (57) y (58) donde estos valores son los considerados en el TAC. Las sanciones se consideran un gasto, lo que significa que afecta positivamente al TAC; por otro lado, las recompensas afectan negativamente al TAC. Los incentivos totales otorgados para agua dulce ( $I_s^{\text{fresh}}$ ) y tratamiento ( $I_s^{\text{treat}}$ ) se calculan multiplicando su flujo correspondiente y la diferencia entre penalizaciones y recompensas según el caso.

$$I_s^{\text{fresh}} = H^{\text{time}} \cdot \sum_t F_{t,s}^{\text{fresh}} \cdot (P_{t,s}^{\text{fresh}} - R_{t,s}^{\text{fresh}}), \forall s \quad (202)$$

$$I_s^{\text{treat}} = H^{\text{time}} \cdot \sum_i \sum_t F_{i,t,s}^{\text{treat\_out}} \cdot (P_{i,t,s}^{\text{treat}} - R_{i,t,s}^{\text{treat}}), \forall s \quad (203)$$

### 5.3 Caso de estudio

El modelo matemático desarrollado se aplica a los campos de shale más importantes de Estados Unidos (Marcellus y Barnett). La producción anual de gas en el yacimiento de gas shale de Marcellus representa aproximadamente el 25.3 % de la producción total de gas natural seco de EUA y el 32.2 % de la producción total de gas shale seco de EUA. en febrero

de 2020 [88]. Aproximadamente 1.25 billones de metros cúbicos de gas (3.78%) puede recuperarse técnicamente del yacimiento de Barnett [89]. La información técnica proporcionada en este estudio de caso se basa en Slutz et al. [84]. Los valores utilizados tanto para el agua necesaria para perforar como para el agua que regresa a la superficie como agua de retorno son tomados de trabajos publicados previamente como se muestra en la **Tabla 5.1**. Se establecieron 15,000 m<sup>3</sup> de agua para completar cada pozo, el valor está entre los rangos informados. De la porción del agua inyectada, el 25% regresa como agua de retorno durante las siguientes 3 semanas. Los valores seleccionados para las desviaciones estándar (10 y 20%) son adecuados para modelar las incertidumbres comunes en estudio. Los parámetros inciertos son la cantidad de agua requerida para perforar cada pozo y el porcentaje de agua de retorno, sin embargo, algunas variables dependen de estos parámetros. A lo largo del modelo, el subíndice *s* implica que la variable se ve afectada por esa incertidumbre. El modelo propuesto es general y se puede utilizar en diferentes casos de estudio haciendo los ajustes adecuados a los parámetros

**Tabla 5.1.** Datos en relación al agua requerida para perforación y al agua de retorno

| Referencia           | Agua para completar cada pozo (m <sup>3</sup> ) | Agua de retorno (%) |
|----------------------|-------------------------------------------------|---------------------|
| Hayes [90]           | 11,356 - 15,142                                 | 25                  |
| Slutz et al. [84]    | 12,700 - 19,000                                 | 10 - 40             |
| Vidic et al. [91]    | 7,570 - 26,500                                  | 9 - 53              |
| Chen and Carter [92] | 1,000 - 30,000                                  | 30 - 50             |

### 5.3.1 Tratamientos

El agua de retorno y el agua producida son difíciles de tratar debido a su compleja composición fisicoquímica, que puede variar durante la vida útil del pozo de gas shale. Los componentes de especial interés en el agua producida incluyen compuestos orgánicos disueltos y suspendidos, medidos como aceite y grasa totales; sólidos en suspensión, como sólidos de formación, productos de corrosión e incrustaciones, y bacterias; productos químicos de producción, que pueden contener agentes reductores de fricción, biocidas e

inhibidores de corrosión del fluido de fracturación hidráulico; material radiactivo natural, específicamente isótopos de bario y radio; y sólidos disueltos totales (TDS), incluida la dureza y los metales pesados [93].

Los tratamientos son (pero no se limitan a) eliminación de sólidos suspendidos [84], compresión mecánica de vapor [93], ósmosis directa [93], sólidos disueltos totales [84], destilación por membrana [93]. Cabe señalar que el modelo matemático puede considerar varios tratamientos con diferentes eficiencias realizando los cambios pertinentes en los parámetros. Las tecnologías utilizadas para el tratamiento del agua de retorno cumplen con los límites permisibles de contaminantes para que pueda ser reutilizada. Sin embargo, debido al alto impacto de los contaminantes, esta agua de retorno no tiene ningún otro uso adicional, se busca reutilizarla en la medida de lo posible para no generar problemas adicionales de contaminación. Hay informes donde se establecen los límites máximos permisibles [68, 69]. En este trabajo se supone que al utilizar los tratamientos se cumplen estos valores. Sin embargo, es posible modificar el modelo matemático agregando restricciones que consideren los límites, asegurando así que estos valores se cumplan. La eficiencia de la tecnología de tratamiento puede variar de 0.7 a 0.9 [84, 93, 94]. Las eficiencias seleccionadas se muestran en la **Tabla 5.2**.

**Tabla 5.2.** Eficiencias para las unidades de tratamiento consideradas

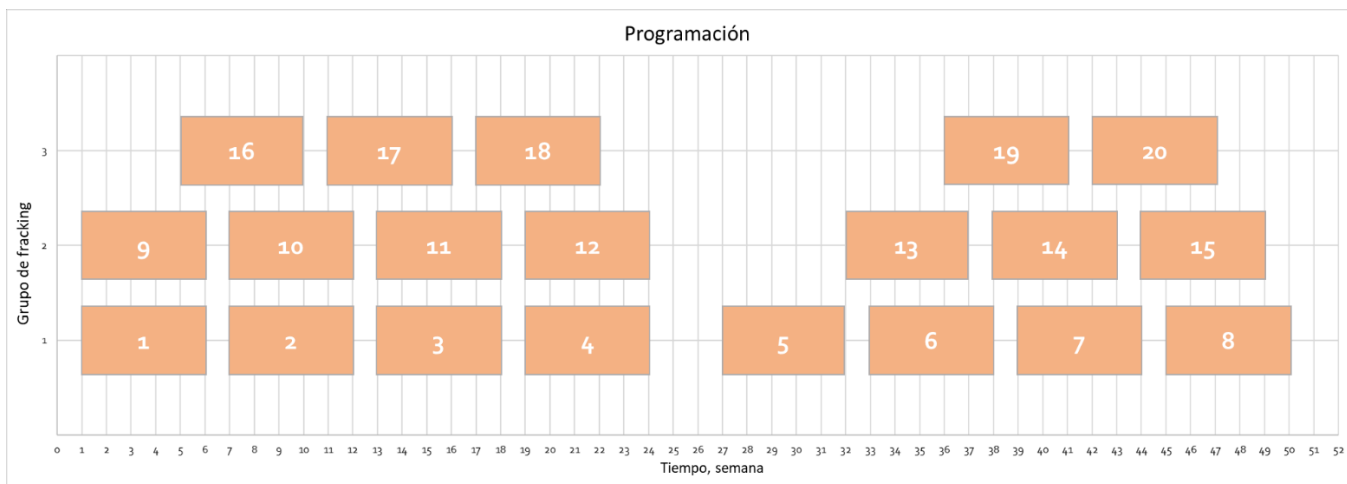
| Tratamiento | Eficiencia |
|-------------|------------|
| 1           | 0.900      |
| 2           | 0.945      |
| 3           | 0.810      |
| 4           | 0.963      |
| 5           | 0.765      |

### 5.3.2 Casos considerados

Se generaron los siguientes casos: 70, 30 y 10 escenarios con la misma probabilidad de ocurrencia a través del muestreo de Monte Carlo, que sirvieron para construir el modelo de

optimización multiescenario. Si aumenta el número de escenarios, también aumenta el tiempo de cálculo, lo que hace muy difícil obtener soluciones factibles debido a las capacidades de cálculo. Se consideraron veinte pozos a ser completados por tres equipos de fracturación de acuerdo con la **Figura 5.3**. El horizonte de tiempo es un año y cada periodo consta de una semana. La preparación del sitio toma 3 semanas. La perforación de cada pozo toma alrededor de 4 a 6 semanas. La fase de finalización toma aproximadamente de 1 a 3 meses para perforar y fracturar, dependiendo de la cuenca y la formación geológica. Una vez finalizada la fase para completar cada pozo, una parte del agua regresa a la superficie como agua de retorno en las primeras 2 a 3 semanas. Se necesita una semana para el tiempo de transición que implica pasar de un pozo al siguiente. La **Figura 5.3** muestra un período en el que la escasez de agua conduce a operaciones de fracturación bajas (semana 23 a semana 35).

El costo del agua dulce es de 2 \$/m<sup>3</sup>. Los costos de operación, así como los costos de transporte de cada tratamiento, se muestran en la **Tabla 5.3**. El tipo de transporte considerado es de bombeo o carro tanque, según el caso. Cada unidad de tratamiento debe generar corrientes de agua limpia disponibles para ser reutilizadas o dispuestas en condiciones ambientales. El tipo de disposición es pozos típicos de Clase II. Los costos de transporte de las diferentes rutas se pueden ver en la **Tabla 5.4**. El factor de conversión  $H^{\text{time}}$  es de 7 días por semana y el factor de anualización  $k_F$  es 0.1 y<sup>-1</sup>.



**Figura 5.3.** Programa de la fase de terminación en cada pozo para el caso de estudio abordado

**Tabla 5.3.** Costos relacionados con el tratamiento

| <b>Tratamiento</b>                               | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> |
|--------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Costos de operación (\$/m<sup>3</sup>)</b>    | 12.5     | 13.125   | 11.25    | 13.375   | 10.625   |
| <b>Costo de transporte (\$/m<sup>3</sup>)</b>    |          |          |          |          |          |
| <i>Desde tratamiento hasta almacenamiento</i>    | 1.41     | 1.4805   | 1.269    | 1.5087   | 1.1985   |
| <i>Desde tratamiento hasta disposición final</i> | 8.3      | 8.715    | 7.47     | 8.881    | 7.055    |

**Tabla 5.4.** Costos de transporte de diferentes rutas.

| <b>Costos de transporte, \$/m<sup>3</sup></b>      |      |
|----------------------------------------------------|------|
| <i>De la fuente fresca a pozos 1 - 8</i>           | 4    |
| <i>De la fuente fresca a pozos 9 - 15</i>          | 7    |
| <i>De la fuente fresca a pozos 16 - 20</i>         | 12   |
| <i>De los pozos 1 - 8 a la red de intercepto</i>   | 0.39 |
| <i>De los pozos 9 - 15 a la red de intercepto</i>  | 0.72 |
| <i>De los pozos 16 - 20 a la red de intercepto</i> | 0.94 |
| <i>Del almacenamiento a los pozos 1 - 8</i>        | 0.98 |
| <i>Del almacenamiento a los pozos 9 - 15</i>       | 1.23 |
| <i>Del almacenamiento a los pozos 16 - 20</i>      | 1.65 |

Para el esquema de incentivos, los parámetros que se deben establecer en el caso del consumo de agua dulce son los siguientes:

- $F_{t,s}^{\text{fresho}}$  Flujo de agua dulce objetivo establecida por el gobierno, donde se pretende usar solo un 25 % de agua dulce.

- $F_{t,s}^{\text{fresh}}$  Flujo de agua dulce propuesta por los productores, donde se utiliza un 70% de agua dulce. Estos valores se basan en  $\sum_n F_{n,t,s}^{\text{well\_in}}$ , porque es la cantidad de agua que llega a cada pozo.
- $E_{t,s}^{\text{fresh}}$  Representa el incentivo base que corresponde al 10% del costo de operación.

En el caso de los tratamientos, los parámetros considerados son los siguientes:

- $F_{i,t,s}^{\text{treat-outo}}$  Flujo de agua de retorno a tartar objetivo fijado por el gobierno ( $n^o = 90\%$ ).
- $F_{i,t,s}^{\text{treat-outp}}$  Flujo de agua de retorno propuesto a ser tratado fijado por los productores ( $n^p = 80\%$ ).

Los valores son calculados a partir de  $\sum_n ff_{n,i,t,s}^{\text{well}}$  como se muestra a continuación.

$$F_{i,t,s}^{\text{treat-outo}} = n^o \cdot \sum_n ff_{n,i,t,s}^{\text{well}}, \forall i, \forall t, \forall s \quad (202)$$

$$F_{i,t,s}^{\text{treat-outp}} = n^p \cdot \sum_n ff_{n,i,t,s}^{\text{well}}, \forall i, \forall t, \forall s \quad (203)$$

- $E_{i,t,s}^{\text{treat}}$  Corresponde al incentive base que se calcula como el 10% del costo de operación de cada tratamiento
- Los parámetros  $u$ ,  $v$  y  $x$  para ambos casos es 1.

## 5.4 Resultados

El modelo de optimización propuesto es un problema de programación mixto-entero no lineal. Para el caso de estudio abordado, las variables continuas, elementos distintos de cero y restricciones para los casos considerados se muestran en la **Tabla 5.5**. Se codificó en el software GAMS [76] y se resolvió en una computadora con un AMD Ryzen 7 4800H a 2.90 GHz y 16 GB de RAM. El tiempo promedio de CPU para los casos propuestos se presenta en la **Tabla 5.6**, utilizando el resolutor SBB [77] para el problema de programación mixto-

entero no lineal junto con CPLEX [78] para la parte de programación mixta-entero lineal y el CONOPT [79] para la parte de programación no lineal. El agua de perforación y el agua de retorno son parámetros inciertos que afectan las variables relacionadas en el modelo. Primero se identifican los parámetros inciertos, luego se asume una desviación estándar para generar valores aleatorios y obtener un conjunto de parámetros que representan esa incertidumbre. Se probó la solución del modelo matemático proponiendo diferentes casos con 70, 30 y 10 escenarios inciertos. Al correr el modelo se pudo determinar que a mayor número de escenarios, mayor es el consumo computacional y más difícil es llegar a una solución. Se decidió seleccionar 10 escenarios para determinar el comportamiento del modelo. Sin embargo, para trabajos futuros, será interesante incluir más escenarios para determinar si la restricción a solo 10 escenarios afecta en gran medida la solución final.

**Tabla 5.5.** Estadísticas del modelo para cada caso

| <b>Número de escenarios</b>            | <b>70</b> | <b>30</b> | <b>10</b> | <b>10</b><br>Sin<br>restricciones<br>de incentivos | <b>10</b><br>No<br>incentivos |
|----------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Variables continuas</b>             | 1,421,215 | 609,095   | 203,035   | 203,035                                            | 174,264                       |
| <b>Elementos distintos<br/>de cero</b> | 5,335,842 | 2,289,762 | 766,722   | 748,002                                            | 618,452                       |
| <b>Restricciones</b>                   | 830,652   | 356,292   | 119,112   | 109,752                                            | 61,882                        |

**Tabla 5.6.** Tiempo promedio de CPU para cada caso

| <b>Número de escenarios</b> | <b>Restricción de incentivos</b> | <b>Tipo de incentivo</b> | <b>Tiempo de consumo (s)</b> |
|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| <b>70</b>                   | Sí                               | Base                     | 16,130.641                   |
| <b>30</b>                   | Sí                               | Base                     | 31,290.078                   |
| <b>10</b>                   | Sí                               | Base                     | 5,379.528                    |

|    |    |        |            |
|----|----|--------|------------|
| 10 | Sí | Mucho  | 136.813    |
| 10 | Sí | Poco   | Infactible |
| 10 | Sí | Mezcla | 27.922     |
| 10 | No | Base   | 427.937    |
| 10 | No | Mucho  | 1,108.937  |
| 10 | No | Poco   | 1,476.125  |
| 10 | No | Mezcla | 406.141    |
| 10 | Sí | No     | 1.375      |

Los resultados muestran que cuando se utilizan incentivos, el TAC esperado es de  $3.0499 \times 10^6$  \$/año, mientras que el peor caso económico es de  $3.1949 \times 10^6$  \$/año. El consumo total esperado de agua dulce es  $0.24633 \times 10^6$  m<sup>3</sup> y el peor caso de consumo de agua es  $0.25779 \times 10^6$  m<sup>3</sup>. Se hace una comparación entre no usar incentivos y usar incentivos para 10 escenarios (Tabla 5.7). El costo total anual esperado (ETAC) se puede mejorar en un 0.13% y los requisitos totales de agua esperados (ETWR) se pueden mejorar en un 0.04%. Como se puede observar, los cambios no son significativos en los escenarios considerados, esa es una de las principales razones por las que se decidió crear diferentes casos donde se varíen los incentivos para determinar su efecto en los resultados.

**Tabla 5.7.** Comparación entre no usar incentivos y usar incentivos para 10 escenarios

| Concepto                             | Sin incentivos | Usando incentivos |
|--------------------------------------|----------------|-------------------|
| ETAC( $\times 10^6$ \$/año)          | 3.0538         | 3.0499            |
| ETWR( $\times 10^6$ m <sup>3</sup> ) | 0.24642        | 0.24633           |

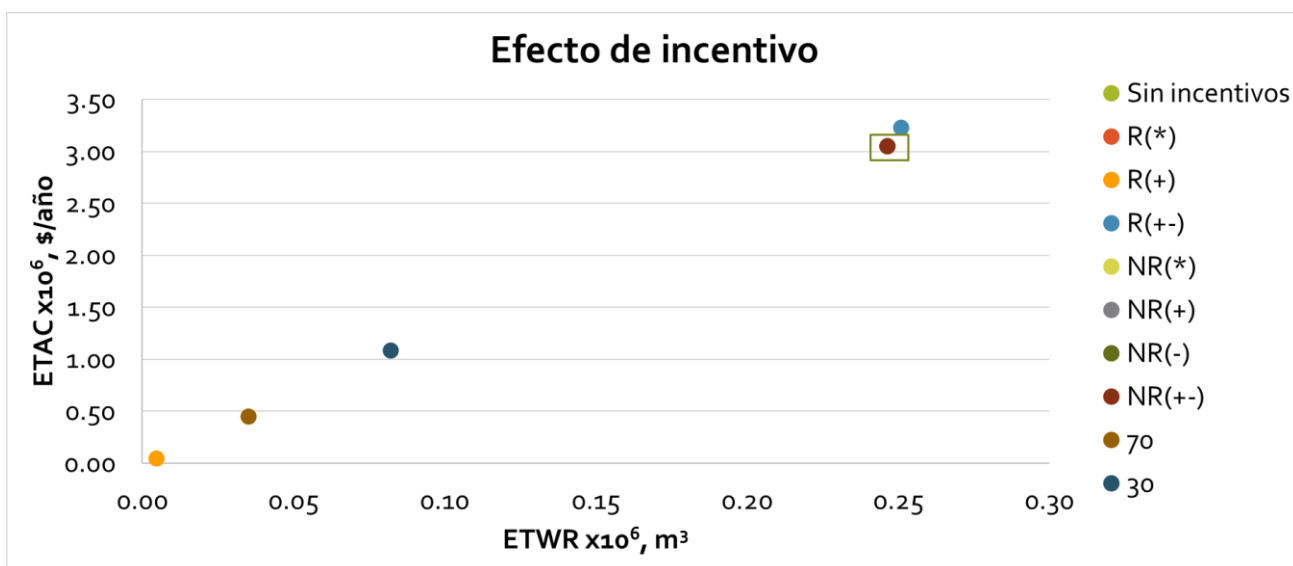
El modelo se probó en diferentes casos con un número diferente de escenarios. Destacando que a mayor número de escenarios, más robusto se vuelve el problema matemático, y también más complicado es llegar a una solución. Cada escenario tiene un valor diferente para los parámetros relacionados con el agua requerida para perforar y el agua de retorno. Además,

se estudia el efecto de usar incentivos máximos (R) y no usar incentivos máximos (NR). Los casos estudiados son los siguientes:

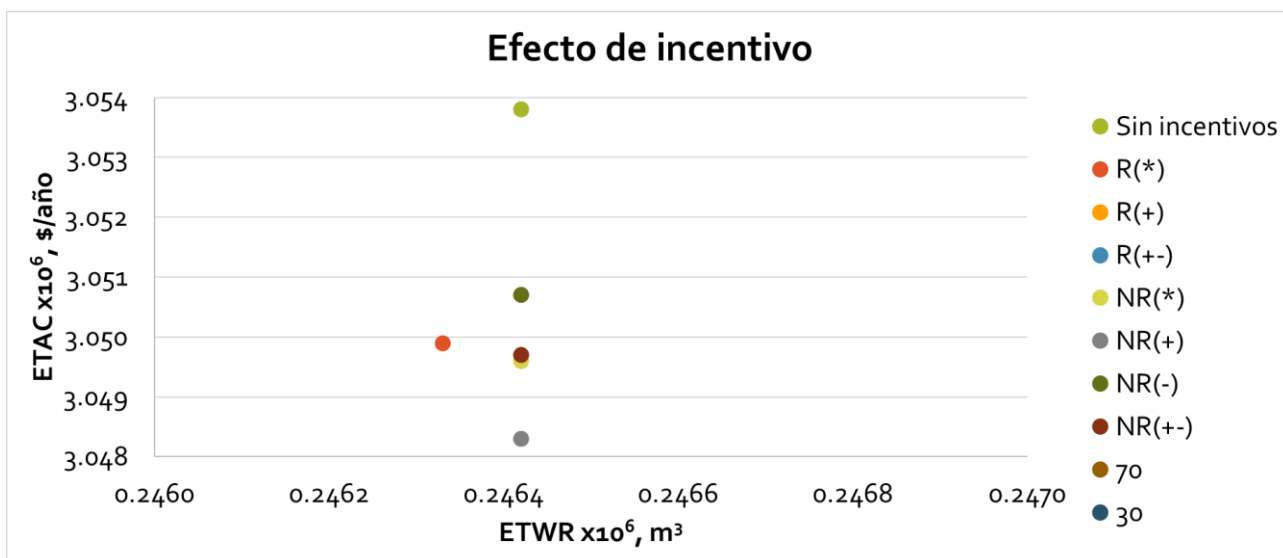
- 70 escenarios
- 30 escenarios
- Usando incentivos máximos (restricción, R)
  - 10 escenarios con incentivo base (\*)
  - 10 escenarios con mucho incentivo (+)
  - 10 escenarios con poco incentivo (-)
  - 10 escenarios con combinación de incentivos (+-)
- Sin usar incentivos máximos (no restricción, NR)
  - 10 escenarios con incentivo base (\*)
  - 10 escenarios con mucho incentivo (+)
  - 10 escenarios con poco incentivo (-)
  - 10 escenarios con combinación de incentivos (+-)

El efecto de la variación del incentivo en ETAC (costo total anual esperado) y ETWR (requerimientos de agua totales esperados) se muestra en la **Figura 5.4a**, algunos resultados son muy parecidos entre sí; el área del cuadro verde se amplía para obtener la **Figura 5.4b**. La **Tabla 5.8** muestra el valor de los incentivos considerados para cada caso. Cuando el valor de los incentivos es muy pequeño "R(-)" el problema se vuelve infactible ya que la cantidad no es suficiente para satisfacer las restricciones; para que sea factible, los límites máximos de incentivos no deben restringirse "NR(-)". Los valores de los incentivos base son la primera aproximación y se considera a partir de los costos operativos como el incentivo base para que los incentivos sean atractivos. Cabe señalar que estos parámetros se pueden modificar para determinar cómo se comportaría el modelo bajo nuevas condiciones, haciendo un trabajo mucho más interesante. Se podrían considerar incentivos más pequeños para el trabajo futuro. El ETAC más bajo y el ETWR más bajo están representados por el caso "R(+)", lo que significa que es un caso que usa restricción en los incentivos máximos y los incentivos pueden ser mayores que los otros casos (**Figura 5.4a**). No usar incentivos representa uno de los ETAC y ETWR más altos (**Figura 5.4b**). Sin embargo, el caso con mayor costo y consumo de agua es "R(+)", que representa un caso con restricción en los incentivos

máximos y los incentivos base utilizados son una mezcla de algunos casos con mucha cantidad de incentivos y otros casos con poco incentivo dentro de la misma corrida (**Tabla 5.8**). El caso “R(+)” mejora la ETAC en un 98.56% en comparación a no utilizar incentivos y la ETWR en un 98.09%.



**Figura 5.4a.** Efecto de los incentivos sobre los costos (ETAC) y el agua dulce (ETWR). “R” representa usar incentivos máximos, “NR” significa no usar incentivos máximos. (\*) incentivo base, (+) mucho incentivo, (-) poco incentivo y, (+-) mezcla de incentivos.

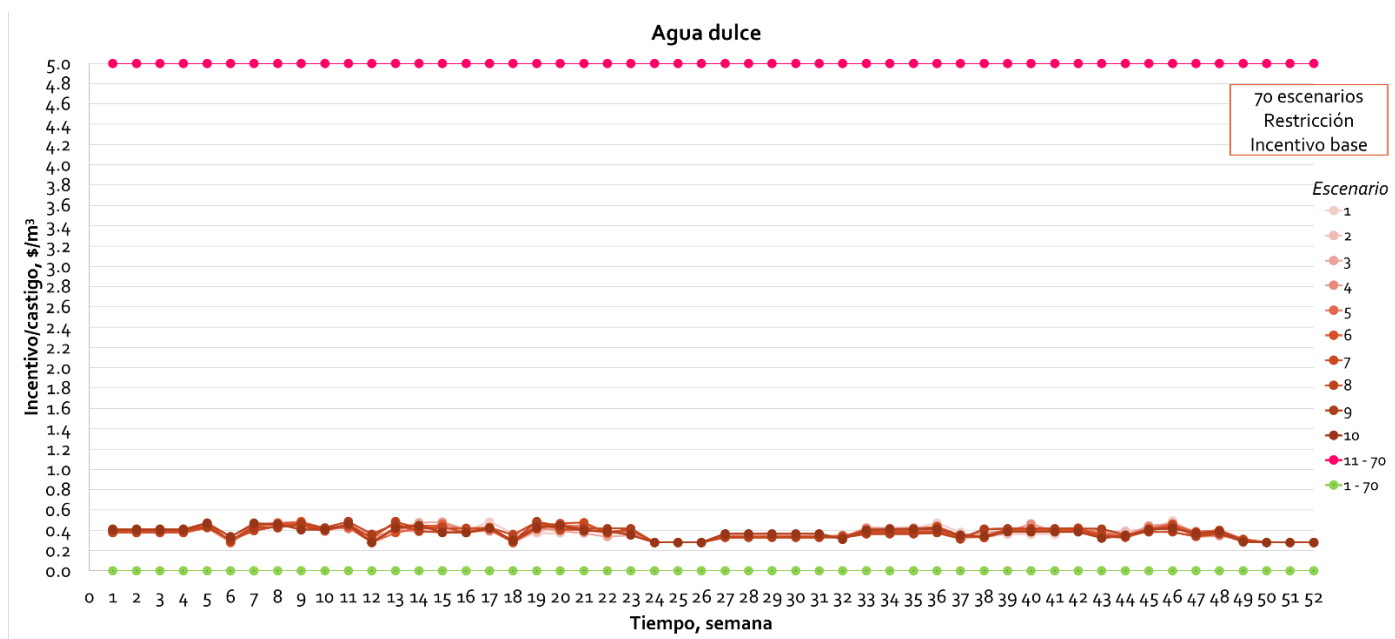


**Figure 5.4b.** Acercamiento de la figura 32a. Efecto de los incentivos sobre los costos (ETAC) y el agua dulce (ETWR). “R” representa usar incentivos máximos, “NR” significa no usar incentivos máximos. (\*) incentivo base, (+) mucho incentivo, (-) poco incentivo y, (+-) mezcla de incentivos.

**Tabla 5.8.** Incentivos considerados para cada caso

| Concepto           | Incentivo base<br>(BI) | Mucho                         | Poco                         | Mezcla   |
|--------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------|
| <b>Tratamiento</b> | $\$/m^3$               | $BI \cdot 10.75,$<br>$\$/m^3$ | $BI \cdot 0.01,$<br>$\$/m^3$ | $\$/m^3$ |
| 1                  | 1.2500                 | 13.4375                       | 0.0125                       | 1.2500   |
| 2                  | 1.3125                 | 14.1094                       | 0.0131                       | 14.1094  |
| 3                  | 1.1250                 | 12.0938                       | 0.0113                       | 0.0113   |
| 4                  | 1.3375                 | 14.3781                       | 0.0134                       | 1.3375   |
| 5                  | 1.0625                 | 11.4219                       | 0.0106                       | 11.4219  |
|                    |                        |                               |                              |          |
| <b>Agua dulce</b>  | 0.2000                 | 2.1500                        | 0.0020                       | 0.0020   |

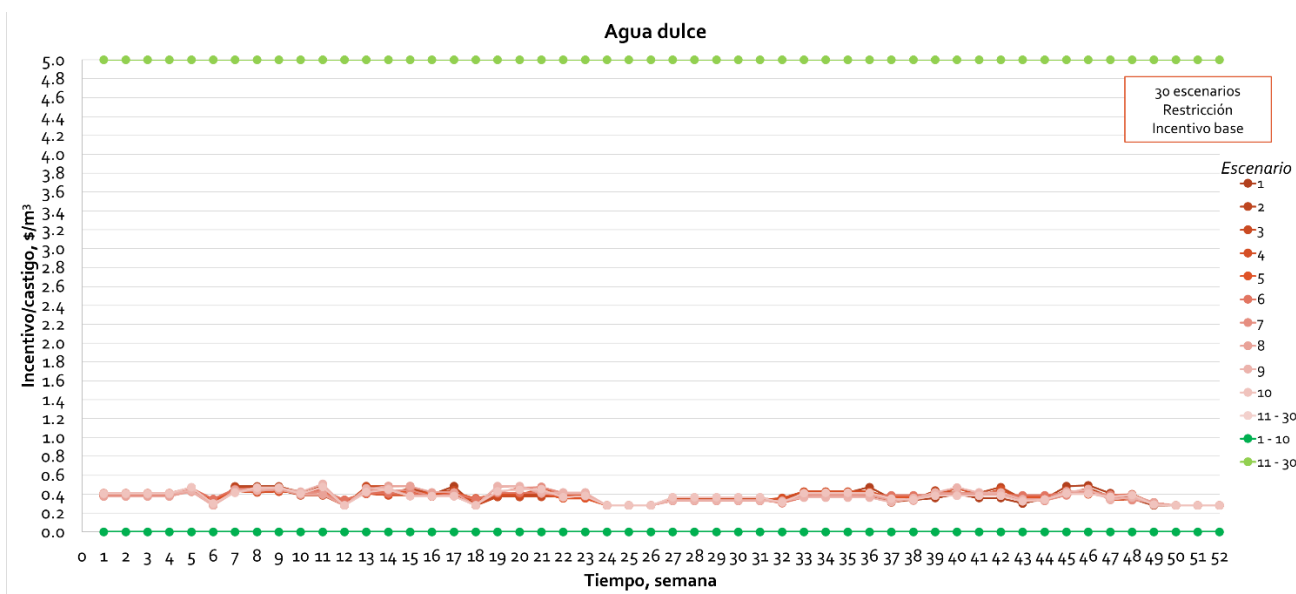
En cuanto a los incentivos otorgados por el consumo de agua dulce, cabe señalar que no existe sanción económica. Todos fueron incentivos económicos, asumiendo que el incentivo se obtuvo cumpliendo los objetivos propuestos por el gobierno o utilizando menos agua dulce que la establecida. Los incentivos obtenidos en cada momento considerado en los diferentes escenarios se pueden observar en la **Figura 5.5**. De los escenarios 1 al 10 los incentivos oscilan entre 0.2 y 0.5  $\$/\text{m}^3$ , de los escenarios 11 al 70 el incentivo obtenido es de 5  $\$/\text{m}^3$ . El tiempo total para la calendarización de la fase de terminación en cada pozo es de 50 semanas más dos semanas de agua de retorno. Los valores más bajos de recompensas por ejemplo semanas 6, 12, 18, etc. se deben al tiempo de transición para pasar de un pozo al siguiente (calendarización para la fase de finalización). Se considera un período de tiempo de escasez que corresponde a la semana 23 a la semana 35.



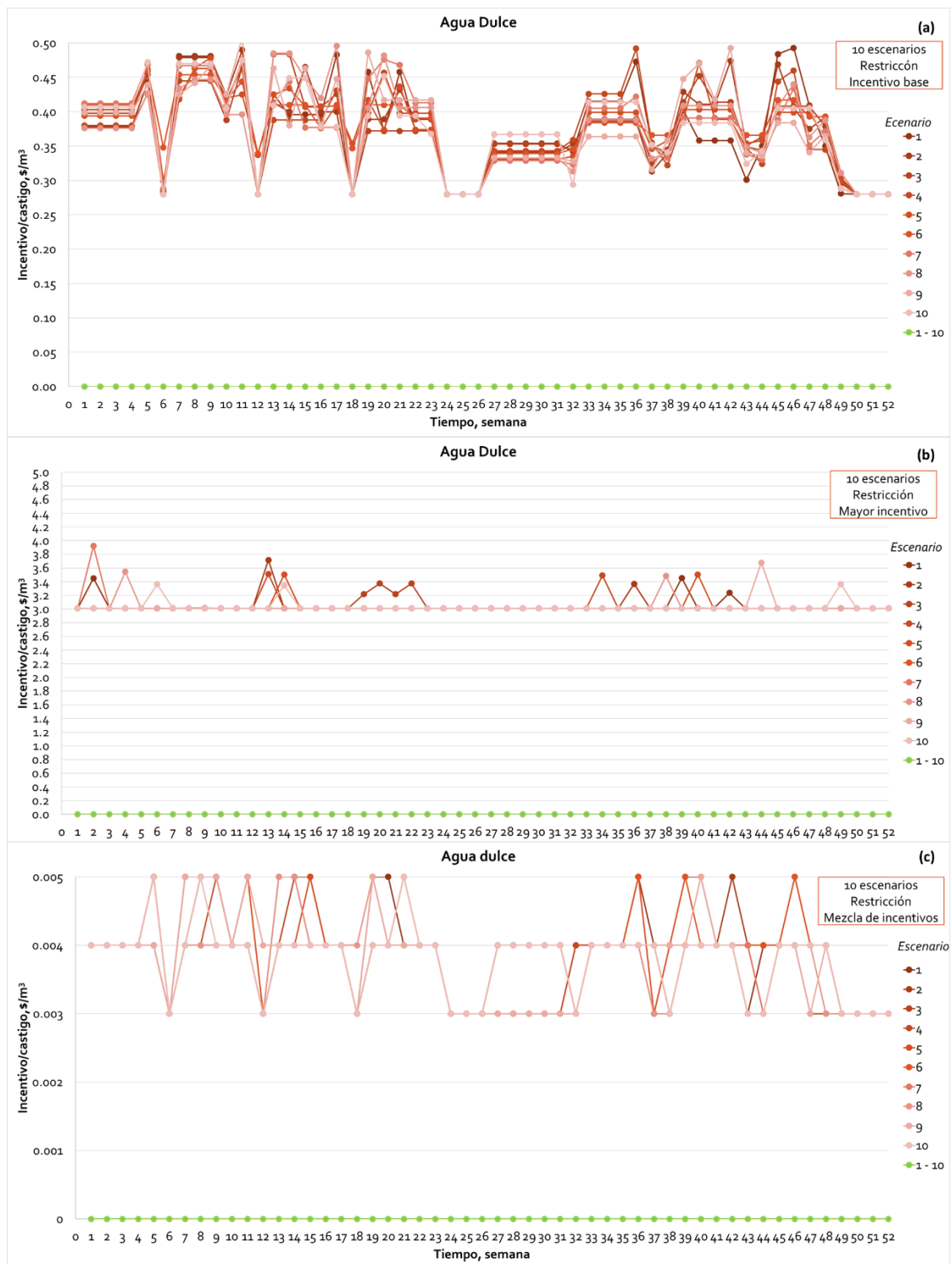
**Figura 5.5.** Incentivos obtenidos en el consumo de agua dulce en 70 escenarios mediante el uso de restricciones en incentivos máximos. Los puntos rojos representan recompensa y los puntos verdes representan penalización

Al utilizar 30 escenarios, del escenario 1 al 10 las recompensas obtenidas están entre 0.2 y 0.6  $\$/\text{m}^3$ , del escenario 11 al 30 las recompensas son cero. Por otro lado, una penalización

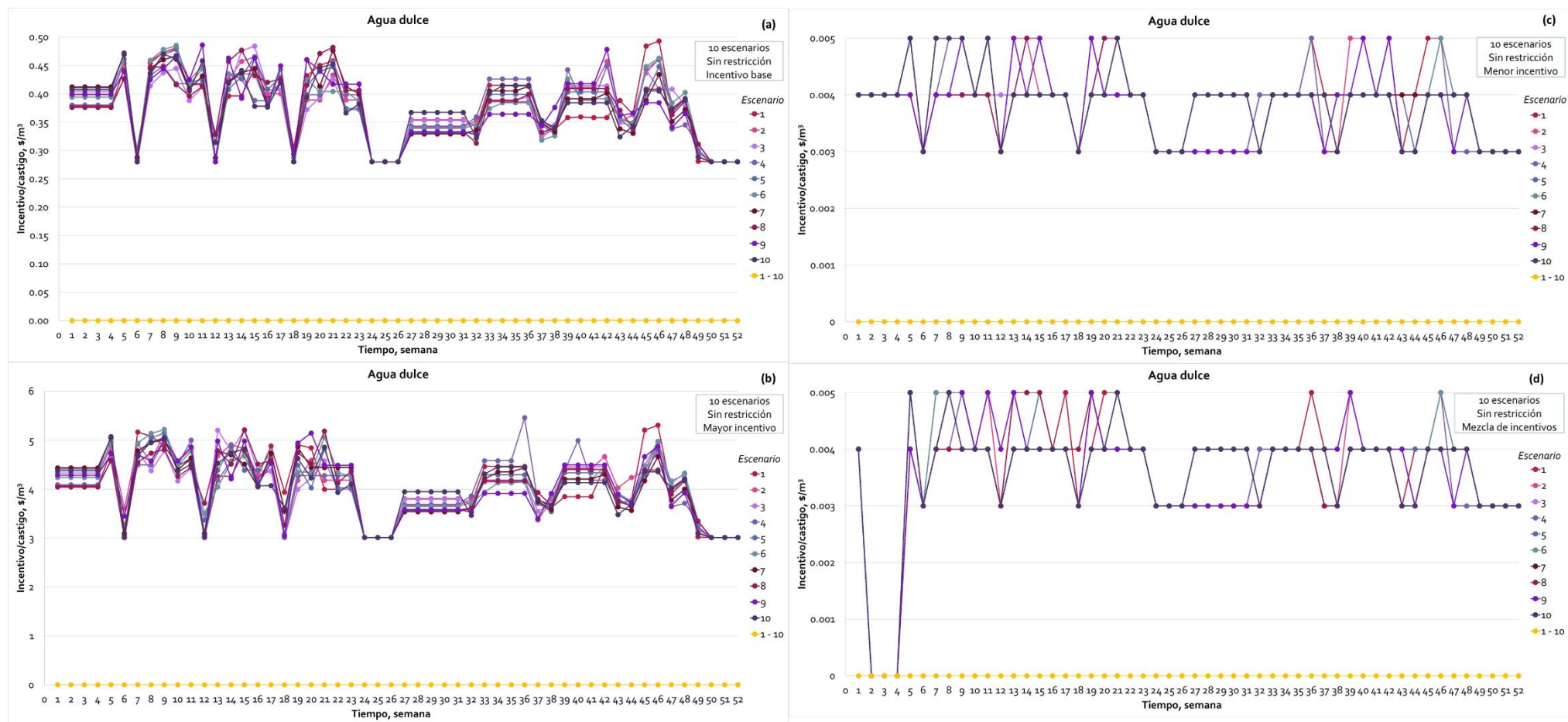
del 1 al 10 es cero y del 11 al 30 es de 5  $\$/\text{m}^3$  (**Figura 5.6**). El tiempo de cálculo consumido para los escenarios 70 y 30 es muy alto (**Tabla 5.6**). Para tener un mejor análisis de los resultados se decidió utilizar 10 escenarios con incentivos base, mucho incentivo, poco incentivo y una mezcla de incentivos (**Figura 5.7**), cabe resaltar que al dar poco incentivo el problema matemático es infactible. Asimismo, se estudiaron los casos en los que no existe restricción en los incentivos máximos otorgados (**Figura 5.8**) para determinar el impacto de los incentivos máximos en el caso de estudio. Se puede ver que el rango de valores sigue siendo el mismo que el de la **Figura 5.7** cuando se utiliza el incentivo base (**Figura 5.8a**) y la combinación de incentivos (**Figura 5.8d**). Cuando hay más incentivo al no dar restricción (**Figura 5.8b**), la cantidad otorgada es mayor y hay solución cuando los incentivos son menores (**Figura 5.8c**).



**Figura 5.6.** Incentivos obtenidos en el consumo de agua dulce con 30 escenarios usando restricción en incentivos máximos. Los puntos rojos representan recompensa y los puntos verdes representan penalización

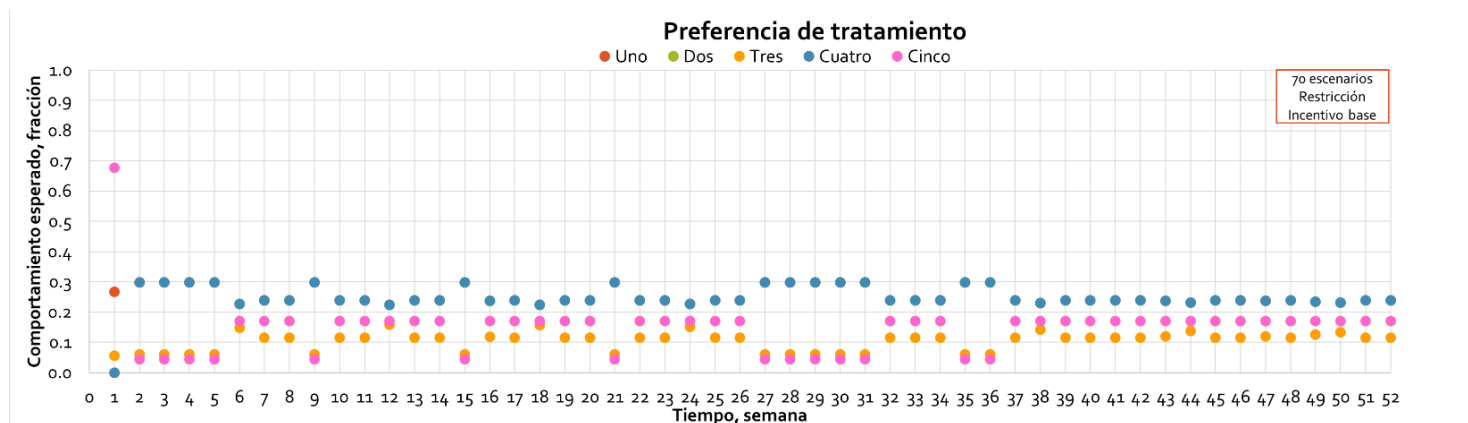


**Figura 5.7.** Incentivos obtenidos en el consumo de agua dulce con 10 escenarios usando restricción en incentivos máximos. Con incentivos base (a), mucho incentivo (b) y mezcla de incentivos (c). Los puntos rojos representan recompensa y los puntos verdes representan penalización

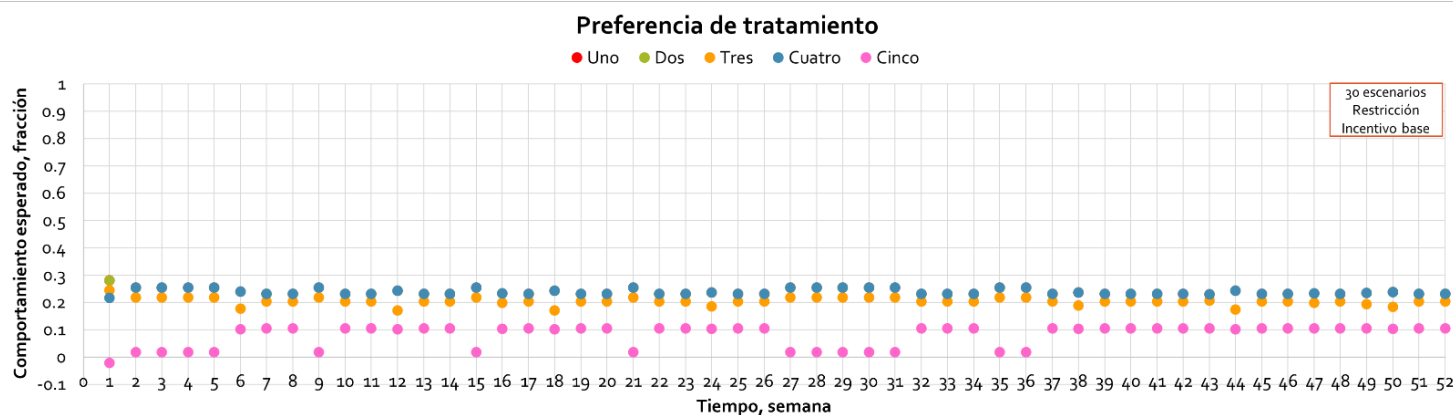


**Figura 5.8.** Incentivos obtenidos en el consumo de agua dulce con 10 escenarios al no usar restricción en incentivos máximos. Con incentivos base (a), mucho incentivo (b), poco incentivo (c) y mezcla de incentivos (d). Los puntos morados representan recompensa y los puntos naranjas representan penalización.

La **Figura 5.9** muestra el comportamiento relacionado con la preferencia por el tipo de tratamiento utilizando 70 escenarios. Se puede notar que el tratamiento 4 es el más preferido; sin embargo, es importante resaltar que los tratamientos 1, 2 y 4 son igualmente preferidos, aunque tienen costos diferentes (**Tabla 5.9**). El tratamiento 4 es más eficiente, asegura que elimina los contaminantes y representa una buena solución a pesar del alto costo. Al involucrar incentivos económicos se promueve el uso de tratamientos y a través de la Matching law se cuantifica la preferencia hacia diferentes tratamientos, demostrando que el tratamiento 4 es mayormente utilizado (**Figura 5.9**). Cuando se utilizaron 30 escenarios, el tratamiento cinco es el menos preferido (**Figura 5.10**), y la preferencia por el resto de los tratamientos es más cercana, la discrepancia entre las preferencias de tratamiento no es amplia en comparación con 70 escenarios.



**Figura 5.9.** Preferencia de los tratamientos para 70 escenarios

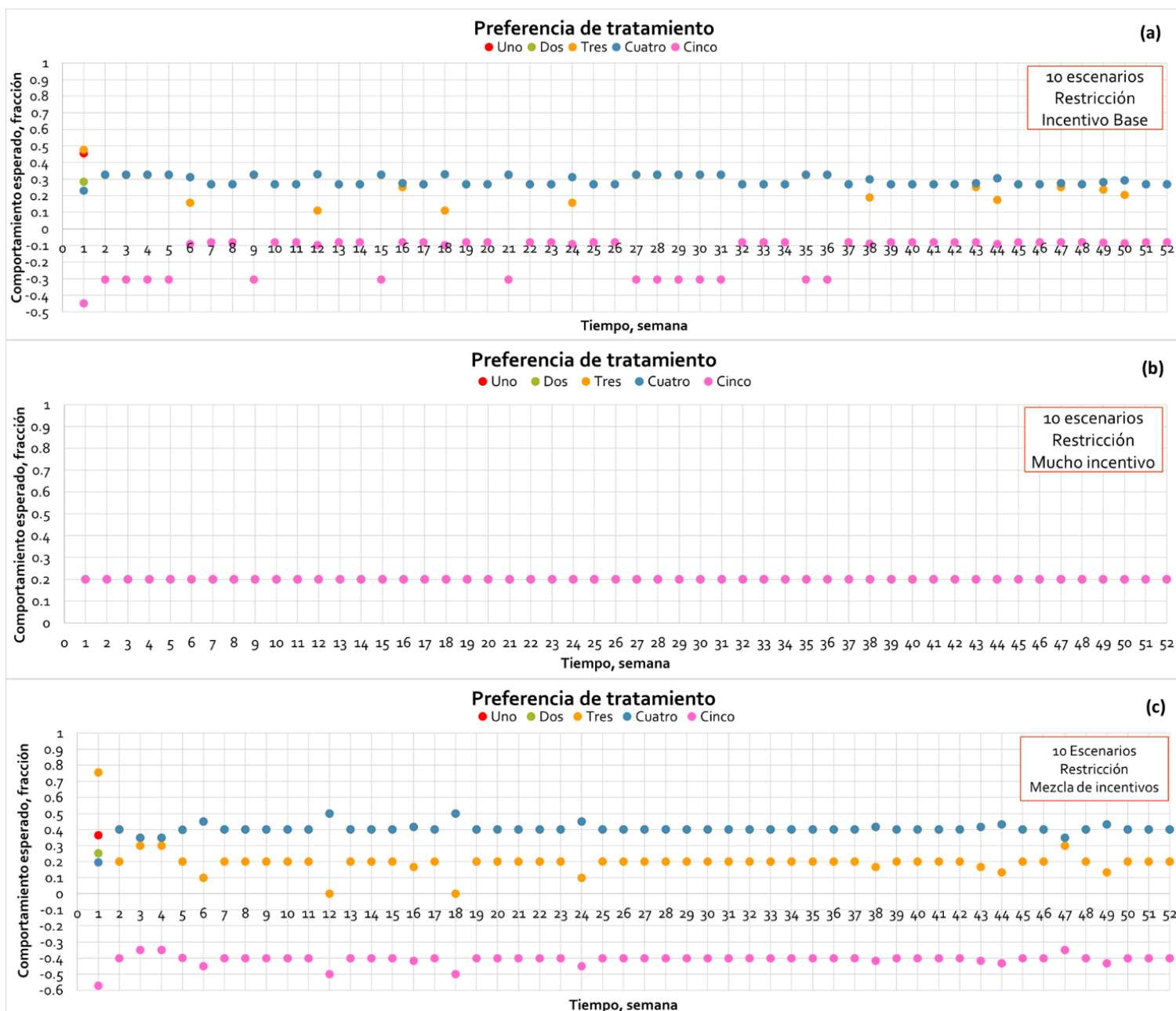


**Figura 5.10.** Preferencia de los tratamientos para 30 escenarios

**Tabla 5.9.** Información considerada para las unidades de tratamiento

| Concepto                                                          | Tratamiento |        |        |        |        |
|-------------------------------------------------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
|                                                                   | 1           | 2      | 3      | 4      | 5      |
| <b>Eficiencia</b>                                                 | 0.900       | 0.945  | 0.810  | 0.963  | 0.765  |
| <b>Costo de operación de las unidades de tratamiento (\$/año)</b> | 12.500      | 13.125 | 11.250 | 13.375 | 10.625 |
| <b>Incentivo base (\$/m<sup>3</sup>)</b>                          | 1.250       | 1.313  | 1.125  | 1.338  | 1.063  |

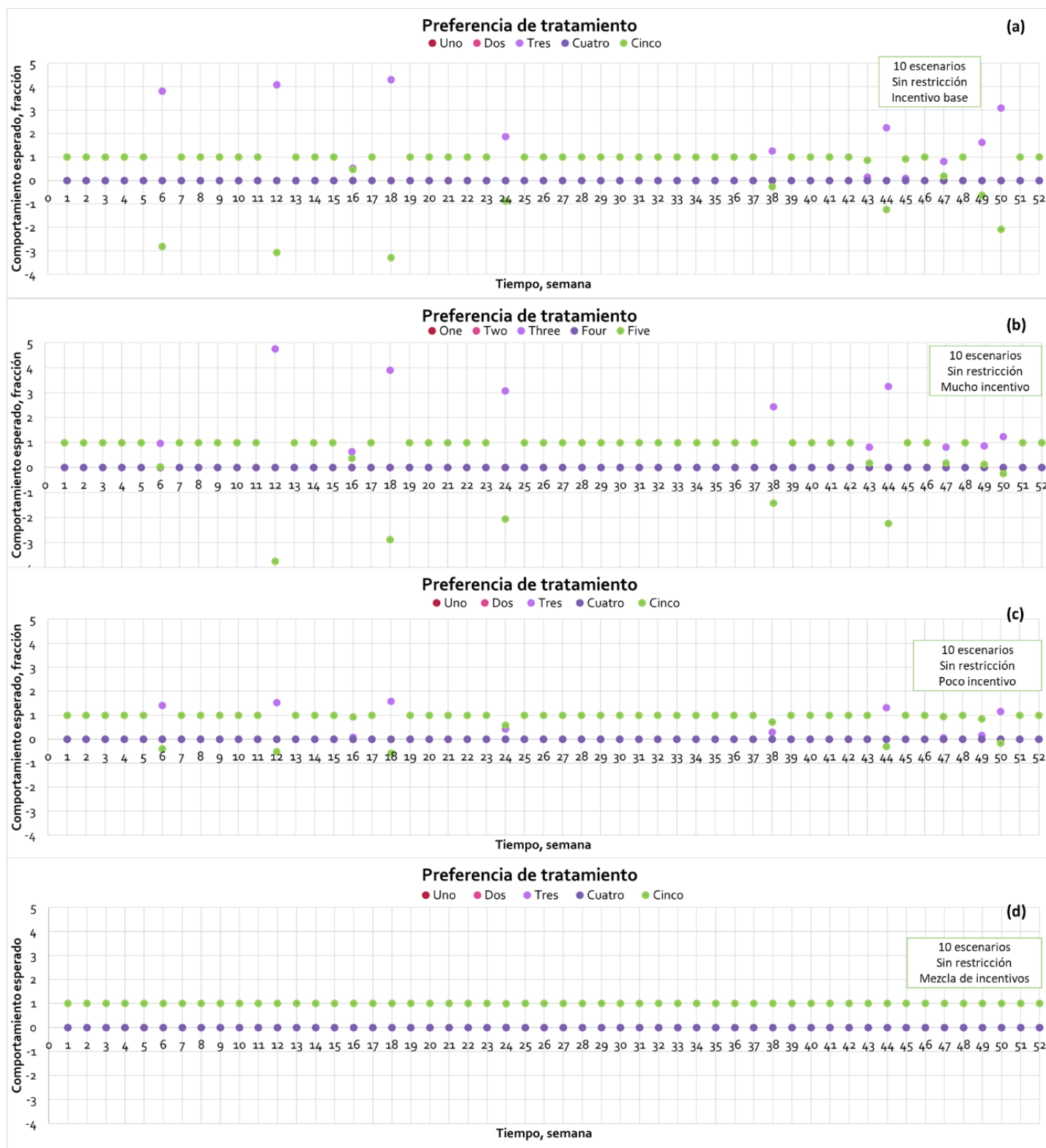
Debido a la proximidad de los incentivos al considerar 10 escenarios, la preferencia en el tratamiento 5 es negativa como se observa en la **Figura 5.11a**, lo que significa que la sanción es mayor que la recompensa, y representa la dificultad para alcanzar las metas establecidas por el gobierno y eventualmente el productor rechazará el tratamiento 5. Cuando los incentivos son mayores, los resultados muestran que la preferencia por los tratamientos es igual en todos (**Figura 5.11b**). Por otro lado, cuando se considera una mezcla de incentivos (valores más bajos y más altos), la diferencia de preferencia es más notoria en comparación con los otros casos (**Figura 5.11c**).



**Figura 5.11.** Preferencia de tratamiento al usar restricción en incentivos máximos. Con incentivos base (a), mucho incentivo (b) y combinación de incentivos (c)

Cuando no hay restricción en los incentivos máximos (**Figura 5.12**), se prefiere el tratamiento 3 durante el tiempo de transición para pasar de un pozo a otro. La diferencia más destacada es que el tratamiento 5 es más preferido cuando no hay restricción en los incentivos y el tratamiento 4 es el menos preferido. La **Figura 5.12c** no muestra mucha discrepancia en

la preferencia de tratamiento. Sin embargo, en la **Figura 5.12d**, cuando los incentivos son una mezcla, las preferencias de tratamiento se distribuyen por igual.



**Figura 5.12.** Preferencia de tratamiento al no utilizar restricción en incentivos máximos. Con incentivos base (a), mucho incentivo (b), poco incentivo (c) y mezcla de incentivos (d)

Cabe señalar que se propusieron casos con diferentes escenarios. El cambio en el número de variables fue significativo, así como el tiempo de resolución, cuanto mayor sea el número, más complejo será el programa a resolver. De esta forma, se utilizaron 10 escenarios para un mejor análisis. El mejor de los casos ocurrió cuando hay una restricción máxima y una mayor cantidad de incentivos otorgados “R(+)” ya que representa el menor costo esperado y el menor consumo de agua esperado; por otro lado, el peor de los casos representa “R(+)” que corresponde a tener una mezcla de incentivos, es decir, un caso donde en algunos tratamientos se propone mucho incentivo y en otros tratamientos donde se propone poco incentivo, siendo el caso “R(+)” el mayor costo y mayor consumo de agua dulce. Al incluir diferentes incentivos base para determinar el incentivo asignado, se obtienen resultados con diferentes valores para determinar el mejor caso de acuerdo a los objetivos buscados. Además, permite identificar la preferencia mediante el uso de la matching law en los tratamientos al tener diferentes valores y de acuerdo a esto se pueden establecer nuevos casos para que los objetivos buscados se comporten de acuerdo a las necesidades del interesado. Cuando se da mucho incentivo al tener una restricción máxima, la preferencia entre tratamientos es la misma, pero si no hay restricción, hay mayor discrepancia en la preferencia. La matching law puede ser una herramienta para favorecer la intensificación de procesos de este tipo. Además, al considerar diferentes escenarios que involucran incertidumbre en los valores que tienen mucho potencial a cambiar junto con la matching law, hace que el problema sea más robusto, lo que ayuda a describir las interacciones de comportamiento de los involucrados en el entorno en el que ocurren.

## 5.5 Nomenclatura

### 5.5.1 Conjuntos

|     |                                                |
|-----|------------------------------------------------|
| $D$ | $\{d \mid d \text{ disposición final}\}$       |
| $I$ | $\{i \mid i \text{ unidades de tratamiento}\}$ |
| $J$ | $\{j \mid j \text{ almacenamiento/pozo}\}$     |
| $N$ | $\{n \mid n \text{ pozo}\}$                    |
| $S$ | $\{s \mid s \text{ es un escenario}\}$         |
| $T$ | $\{t \mid t \text{ periodo de tiempo}\}$       |

### 5.5.2 Variables

|                            |                                                                                                      |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $ACC$                      | Costo de capital anualizado, \$/y                                                                    |
| $B_{t,s}^{total}$          | Comportamiento respuesta total de los tratamientos en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $\$/m^3$ |
| $B_{i,t,s}^{treat}$        | Respuesta de comportamiento $i$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $\$/m^3$                    |
| $EB_{i,t}^{treat}$         | Comportamiento esperado para cada tratamiento $i$ en el tiempo $t$ , $\$/m^3$                        |
| $ETAC$                     | Costo total anual esperado, \$/y                                                                     |
| $ETotCap^{treatment}$      | Capacidad total esperada de unidades de almacenamiento que se deben instalar, $m^3/d$                |
| $ETotCap^{storage}$        | Capacidad total esperada de los depósitos que se deben instalar, $m^3$                               |
| $ETotCap^{disposal}$       | Capacidad total esperada de los depósitos que se deben instalar, $m^3$                               |
| $ETWR$                     | Requerimientos totales de agua esperados de ETWR, $m^3$                                              |
| $F_{t,s}^{fresh}$          | Flujo de agua dulce consumido en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3/d$                       |
| $F_{j,t,s}^{storage\_in}$  | Flujo que ingresa al almacenamiento $j$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3/d$             |
| $F_{j,t,s}^{storage\_out}$ | Flujo que sale del almacenamiento $j$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3/d$               |
| $F_i^{treat\_cap}$         | Capacidad de flujo para el tratamiento $i$ , $m^3/d$                                                 |
| $F_{i,s}^{treat\_cap}$     | Capacidad de flujo de tratamiento $i$ para el escenario $s$ , $m^3/d$                                |
| $F_{i,t,s}^{treat\_in}$    | Flujo de entrada al tratamiento $i$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3/d$                 |
| $F_{i,t,s}^{treat\_out}$   | Flujo de salida del tratamiento $i$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3/d$                 |
| $F_{d,t,s}^{waste}$        | Flujo enviado a disposición $d$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3/d$                     |

|                             |                                                                                                                  |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $ff_{n,t,s}^{fresh}$        | Flujo segregado de agua dulce al pozo $n$ para el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3/d$                     |
| $ff_{j,n,t,s}^{storage}$    | Flujo segregado del almacenamiento $j$ al pozo $n$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3/d$              |
| $ff_{i,d,t,s}^{treat\_dis}$ | Flujo segregado del tratamiento $i$ al vertido $d$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3/d$              |
| $ff_{i,j,t,s}^{treat\_sto}$ | Flujo segregado del tratamiento $i$ a almacenamiento $j$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3/d$        |
| $ff_{n,i,t,s}^{well}$       | Flujo segregado del pozo $n$ al tratamiento $i$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3/d$                 |
| $I_{t,s}^{total}$           | Incentivos totales para usar tratamientos en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $\$/m^3$                      |
| $P_{t,s}^{fresh}$           | Penalización obtenida relacionada con el consumo de agua dulce en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $\$/m^3$ |
| $R_{t,s}^{fresh}$           | Recompensa obtenida relacionada con el consumo de agua dulce en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $\$/m^3$   |
| $TAC_s$                     | Costo total anual para el escenario $s$ , $\$/y$                                                                 |
| $TOC_s$                     | Costo de operación total para el escenario $s$ , $\$/y$                                                          |
| $TotCap^{treatment}$        | Capacidad total de las tecnologías de tratamiento que debe ser instalado, $m^3/d$                                |
| $TotCap_s^{treatment}$      | Capacidad total de las tecnologías de tratamiento que debe ser instalado para el escenario $s$ , $m^3/d$         |
| $TotCap^{storage}$          | Capacidad total de unidades de almacenamiento que se deben instalar, $m^3$                                       |

|                          |                                                                                                   |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $TotCap_s^{storage}$     | Capacidad total de unidades de almacenamiento que se deben instalar para el escenario $s$ , $m^3$ |
| $TotCap^{disposal}$      | Capacidad total de disposición final que se debe instalar, $m^3$                                  |
| $TotCap_s^{disposal}$    | Capacidad total de disposición final que se debe instalar para el escenario $s$ , $m^3$           |
| $TWR_s$                  | Requerimientos totales de agua para el escenario $s$ , $m^3$                                      |
| $V_{j,t,s}^{storage}$    | Volumen de almacenamiento/pozo $j$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3$                 |
| $V_j^{storage\_cap}$     | Capacidad para almacenamiento/pozo $j$ , $m^3$                                                    |
| $V_{j,s}^{storage\_cap}$ | Capacidad para almacenamiento/pozo $j$ para el escenario $s$ , $m^3$                              |
| $V_j^{storage\_initial}$ | Volumen inicial almacenamiento/pozo $j$ , $m^3$                                                   |
| $V_j^{storage\_max}$     | Volumen máximo para almacenamiento/pozo $j$ , $m^3$                                               |
| $V_d^{waste\_cap}$       | Capacidad de disposición $d$ , $m^3$                                                              |
| $V_{d,s}^{waste\_cap}$   | Capacidad de disposición $d$ para el escenario $s$ , $m^3$                                        |
| $V_d^{waste\_max}$       | Volumen máximo para disposición, $m^3$                                                            |
| $V_{d,s}^{waste\_scen}$  | Capacidad de disposición $d$ para escenario $s$ , $m^3$                                           |

### 5.5.3 Variables binarias

|                       |                                                                                                        |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $y_{A_s}^{fresh}$     | Activación de los incentivos económicos cuando el consumo de agua dulce es igual al caudal propuesto   |
| $y_{B_{t,s}}^{fresh}$ | Activación de los incentivos económicos cuando el consumo de agua dulce es superior al flujo propuesto |

|                       |                                                                                                         |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $y_{C_{t,s}}^{fresh}$ | Activación de los incentivos económicos cuando el consumo de agua dulce es menor que el flujo propuesto |
| $y_{A_{i,s}}^{treat}$ | Activación de los incentivos económicos cuando el flujo del tratamiento es igual al flujo propuesto     |
| $y_{B_{i,s}}^{treat}$ | Activación de los incentivos económicos cuando el flujo del tratamiento es superior al flujo propuesto  |
| $y_{C_{i,s}}^{treat}$ | Activación de los incentivos económicos cuando el flujo del tratamiento es menor al flujo propuesto     |
| $y_{j,s}^{storage}$   | Existencia de almacenamiento                                                                            |
| $y_{i,s}^{treat}$     | Existencia del tratamiento                                                                              |
| $y_{d,s}^{waste}$     | Existencia de las disposiciones finales                                                                 |

#### 5.5.4 Parámetros

|                     |                                                                                                                |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $E_{t,s}^{fresh}$   | Incentivo económico base para el consumo de agua dulce en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $\$/m^3$       |
| $E_{i,t,s}^{treat}$ | Incentivo económico base asociado al uso del tratamiento $i$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $\$/m^3$ |
| $FC^{treat}$        | Cargo fijo por la unidad de tratamiento en la función de costo de capital, $\$$                                |
| $FC^{storage}$      | Cargo fijo de la unidad de almacenamiento en la función de costo de capital, $\$$                              |
| $FC^{waste}$        | Cargo fijo por la disposición en la función de costo de capital, $\$$                                          |
| $F_{t,s}^{fresho}$  | Flujo objetivo establecido por el gobierno en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3/d$                    |

|                            |                                                                                                                            |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $F_{t,s}^{freshp}$         | Flujo propuesto establecido por el productor en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3/d$                              |
| $F_{t,s}^{freshmax}$       | Máxima disponibilidad de agua dulce en el tiempo $s$ , $m^3/d$                                                             |
| $F_i^{treat\_max}$         | Flujo máximo para las unidades de tratamiento $i$ , $m^3/d$                                                                |
| $F_{i,t,s}^{treat-outmin}$ | Flujo mínimo para las unidades de tratamiento $i$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3/d$                         |
| $F_{i,t,s}^{treat-ouo}$    | Flujo objetivo de salida del tratamiento $i$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3/d$                              |
| $F_{i,t,s}^{treat-outp}$   | Flujo propuesto a la salida del tratamiento $i$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3/d$                           |
| $F_{n,t,s}^{well\_in}$     | Flujo que entra en los pozos $n$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3/d$                                          |
| $F_{n,t,s}^{well\_out}$    | Agua de reflujo que sale del pozo $n$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $m^3/d$                                     |
| $H^{time}$                 | Factor de conversión de tiempo, $d/semana$                                                                                 |
| $k_F$                      | Factor utilizado para anualizar la inversión, $año^{-1}$                                                                   |
| $P_{t,s}^{freshmax}$       | Castigo económico máximo relacionado con el consumo de agua dulce en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $\$/m^3$        |
| $P_{i,t,s}^{treatmin}$     | Penalización económica mínima relacionada con el uso del tratamiento $i$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $\$/m^3$ |
| $P_{i,t,s}^{treatmax}$     | Sanción económica máxima relacionada con el uso del tratamiento $i$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $\$/m^3$      |
| $prob_s$                   | Probabilidad del escenario $s$                                                                                             |
| $R_{t,s}^{freshmax}$       | Recompensa económica máxima relacionada con el consumo de agua dulce en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $\$/m^3$     |

|                                 |                                                                                                                                 |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $R_{i,t,s}^{\text{treatmin}}$   | Recompensa económica mínima relacionada con el uso del tratamiento $i$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $\$/\text{m}^3$ |
| $R_{i,t,s}^{\text{treatmax}}$   | Recompensa económica máxima relacionada con el uso del tratamiento $i$ en el tiempo $t$ para el escenario $s$ , $\$/\text{m}^3$ |
| $u$                             | Parámetro utilizado en disyunción cuando las emisiones son iguales a las propuestas                                             |
| $UC^{\text{fresh}}$             | Costo unitario para el agua dulce, $\$/\text{m}^3$                                                                              |
| $UOC_i^{\text{treat}}$          | Costo unitario de operación del tratamiento $i$ , $\$/\text{m}^3$                                                               |
| $UTC_n^{\text{fresh}}$          | Costo unitario de transporte del agua dulce al pozo $n$ , $\$/\text{m}^3$                                                       |
| $UTC_{j,n}^{\text{sto\_well}}$  | Costo unitario de transporte del agua reutilizada del depósito $j$ al pozo $n$ , $\$/\text{m}^3$                                |
| $UTC_{i,d}^{\text{treat\_dis}}$ | Costo unitario de transporte del agua tratada desde el tratamiento $i$ hasta la disposición $d$ , $\$/\text{m}^3$               |
| $UTC_{i,j}^{\text{treat\_sto}}$ | Costo unitario de transporte del agua tratada desde el tratamiento $i$ hasta el almacenamiento $j$ , $\$/\text{m}^3$            |
| $UTC_{n,i}^{\text{used}}$       | Costo unitario de transporte del agua de reflujo del pozo $n$ al tratamiento $i$ , $\$/\text{m}^3$                              |
| $v$                             | Parámetro utilizado en disyunción cuando las emisiones son inferiores a las propuestas                                          |
| $VC^{\text{treat}}$             | Cargo variable por la unidad de tratamiento en la función de costo de capital $\$/\text{m}^3/\text{d}$                          |
| $VC^{\text{storage}}$           | Cargo variable de almacenamiento para la unidad de almacenamiento en la función de costo de capital, $\$/\text{m}^3$            |
| $VC^{\text{waste}}$             | Cargo variable por la disposición en la función de costo de capital, $\$/\text{m}^3$                                            |

|                    |                                                                                        |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| $x$                | Parámetro utilizado en disyunción cuando las emisiones son superiores a las propuestas |
| $\alpha_i^{treat}$ | Factor de eficiencia volumétrica para el tratamiento $i$                               |
| $\delta$           | Valor utilizado en la disyunción para hacer una ligera diferencia en las desigualdades |

## CAPÍTULO SEIS

### 6.1 CONCLUSIONES GENERALES

En los diversos capítulos de esta tesis han sido presentados modelos de optimización generales para la incorporación de incentivos y castigos en la planificación estratégica de sistemas energéticos a través de la matching law, los cuales pueden ser aplicados a diferentes casos haciendo los cambios pertinentes en los valores de los parámetros. Vale la pena señalar que este es un primer intento de incluir la matching law en formulaciones de optimización para incentivar la cadena de suministro de un sistema energético. El principal problema a la hora de diseñar procesos sostenibles es coordinar a todos los participantes para que se conviertan en un todo y alcancen los objetivos establecidos.

El capítulo dos ha presentado un modelo de programación matemática para la planificación estratégica de la producción de metanol que implica el uso de los recursos regionales de gas natural buscando la autosuficiencia. El modelo da cuenta de la producción de metanol utilizando plantas nuevas y existentes, así como las infraestructuras y cadenas de suministro asociadas. También considera las incertidumbres asociadas con las variabilidades en los costos, la oferta y la demanda. Se conciliaron varios objetivos (beneficio, emisiones, huella hídrica) mediante la optimización multiobjetivo y el uso de curvas de Pareto. El trabajo utiliza incentivos y castigos económicos para incentivar la producción nacional de metanol. Esto es muy importante de considerar ya que de esta manera el gobierno promueve la producción sin recurrir a la importación no solo de metanol sino de diversos componentes que pueden obtenerse con recursos propios del país y son ampliamente utilizados en diferentes industrias. Para demostrar el valor del modelo propuesto, el enfoque se aplica a un caso de estudio en México. De esta forma, se demostró que es posible satisfacer la demanda de metanol sin utilizar importaciones y, además, se obtienen buenos incentivos económicos, mejorando la producción nacional de metanol. También se observó que cuanto mayor sea la producción de nuevas plantas de metanol, los incentivos generados serán mucho mejores, concluyendo que la construcción de dichas plantas de metanol es factible.

El capítulo tres ha presentado un modelo de optimización matemática capaz de involucrar la conducta de las personas con la planificación para la construcción de paneles solares aislados e interconectados con la red. Se consideró desde la distribución de la materia prima para la producción de silicio grado solar que puede ser obtenido por Siemens, procesos FBR intensificados e Híbridos. El enfoque propuesto ha sido probado en un estudio de caso nacional en México, teniendo en cuenta la mayor rentabilidad y preferencia hacia los paneles solares de los usuarios involucrados. La matching law relaciona el flujo relativo de respuesta y el flujo relativo de recompensa bajo un estímulo concurrente. Debido a que la población está bajo comercialización continua, es posible promover el uso de paneles solares. El dinero se ha utilizado para motivar a las personas y alentarlas a hacer un mejor trabajo a través de recompensas y castigos. Mediante el uso de la matching law para estudiar el comportamiento humano, es posible predecir las preferencias de la población. Además, se pueden crear escenarios hipotéticos para comprender los principales factores que modifican la decisión final del usuario y ayudar al actor a decidir de acuerdo con sus objetivos e intereses. Cabe señalar en el caso de estudio presentado que las ganancias siguen siendo similares entre los escenarios A, B y C ( $7.9188 \times 10^8$ ,  $7.9223 \times 10^8$  y  $7.9214 \times 10^8$  \$/año). Sin embargo, la diferencia radica en el comportamiento de los usuarios, es decir, la preferencia por la que se inclinan. El uso de modelos que predicen el comportamiento permite controlar o manipular la respuesta esperada de los consumidores ante diversas situaciones establecidas. Gracias al estudio analizado, es posible indicar que al modificar las recompensas, el comportamiento cambia.

En el capítulo cuatro se ha presentado un modelo de optimización para la planificación estratégica del sistema energético considerando combustibles fósiles, biocombustibles y ecoindustrias. Se ha incluido la matching law para estimar la preferencia del productor según los incentivos/penalizaciones económicas. La opción para instalar refinerías, biorrefinerías y ecoindustrias está relacionada con las emisiones generadas y son incentivadas a través de la matching law. En este sentido, el objetivo es reducir las emisiones: se castiga más la generación de emisiones en refinerías que en biorrefinerías, en cambio, se incentiva más cuando se reducen las emisiones en refinerías que en biorrefinerías. El enfoque propuesto considera el uso de combustibles fósiles y/o biocombustibles simultáneamente. De esta forma, ambas partes se complementan para aprovechar los beneficios que ofrecen y satisfacer

las necesidades energéticas. Se ha considerado un caso de estudio para el sistema energético de México para aplicar el enfoque de optimización propuesto. Los resultados muestran que, de acuerdo con las condiciones, el productor tiende a elegir el uso de bioetanol y diésel. Sin embargo, es posible modificar las preferencias según las necesidades del tomador de decisiones, cambiando los incentivos/castigos económicos. Se han analizado diferentes escenarios para observar el comportamiento y determinar cuán drástica puede ser la diferencia entre unas condiciones y otras. Considerar múltiples objetivos permite obtener resultados más atractivos. Maximizando las ganancias, maximizando los trabajos generados y minimizando las emisiones, es posible encontrar una solución intermedia que satisfaga tanto las funciones objetivo como la preferencia del tomador de decisiones. Es importante señalar que los resultados obtenidos brindan una pauta para establecer un comportamiento en una cadena de suministro que se puede predecir mediante el uso de la matching law, donde es posible involucrar aspectos importantes que pueden resolver el problema. En este caso, el objetivo es promover el uso de biocombustibles complementándolos con combustibles fósiles. Implementar impuestos sobre las emisiones que se generan es una forma de gestionarlas, donde se deben pagar cuotas cuando se exceden los límites establecidos y se obtienen beneficios económicos cuando se reducen. Además, al brindar incentivos económicos, se promueve el uso de biocombustibles. Los resultados muestran que cuando los incentivos son bajos, el productor tiende a preferir los combustibles fósiles, mientras que en escenarios donde el incentivo es alto, una mayor proporción prefiere usar biocombustibles porque el comportamiento humano se siente atraído por escenarios donde se obtienen ganancias.

En el quinto capítulo se presentó un modelo de optimización capaz de determinar la correcta planificación y gestión del agua en la obtención de shale gas, teniendo en cuenta la incertidumbre asociada al agua requerida para perforar cada pozo y el agua que retorna a la superficie. Se busca la intensificación del proceso reutilizando la mayor cantidad de agua tratada y reduciendo el consumo de agua dulce e incluyendo nuevas técnicas como la matching law. Involucrar incentivos económicos asegura la reutilización del agua y al mismo tiempo promueve su tratamiento; al utilizar la matching law se cuantifica la preferencia por cada tipo de tratamiento. Los incentivos y castigos se otorgan a las personas que están involucradas en la red de producción de gas shale, su comportamiento afecta los resultados

de acuerdo a los incentivos otorgados. Al estudiar escenarios bajo incertidumbre junto con la matching law, genera resultados favorables en cuanto a posibles comportamientos ante cambios en los parámetros utilizados, dando un mayor espectro en la solución. Como caso de estudio, el modelo matemático se probó en los campos de shale más importantes de Estados Unidos, Marcellus y Barnett. La función objetivo es minimizar el costo esperado considerando los costos operativos y de capital, así como los incentivos/penalizaciones otorgados. A través de los resultados se encontró que al incentivar/castigar el consumo de agua dulce y el uso de tratamiento, los costos disminuyen asegurando un mejor desempeño en base a los objetivos establecidos. Conocer la preferencia por cada tipo de tratamiento permite establecer el comportamiento de los involucrados para modificarlo de acuerdo a las necesidades del interesado. Se analizaron diferentes casos con diferente número de escenarios. Se decidió utilizar 10 escenarios para facilitar el análisis del problema debido al costo computacional y así poder determinar el comportamiento y observar cuán drástica puede ser la diferencia entre unas condiciones y otras, destacando que cuanto más cercanos sean los valores de los incentivos de base entre ellos, más difícil será de resolver. También es importante señalar que los resultados obtenidos son una guía para establecer el efecto de la preferencia en la planificación. Ese trabajo se enfoca en la correcta planificación para la producción de gas shale y ciertamente, la cadena de suministro solo se considera de manera muy general.

Para trabajos futuros, los incentivos se pueden estudiar desde una perspectiva diferente, como un presupuesto total que se puede optimizar para distribuir entre los participantes. El principal reto es encontrar los incentivos óptimos para asegurar mejores resultados. Se buscaría también extender la simulación más propiamente relacionada con el comportamiento de las personas a problemas macroscópicos ingenieriles, donde se obtengan datos reales con experimentación. Las áreas en las que sería interesante explotar esta estrategia podría estar relacionada con los materiales, donde se tenga la opción de elegir entre diferentes tipos y se busque incentivar alguno mucho más sustentable.

## 6.2 REFERENCIAS

- [1] Naciones Unidas, El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible. <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible#:~:text=Los%20combustibles%20f%C3%B3siles%20comprenden%20el,emisiones%20globales%20de%20CO2>. (Accesado Diciembre 2022).
- [2] OECD, Biocombustibles. <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/8d79647e-es/index.html?itemId=/content/component/8d79647e-es>. (Accesado Diciembre 2022).
- [3] Wang, Q., Chen, X., Jha, A.N., Rogers, H., Natural gas from shale formation – The evolution, evidences and challenges of shale gas revolution in United States. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 30 (2014) 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.065>.
- [4] Meakin, P., Huang, H., Malthe-Sorensen, A., Thogersen, K., Shale gas: Opportunities and challenges. *Environ. Geosci.* 20(4) (2013) 151-164. <https://doi.org/10.1306/eg.05311313005>.
- [5] Dinan, T.M., Rogers, D.L., Distributional effects of carbon allowance trading: How government decisions determine winners and losers. *Natl. Tax. J.* 55(2) (2002) 199-221. <https://doi.org/10.17310/ntj.2002.2.01>.
- [6] Harrington, W., Morgenstern, R.D., Economic incentives versus command and control: what's the best approach for solving environmental problems?. *Acid in the Environment*. (2007) 233-240. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-37562-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-0-387-37562-5_12).
- [7] Herrnstein, R.J., Relative and absolute strength of response as a function of frequency of reinforcement. *J. Exp. Anal. Behav.* 4 (3) (1961) 267-272. <https://doi.org/10.1901/jeab.1961.4-267>.
- [8] Reed, D.D., Kaplan, B.A., The matching law: A tutorial for practitioners. *Assoc. Behav. Anal. Int.* 4 (2) (2011) 15-24. <https://doi.org/10.1007/BF03391780>.
- [9] Herrnstein, R.J., On the law of effect. *J. Exp. Anal. Behav.* 13(2) (1970) 243-266. <https://doi.org/10.1901/jeab.1970.13-243>.

- [10] Myerson, J., Hale, S., Practical implications of the matching law. *J. Appl. Behav.* 17(3) (1984) 367-380. <https://doi.org/10.1901/jaba.1984.17-367>.
- [11] McDowell, J.J., On the theoretical and empirical status of the matching law and matching theory. *Psychol. Bull.* 139(5) (2013) 1000-1028. <https://doi.org/10.1037/a0029924>.
- [12] Konk, T., Savin, I., Van den Bergh, J.C.J.M., The social multiplier of environmental policy: Application to carbon taxation. *J. Environ. Econ. Manag.* 105 (2021) 102396 <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2020.102396>.
- [13] Cachon, G.P., Lariviere, M.A., Capacity choice and allocation: Strategic behavior and supply chain performance. *Manag. Sci.* 45(8) (1999) 1091-1108. <https://doi.org/10.1287/mnsc.45.8.1091>.
- [14] Su, X., Zhang, F., Strategic customer behavior, commitment, and supply chain performance. *Manag. Sci.* 54(10) (2008) 1759-1773. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1080.0886>.
- [15] McFarland, R.G., Bloodgood, J.M., Payan, P.M., Supply chain contagion. *J. Mark.* 72(2) (2008) 63-79. <https://doi.org/10.1509/jmkg.72.2.63>.
- [16] Hartwig, R., Inderfurth, K., Sadrieh, A., Voigt, G., Strategic inventory and supply chain behavior. *POM.* 24(8) (2015) 1329-1345. <https://doi.org/10.1111/poms.12325>.
- [17] MasterClass, Understanding incentives in economics: 5 common types of economic incentives, 2022. <https://www.masterclass.com/articles/understanding-incentives-in-economics>. (Accesado Diciembre 2022).
- [18] United States Environmental Protection Agency (EPA), Economic incentives, 2022. <https://www.epa.gov/environmental-economics/economic-incentives> . (Accesado Diciembre 2022).
- [19] United States Environmental Protection Agency (EPA), International experiences with economic incentives for protecting the environment, 2004. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-08/documents/ee-0487-01.pdf>. (Accesado Diciembre 2022).

- [20] Naik, S.N., Goud, V.V., Rout, P.K., Dalai, A.K., Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 14(2) (2010) 578-597. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>.
- [21] De Paula Gomes, M.S., De Araújo, M.S.M., Bio-fuels production and the environmental indicators. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 13(8) (2009) 2201-2204. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.015>.
- [22] UNESCO, World water assessment program, 2017. <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-7-water-biofuel/> (Accessed August 2021).
- [23] Staples, M.D., Olcay, H., Malina, R., Trivedi, P., Pearlson, M.N., Strzepek, K., Paltsev, S.V., Wollersheim, C., Barrett, S.R.H., Water consumption footprint and land requirements of large scale alternative diesel and jet fuel production. *Environ. Sci. Technol.* 47(21), (2013) 12557-12565. <https://doi.org/10.1021/es4030782>.
- [24] U.S. Energy Information Administration, Short-term energy Outlook, 2020. <https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/> (accessed December 2020).
- [25] Luh, S., Budins, S., Giarola, S., Schmidt, T.J., Hawkes, A., Long-term development of the industrial sector – case study about electrification, fuel switching, and CCS in the USA. *Comput. Chem. Eng.* 133 (2020) 106602. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106602>.
- [26] Shahandeh, H., Li, Z., Optimal design of bitumen upgrading facility with CO<sub>2</sub> reduction. *Comput. Chem. Eng.* 106 [2017] 106-121. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.06.001>.
- [27] Zhang, H., Li, P., Zheng, H., Zhang, Y., Impact of carbon tax on enterprise operation and production strategy for low-carbon products in a co-opetition supply chain. *J. Clean. Prod.* 287 (2021) 125058. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125058>.
- [28] Babiker, M.H., Climate change policy, market structure, and carbon leakage. *J. Int. Econ.* 65(2) (2005) 421-445. <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2004.01.003>.

- [29] Schwartz, S., Stahn, H., Competitive permit markets and vertical structures: The relevance of imperfectly competitive eco-industries. *J. Public Econ. Theory.* 16(1) (2013) 69-95. <https://doi.org/10.1111/jpet.12048>.
- [30] Andersson, J.J., Carbon taxes and CO2 emissions: Sweden as a case study. *Am. Econ. J. Econ. Policy.* 11(4) (2019) 1-30. <https://doi.org/10.1257/pol.20170144>.
- [31] Leonzio, G., Foscolo, P.U., Zondervan, E., Sustainable utilization and storage of carbon dioxide: analysis and design of an innovative supply chain. *Comput. Chem. Eng.* 131 (2019) 106569. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106569>.
- [32] Shakouri, G.H., Aliakbarisani, S., At what valuation of sustainability can we abandon fossil fuels? A comprehensive multistage decision support model for electricity planning. *Energy.* 107 (2016) 60-77. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.124>.
- [33] Govindarajulu, N., Daily, B.F., Motivating employees for environmental improvement, *Ind. Manag. Data Syst.* 104(4) (2004) 364-372. <https://doi.org/10.1108/02635570410530775>.
- [34] Makri, M., Lane, P.J., Gomez-Mejia, L.R., CEO incentives, innovation, and performance in technology-intensive firms: A reconciliation of outcome and behavior-based incentive schemes, *Strateg. Manag. J.* 27(11) (2006) 1057-1080. <https://doi.org/10.1002/smj.560>.
- [35] Etchart-Vincent, N., l'Haridon, V., Monetary incentives in the loss domain and behavior toward risk: An experimental comparison of three reward schemes including real losses, *J. Risk. Uncertain.* 42(1) (2010) 61-83. <https://doi.org/10.1007/s11166-010-9110-0>.
- [36] Bryan, B.A., Crossman, N.D., Impact of multiple interacting financial incentives on land use change and the supply of ecosystem services, *Ecosyst. Serv.* 4 (2013) 60-72. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.03.004>.
- [37] Villicaña-García, E., El-Halwagi, M.M., Ponce-Ortega, J.M., Involving economic incentives in optimizing the methanol supply chain considering conventional and unconventional resources, *Appl. Therm. Eng.* 166(10) (2019) 114622. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114622>.

- [38] Sabzi, H.Z., Rezapour, S., Fovargue, R., Moreno, H., Neeson, T.M., Strategic allocation of water conservation incentives to balance environmental flows and societal outcomes, *Ecol. Eng.* 127 (2019) 160-169. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.11.005>.
- [39] Deroubaix, J.F., Lévêque, F., The rise and fall of French ecological tax reform: social acceptability versus political feasibility in the energy tax implementation process. *Energy Policy*. 34 (2006) 940-949. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.08.047>.
- [40] Killeen, P., The matching law, *J. Exp. Anal. Behav.* 17(3) (1972) 489-495. <https://doi.org/10.1901/jeab.1972.17-489>.
- [41] Rachlin, R.J., Laibson, D.I., The matching law, Papers in psychology and economics, *Harvard University Press*, Boston. MA, USA, 2000.
- [42] Poling, A., Edwards, T.L., Weeden, M., The matching law, *Psycho. Rec.* 61(2) (2011) 313-322. <https://doi.org/10.1007/BF03395762>.
- [43] Houston, A.I., Trimmer, P.C., McNamara, J.M., Matching behaviours and rewards, *Trends Cogn. Sci.* 25(5) (2021) 403-415. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2021.01.011>.
- [44] Lai, X., Tao, Y., Wang, F., Zou, Z., Sustainability investment in maritime supply chain with risk behavior and information sharing, *Int. J. Prod. Econ.* 218 (2019) 16-29. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.02.021>.
- [45] Hao, C., Du, Q., Huang, Y., Shao, L., Yan, Y., Evolutionary game analysis on knowledge-sharing behavior in the construction supply chain, *Sustainability*. 11(19) (2019) 5319. <https://doi.org/10.3390/su11195319>.
- [46] Villicaña-García, E., Ramírez-Márquez, C., Segovia-Hernández, G., Ponce-Ortega, J.M., Planning of intensified production of solar grade silicon to yield solar panels involving behavior of population, *Chem. Eng. Process.* 161 (2020) 108241. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108241>.
- [47] Cox, D.J., Klapes, B., Falligant, J.M., Scaling from 1 to 1,000,000: Application of the generalized matching law to big data contexts. *Perspect. Behav. Sci.* 44 (2021) 641-665. <https://doi.org/10.1007/s40614-021-00298-8>

- [48] Santibañez-Aguilar, J.E., Guillen-Gosálbez, G., Morales-Rodriguez, R., Jiménez-Esteller, L., Castro-Montoya, A.J., Ponce-Ortega, J.M., Financial risk assessment and optimal planning of biofuels supply chains under uncertainty. *Bioenerg. Res.* 9(4) (2016) 1053-1069. <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9743-1>.
- [49] Mohammadi, M., Jämsä-Jounela, S.L., Harjunkoski, I., Optimal planning of municipal solid waste management systems in an integrated supply chain network. *Comput. Chem. Eng.* 123 (2018) 155-169. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.12.022>.
- [50] Martínez-Guido, S.I., Ríos-Badrán, I.M., Gutiérrez-Antonio, C., Ponce-Ortega, J.M., Strategic planning for the use of waste biomass pellets in Mexican power plants. *Renew. Energy.* 130 (2019) 622-632. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.084>.
- [51] Villicaña-García, E.; Ponce-Ortega, J.M., Sustainable strategic planning for a national natural gas energy system accounting for unconventional sources. *Energy Convers. Manage.* 181 (2019) 382-397. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.023>.
- [52] Control and economic incentives for agents, [http://webs2002.uab.es/jverges/CONT\\_PDF/5control.pdf](http://webs2002.uab.es/jverges/CONT_PDF/5control.pdf). (Accessed February 2019).
- [53] Ponce-Ortega, J.M., Hortua, A.C., El-Halwagi, M.M., Jiménez-Gutiérrez, A., A property-based optimization of direct recycle networks and wastewater treatment processes. *AIChE J.* 55 (2009) 2329-2344. <https://doi.org/10.1002/aic.11828>.
- [54] Methanol Institute, <https://www.methanol.org/chemical/>. (Accesado Enero 2019).
- [55] INEGI, <https://www.inegi.org.mx/>. (Accesado Enero 2019).
- [56] PEMEX, <https://www.pemex.com>. (Accesado Febrero 2019).
- [57] Khalili-Damghani, K., Nojavan, M., Tavana, M., Solving fuzzy multidimensional multiple-choice Knapsack problems: The multi-start partial bound enumeration method versus the efficient epsilon-constraint method. *App. Soft Comp.* 13 (2013) 1627-1638. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2013.01.014>.

- [58] Ramírez-Márquez, C., Otero, M.V., Vázquez-Castillo, J.A., Martín, M., Segovia-Hernández, J.G., Process design and intensification for the production of solar grade silicon. *J. Clean. Prod.* 170 (2018) 1579-1593. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.126>.
- [59] Gerven, T.V., Stankiewicz, A. Structure, Energy, Synergy, Time – The Fundamentals of Process Intensification. *Ind. Chem. Res.* 48 (2009) 2465-2474. <https://doi.org/10.1021/ie801501y>.
- [60] Borrero, J.C. Vollmer, T.R., An application of the matching law to severe problem behavior. *J. Appl. Behav. Anal.* 35(1) (2002) 13-27. <https://doi.org/10.1901/jaba.2002.35-13>.
- [61] Mazur, J.E., Mathematical models and the experimental analysis of behavior. *J. Exp. Anal. Behav.* 85(2) (2016) 275-291. <https://doi.org/10.1901/jeab.2006.65-05>.
- [62] INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/geologia/> (Accesado Agosto 2019).
- [63] Entrepreneur. <https://www.entrepreneur.com/article/314071> (Accesado Octubre 2019).
- [64] CFE. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/usuarios-y-consumo-de-electricidad-por-municipio-a-partir-de-2018> (Accesado Noviembre 2019).
- [65] INEGI. <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/> (Accesado Septiembre 2019).
- [66] Muhammad, B., Energy consumption, CO2 emissions and economic growth in developed, emerging and middle east and north Africa countries. *Energy*. 179 (2019) 232-245. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.126>.
- [67] Sánchez-Bautista, A.F., Santibañez-Aguilar, J.E., You, F., Ponce-Ortega, J.M., Optimal design of energy systems involving pollution trading through forest plantations. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 5(3) (2017) 2585-2604. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02928>.
- [68] Lee, S., Grossmann, I.E., New algorithms for nonlinear generalized disjunctive programming. *Comput. Chem. Eng.* 24(9-10) (2000) 2125-2141. [https://doi.org/10.1016/s0098-1354\(00\)00581-0](https://doi.org/10.1016/s0098-1354(00)00581-0).

- [69] CNH, Reservas de hidrocarburos, 2020. <https://reservas.hidrocarburos.gob.mx/> (Accesado Diciembre 2020).
- [70] CNH, Actividad petrolera, 2020. <https://sih.hidrocarburos.gob.mx/> (Accesado Diciembre 2020).
- [71] SENER, Prospectiva de petróleo crudo y petrolíferos, 2018. [https://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PPP\\_2018\\_2032\\_F.pdf](https://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PPP_2018_2032_F.pdf) (Accesado Diciembre 2020).
- [72] SENER, Prospectiva de energías renovables, 2018 [https://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PER\\_18\\_32\\_F.pdf](https://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PER_18_32_F.pdf) (Accesado Diciembre 2020).
- [73] SENER, Atlas nacional de biomasa, 2018. <https://www.gob.mx/sener/articulos/atlas-nacional-de-biomasa> (Accesado Agosto 2021).
- [74] Byun, J., Han, J., Sustainable development of biorefineries: integrated assessment method for co-production pathways. *Energy Environ. Sci.* 13 (2020) 2233-2242. <https://doi.org/10.1039/d0ee00812e>.
- [75] Nowak, D.J., Crane, D.E., Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environ. Pollut.* 116(3) (2002) 381–389. [https://10.1016/S0269-7491\(01\)00214-7](https://10.1016/S0269-7491(01)00214-7).
- [76] Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R., Rosenthal, R.W., 1998. A user's guide. Washington DC: GAMS Development Corporation.
- [77] Gams Development Corporation, DICOPT. [https://www.gams.com/latest/docs/S\\_DICOPT.html](https://www.gams.com/latest/docs/S_DICOPT.html) (Accesado Diciembre 2020).
- [78] Gams Development Corporation, CPLEX. [https://www.gams.com/latest/docs/S\\_CPLEX.html](https://www.gams.com/latest/docs/S_CPLEX.html) (Accesado Diciembre 2020).
- [79] Gams Development Corporation, CONOPT. [https://www.gams.com/latest/docs/S\\_CONOPT.html](https://www.gams.com/latest/docs/S_CONOPT.html) (Accesado Diciembre 2020).

- [80] Fuentes-Cortés, L.F., Ponce-Ortega, J.M., Zavala, V.M, Balancing stakeholder priorities in the operation of combined heat and power systems. *Appl. Therm. Eng.* 128 (2018) 480-488. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.052>.
- [81] Reins, L., The shale gas extraction process and its impacts on water resources. *Rev. Eur. Community.* 20(3) (2011) 300-312. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9388.2012.00733.x>.
- [82] Lira-Barragán, L.F., Ponce-Ortega, J.M., Guillén-Gosálbez, G., El-Halwagi, M.M., Optimal water management under uncertainty for shale gas production. *Ind. Eng. Chem. Res.* 55(5) (2016) 1322-1335. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b02748>.
- [83] Gao, J., Ning, C., You, F., Data-driven distributionally robust optimization of shale gas supply chains under uncertainty. *AIChE J.* 65(3) (2018) 947-963. <https://doi.org/10.1002/aic.16488>.
- [84] Slutz, J., Anderson, J., Broderick, R., Horner, P., Key shale gas water management strategies: An economic assessment tool. *International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production.* (2012). <https://doi.org/10.2118/157532-MS>.
- [85] Yenipazarli, A., Incentives for environmental research and development: Consumer preferences, competitive pressure and emission taxation. *Eur. J. Oper. Res.* 276(2) (2019) 757-769. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.01.037>.
- [86] Sun, Y., Wang, D., Tsang, D.C.W., Wang, L., Ok, Y.S. Feng, Y., A critical review of risks, characteristics, and treatment strategies for potentially toxic elements in wastewater from shale gas extraction. *Environmental International.* 125 (2019) 452-469. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.019>.
- [87] Environmental Protection Agency, Class II oil and gas related injection wells. <https://www.epa.gov/uic/class-ii-oil-and-gas-related-injection-wells#:~:text=Class%20II%20wells%20are%20used,the%20United%20States%20every%20day>. (Accesado Abril 2022).

- [88] Zheng, H., Zhang, J., Qi, Y., Geology and geomechanics of hydraulic fracturing in the Marcellus shale gas play and their potential applications to the Fuling shale gas development. *Energy Geoscience*. 1(1-2) (2020) 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.05.002>.
- [89] Nguyen-Le, V., Shin, H., Little, E., Development of shale gas prediction models for long-term production and economics based on early production data in Barnett reservoir. *Energies*, 13(2) (2020) 424. <https://doi.org/10.3390/en13020424>.
- [90] Marcellus shale initiative publications database, Sampling and analysis of water streams associated with the development of Marcellus shale gas, 2009. <http://edx.netl.doe.gov/dataset/0af0a64b-ee43-454f-9684-77132253d9d4/resource/4a092e1c-f824-4ecf-8562-0556cd52e353/download/MSCCommission-Report.pdf>. (Accesado Agosto 2021)
- [91] Vidic, R.D., Brantley, S.L., Vandenbossche, J.M., Yoxtheimer, D., Abad, J.D., Impact of shale gas development on regional water quality. *Science*. 340(6134) (2013) 1235009. <https://doi.org/10.1126/science.1235009>.
- [92] Chen, H., Carter, K.E., Water usage for natural gas production through hydraulic fracturing in the United States from 2008 to 2014. *J. Environ. Manage.* 170(1) (2016) 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.023>.
- [93] Shaffer, D.L., Arias-Chavez, L.H., Ben-Sasson, M., Romero-Vargas S.C., Yip, N.Y., Elimelech, M., Desalination and reuse of high-salinity shale gas produced water: drivers, technologies, and future directions. *Environ. Sci. Technol.* 47(17) (2013) 9569-9583. <https://doi.org/10.1021/es401966e>.
- [94] EPA Office of research and development, Assessment of the potential impacts of hydraulic fracturing for oil and gas on drinking water resources, 2015. [https://www.researchgate.net/publication/277720387\\_Assessment\\_of\\_the\\_Potential\\_Impacts\\_of\\_Hydraulic\\_Fracturing\\_for\\_Oil\\_and\\_Gas\\_on\\_Drinking\\_Water\\_Resources](https://www.researchgate.net/publication/277720387_Assessment_of_the_Potential_Impacts_of_Hydraulic_Fracturing_for_Oil_and_Gas_on_Drinking_Water_Resources). (Accesado Octubre 2021).

## **I. APÉNDICES**

### **1. Artículos publicados**

A continuación se presenta la portada de cada artículo que se ha publicado.



## Involving economic incentives in optimizing the methanol supply chain considering conventional and unconventional resources

Esbeydi Villalcaña-García<sup>a</sup>, Mahmoud M. El-Halwagi<sup>b</sup>, José María Ponce-Ortega<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. Francisco J. Mújica S/N, Ciudad Universitaria, Edificio V1, Morelia, Michoacán 58060, Mexico

<sup>b</sup> Chemical Engineering Department, Texas A&M University, College Station, TX 77843-3122, United States

### HIGHLIGHTS

- Strategic planning to produce methanol from unconventional and conventional source.
- The involved uncertainty in the supply chain is considered.
- A multi-objective optimization framework was incorporated.
- Modeling economic incentives were incorporated.

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

**Keywords:**  
Methanol  
Supply chain  
Natural gas  
Uncertainty  
Modeling economic incentives

### ABSTRACT

Recent discoveries of substantial reserves of natural/shale gas have spurred growth in the production of methanol from natural gas. Such growth must entail the development of reliable infrastructures and supply chains. This paper presents a mathematical programming model for the strategic planning of the methanol supply chains to satisfy regional demands. To encourage utilization of local resources, economic incentives are considered. The uncertainties associated with the unit sale cost, supply of natural gas, and demand of methanol are incorporated. Several sustainability objectives are included such as minimizing fresh water consumption, minimizing CO<sub>2</sub> emissions, and maximizing profit. To illustrate the applicability of the devised methodology, a case study from Mexico was solved with two schemes: Scheme A does not consider the uncertainty or economic incentives and Scheme B considers uncertainty, economic incentives and restrictions on the importation of methanol. The results show that by encouraging the national production of new methanol plants, the incentives generated are up to 113% better than if the importation and production of the only existing plant in Mexico are used.

\* Corresponding author.

E-mail address: [jmponce@umich.mx](mailto:jmponce@umich.mx) (J.M. Ponce-Ortega).

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114622>

Received 28 June 2019; Received in revised form 13 September 2019; Accepted 1 November 2019  
1359-4311/© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Please cite this article as: Esbeydi Villalcaña-García, Mahmoud M. El-Halwagi and José María Ponce-Ortega, Applied Thermal Engineering, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114622>



Contents lists available at ScienceDirect

# Chemical Engineering and Processing - Process Intensification

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/cep](http://www.elsevier.com/locate/cep)

## Planning of intensified production of solar grade silicon to yield solar panels involving behavior of population

Esbeydi Villicaña-García<sup>a</sup>, César Ramírez-Márquez<sup>b</sup>, Juan Gabriel Segovia-Hernández<sup>b</sup>,  
Jose Maria Ponce-Ortega<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. Francisco J. Múgica S/N, Ciudad Universitaria, Edificio V1, Morelia, Michoacán, 58060, Mexico

<sup>b</sup> Chemical Engineering Department, Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato, Guanajuato, 36005, Mexico

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Matching law  
Solar grade silicon  
Solar panels  
Strategic planning  
Intensified silicon production process  
Economic incentives

### ABSTRACT

The need to use clean sources for producing electricity has been a great topic of discussion in recent years. Many countries have begun to take advantage of solar energy through the production of solar panels for electric power generation. In addition, knowing people's preferences allows predicting their behavior to propose better planning at macroscopic level. This work presents a mathematical programming model to address the conduct of people. The objective is to know their inclinations using the matching law, which involves the actions of users through different scenarios considering economic incentives and punishments. It includes a strategic planning of the production and distribution of solar grade silicon that is used for the construction of solar panels to meet the demands of electricity in residential sector of Mexico as a case study. Process intensification was used to enhance different ways to obtain solar grade silicon such as an Intensified Fluidized Bed Reactor and a hybrid, which is a combination of Siemens and conventional FBR processes. Also, the Siemens process was considered the most common process to produce silicon. Results show that the difference between the analyzed scenarios lies in the behavior of people while profit maintains constant.

### 1. Introduction

The collection of solar energy through photovoltaic (PV) technology is increasingly recognized as an essential component of future global electricity generation. The depletion of fossil fuels, in addition to the detrimental effects of their excessive use, such as CO<sub>2</sub> emissions and some other greenhouse gases in the atmosphere, are driving research and the evolution of new energy sources that try to be more environmentally friendly [1].

In recent decades, photovoltaic systems have evolved and have been adapted to various applications of daily life. That is why the large-scale manufacturing of photovoltaic cells, capable of providing energy, is increasingly economically viable. Cost reductions are required in the production of raw materials, such is the case of one of the most used materials in the photovoltaic industry, the polysilicon. However, it is important to produce large amounts of polysilicon due to the high demand by the solar sector. The production of polysilicon from quartz consists of two main stages: obtaining metallurgical grade silicon and purifying it to transform it into solar grade silicon [2]. Attention has

been drawn to update processes to obtain this component in order to achieve not only cost reduction but also improving safety of the process. Process intensification enhances safety through reduction of inventory, develop reactor/yield, minimizing feedstock, etc. [3]. A reliable definition of process intensification is "Any chemical engineering development that leads to a substantially smaller, cleaner and more energy efficient technology" [4]. There has been an increasing growth in the field of process intensification in the last few decades that featured successful industrial applications and increased interest in research [5]. In the process industry, sustainability and competitiveness are essential objectives and the implementation of process intensification helps to achieve a more sustainable and economically stronger process [6]. Process intensification leads to substantially cheaper processes, investment costs, costs of raw materials, costs of utilities, and costs of waste-stream processing [7], and it enhances physical processes including heat, mass, and momentum transfer [8].

Due to the exceeding cost of photovoltaic panels, it is necessary to look for alternatives in order to reduce the production cost of the solar grade silicon (Si<sub>99</sub>). The photovoltaic industry relies on high-purity silicon produced in the Siemens process; however, it requires a high power

\* Corresponding author.

E-mail address: [jmponce@umich.mx](mailto:jmponce@umich.mx) (J.M. Ponce-Ortega).

<https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108241>

Received 13 August 2020; Received in revised form 1 October 2020; Accepted 23 November 2020

Available online 1 December 2020

0255-2701/© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.



## Inherent occupational health hazards in the production of solar grade silicon

César Ramírez-Márquez<sup>a</sup>, Esbeydi Villicaña-García<sup>a,\*</sup>, Brenda Cansino-Loeza<sup>b</sup>,  
Juan Gabriel Segovia-Hernández<sup>a,\*</sup>, Jose Maria Ponce-Ortega<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Chemical Engineering Department, University of Guanajuato, Campus Guanajuato, Gto., 36005 Mexico

<sup>b</sup> Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, 58060, Mexico

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 30 July 2019

Received in revised form 18 April 2020

Accepted 17 May 2020

Available online 24 May 2020

#### Keywords:

Solar grade silicon

Inherent occupational health hazards

Siemens process

Intensified FBR Union carbide process

Hybrid process

### ABSTRACT

Solar energy has become one of the most developed renewable energy sources in recent years. As with any energy source or product, there are health risks associated with the manufacturing of solar cells. And even though the photovoltaic industry uses far lesser amounts of toxic and flammable substances than many other industries, the use of hazardous chemicals can present occupational and environmental hazards. One of the most important aspects in the selection of new processes lies in the protection of workers' health. Health risks can be reduced if a process is chosen properly and in preliminary phases. Since we have found that it is necessary to carry out an evaluation of the health risks to workers in the production of polycrystalline silicon for the manufacturing of photovoltaic cells, in this work we will use the Process Route Healthiness Index to quantify the health risk that each silicon production process represents (the higher the index, the higher the hazards). The polycrystalline silicon production processes evaluated with the healthiness index are: Siemens Process, Intensified Fluidized Bed Reactor Union Carbide Process, and Hybrid Process. Our results show that the Siemens Process is the healthiest process, but with the Process Route Healthiness Index values are closer to the Hybrid Process. Apart from this, a guide to the assessment of inherent occupational health hazards in Si<sub>3</sub>C<sub>2</sub> production processes was also developed, which provides results alike those to the PHRI methodology.

© 2020 Institution of Chemical Engineers. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

### 1. Introduction

In recent years, the energy industry has paid special attention to productivity improvement, to waste reduction and to quality control, all in the areas of research, development, and manufacturing. This is due not only to the consideration of cost reduction, but also to the awareness of sustainability increase in the manufacturing process (Cave and Edwards, 1997). Although it is known that the processes of obtaining non-renewable energy impacts the environment in various ways. The processes of non-renewable energy production by their nature turn out to be potentially dangerous for human and environmental health (Owusu and Asumadu-Sarkodie, 2016).

To achieve this, there are two approaches to make these processes healthier, safer and more environmentally friendly, called internal and external means (Hassim and Edwards, 2006). However, the use of internal media, commonly known as an inherent

approach, turns out to be better, since it is based on the fundamental properties of the process, on the nature of the chemicals required by the process and on the conditions of the process (Adu et al., 2008; Warnasooriya and Gunasekera, 2017). If, in the inherent approach a chemical does not exist, it does not represent any danger. Therefore, the inherent approach requires less protection systems, which will make them more manageable (Edwards and Lawrence, 1993).

However, there are not many studies that assess the principles of inherent occupational health hazards in energy production processes from renewable sources. It is believed that renewable energy and its obtaining process turn out to be harmless. In spite of this, each one of the parameters or principles of health hazards has to be evaluated in order to compare and to decide which process is more appropriate under this approach.

Inside the renewable energies, the energy from the sun is the most abundant. It is estimated that it could cover around 35% of the total energy that the United States will require by 2050 (Fthenakis et al., 2009). Presently, research on the potential of solar energy continues on the economic, social and technical aspects, as well as being compared to the potential of fossil fuels. Contrary to fossil

\* Corresponding author.

E-mail address: [psegovia@ugto.mx](mailto:psegovia@ugto.mx) (J.G. Segovia-Hernández).

<https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.031>

0957-5820/© 2020 Institution of Chemical Engineers. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Loss Prevention in the Process Industries

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jlp](http://www.elsevier.com/locate/jlp)

## Incorporating the occupational health in the optimization for the methanol process

Luis Germán Hernández-Pérez <sup>a</sup>, Esbeydi Villicaña-García <sup>a</sup>, Brenda Cansino-Loeza <sup>a</sup>,  
Abdulrahman S. Alsuhaibani <sup>b</sup>, Mahmoud M. El-Halwagi <sup>a</sup>, José María Ponce-Ortega <sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. Francisco J. Múgica S/N, Building V1, Ciudad Universitaria Morelia, Mich., 58060, Mexico

<sup>b</sup> Chemical Engineering Department, Texas A&M University, 386 Spence St, Jack E. Brown Engineering Building, College Station TX, 77843, USA

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Methanol  
Natural/Shale gas  
Multi-objective optimization  
Metaheuristic algorithms  
Occupational health

### ABSTRACT

The analysis of social aspects, such as occupational health, is as important as economic and environmental criteria in the design of sustainable chemical processes. Occupational health analyzes the relationship between work and health while enabling the identification of hazards that can cause injuries due to chronic exposure of the workers. This paper presents a multi-objective optimization approach for the methanol production process from natural/shale gas, different alternatives are proposed for the process configurations based on different equipment and technologies. The objective functions consist of maximizing the net profit, minimizing the total annual CO<sub>2</sub> emissions, and minimizing the occupational health hazard. The Process Route Healthiness Index is used to evaluate occupational health. The process model is developed using the Aspen HYSYS® process simulator. To carry out the optimization, a metaheuristic algorithm is used; the improved multi-objective differential evolution (I-MODE) algorithm was used with programming in Microsoft Excel visual basic for applications. Linking routines are established to enable the transfer of values of the process variables. A set of decision variables are established in a search interval whose manipulation has a considerable impact on the performance of the objective functions. The results offer feasible alternatives for the values of the search variables and show a considerable improvement in the specified objective functions. Different scenarios are proposed to prioritize each of the objectives for which the decision-maker can make a selection of the best values and the configuration that best suits specific interests.

### 1. Introduction

The recent discovery of new shale gas reserves has motivated the development of technological alternatives for the monetization of gas in different value-added products (Al-Douri et al., 2017; Zhang and El-Halwagi, 2017). Methanol plays a fundamental role in the world economy, it is one of the most important chemical products because it serves as a feedstock to produce a large number of chemicals and supply chains (Riaz et al., 2013; Villicaña-García et al., 2020), it is estimated that methanol is used in the production of up to 30% industrial chemicals worldwide (Tountas et al., 2019).

Methanol can be produced from natural/shale gas (Hernández-Pérez et al., 2020a) via catalytic reforming (Alsuhaibani et al., 2020), where syngas is produced (Martínez-Gómez et al., 2017; Ehlinger et al., 2014). Steam reforming (SMR), partial oxidation (POx), and auto-thermal

reforming (ATR) are the conventional reforming alternatives used in the intermediate step of syngas production. It is well known that the reforming section of the methanol process is energy-intensive; therefore, large quantities of flue gases composed mainly of CO<sub>2</sub> are produced. For this reason, there has been growing interest in utilizing CO<sub>2</sub> as a feedstock for other chemical products, which is also a way to improve economic and environmental factors (Panu et al., 2019; Tilak and El-Halwagi, 2018). The methanol process is costly regarding the investment and operation, its reforming section accounts for the majority of expenses (Spash and Dayton, 2003), it is estimated that the investment cost of the reforming unit is around 60% at 70% of the total cost of a methanol plant (Blumberg et al., 2019).

The design of the process relies substantially on modeling and simulation, one of the main advantages to address the design in this way is that information about the process can be obtained, which allows its

\* Corresponding author.

E-mail address: [jose.ponce@umich.mx](mailto:jose.ponce@umich.mx) (J.M. Ponce-Ortega).

<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104660>

Received 13 May 2021; Received in revised form 26 September 2021; Accepted 11 October 2021

Available online 21 October 2021

0950-4230/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.



## Involving behavior of population in the strategic planning of integrated energy systems

Esbeydi Villicaña-García, Aurora de Fátima Sánchez-Bautista, José María Ponce-Ortega\*

Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. Francisco J. Múgica S/N, Ciudad Universitaria, Edificio VI, Morelia, Michoacán 58060, Mexico



### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 11 May 2021

Revised 31 August 2021

Accepted 27 October 2021

Available online 12 November 2021

#### Keywords:

Energy systems  
Strategic planning  
Behavior of population  
Matching law  
Supply chain  
Economic incentives

### ABSTRACT

This work presents a mathematical model for the strategic planning of the energy supply chain accounting for fossil fuels and biofuels. The proposed model considers the fuel extraction, production, processing, and distribution to the consumer, as well as the interaction with forest plantations to capture emissions generated in the whole process. Matching law is incorporated to predict, control and understand the situation under study. People's behavior has been included to determine their preference for deciding whether to install a refinery or a biorefinery. The decision is influenced by economic factors such as emissions taxation. The proposed approach was applied to a case study in Mexico, where the profit of the whole system, generated emissions, and jobs are considered. Results show that by implementing matching law it is possible to promote biofuels production together with fossil fuels, as well as to determine the preferences in the system.

© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

### 1. Introduction

Burning fossil fuels has been studied under numerous scenarios due to the huge impact on the environment by the associated greenhouse gas emissions that such a process has generated. Biofuels produced from renewable resources such as plants or organic wastes can help to minimize fossil fuel burning and mitigate the generation of CO<sub>2</sub> emissions as well as the dependence on fossil fuels (Naik et al., 2010). However, fossil fuels and biofuels have pros and cons; for example, CO<sub>2</sub> emissions for biodiesel are almost 20% of the emissions for oil diesel (De Paula Gomes and De Araújo, 2009), also water consumption for diesel production (United Nations Educational, 2017) reaches 0.2% of the required water for biodiesel production from soybean (Staples et al., 2013). In the short term, energy-related CO<sub>2</sub> emissions are influenced by factors such as weather, fuel prices, and disruptions in electricity generation. CO<sub>2</sub> emissions are influenced by policies to encourage low emitting technologies, new technologies that reduce costs and improve efficiency, demand-side efficiency gains, and economic trends such as the changing profile of manufacturing industries, Gross Domestic Product (GDP), and population (U.S. Energy Information Administration, 2020).

An extensive shift in the global energy system is necessary and all the energy sectors should find ways to reduce (Luh et al., 2020)

and mitigate CO<sub>2</sub> emissions for a better future (Shahandeh and Li, 2017). A carbon tax can reduce fossil-based energy use, lead to improved energy efficiency, and promote the development of renewable energy (Zhang et al., 2013); however, rational carbon taxation is crucial to avoid its defects (Bristow et al., 2010). For example, it would slow down economic growth, decrease social welfare and lead to carbon leakage (Lin and Li, 2011). Carbon leakage refers to the situation when for reasons of costs related to climate policies, the energy-intensive industry may relocate from countries with carbon controls to those without, and export its energy-intensive products back to the constrained countries (Babiker, 2005). It is well known that setting a price signal for pollution encourages polluting firms to reduce their emissions by purchasing abatement goods and services (Schwartz and Stahn, 2013). Programs for mitigating greenhouse gas emissions and promoting sustainable environmental performance have been developed for fuels and biofuels (Andersson, 2019), as well as carbon capture utilization (Leonzio et al., 2019). The world community must expect the development of countries by making better use of resources. The solution relies on both ascending fuel prices, and extra effective governmental (even global) policies in providing more incentives for renewable energy technologies and/or more taxes on fossil fuel consumption (Shakouri and Aliakbarisani, 2016).

In the natural systems, all components are integrated, and no waste is produced (Lambert and Boons, 2002). Eco-industrial parks (EIPs) are a way of demonstrating the application of industrial ecology and are subjects of increased interest for gov-

\* Corresponding author.

E-mail address: [jose.ponce@umich.mx](mailto:jose.ponce@umich.mx) (J.M. Ponce-Ortega).



## Intensification 4.0 of hydraulic fracturing process involving incentive schemes and the use of matching law

Esbeydi Villicaña-García<sup>a</sup>, Luis Fernando Lira-Barragán, José María Ponce-Ortega

<sup>a</sup>Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. Francisco J. Múgica S/N, Ciudad Universitaria, Edificio V1, Morelia, Michoacán, 58060, México

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Shale gas  
Intensification  
Uncertainty  
Water management  
Incentive schemes  
Behavior of population

### ABSTRACT

Due to the large amounts of water required in shale gas fracturing is necessary to find the correct planning and management of water resources. This work proposed a mathematical programming model capable of obtaining the optimal solution that considers the uncertainty associated with the amount of water required per well, as well as the fraction of water that returns to the surface. Economic incentive schemes are involved to promote the reuse of water and the use of treatments for contaminated water. The behavior of those involved is considered through the study of preference between treatments. This helps the process to be intensified by promoting the conservation of natural resources and decreasing flows of hazardous substances. The objective function is to reduce costs and satisfy water needs. The proposed approach was applied to a case study of the Marcellus and Barnett shale plays. The results show that there is better performance through the use of economic incentive schemes, demonstrating that costs can be reduced by 98.6% and freshwater consumption by 98.1%. In addition, knowing the preferences of the treatments it is possible to modify the incentives to favor process intensification 4.0 as well as the needs of the stakeholder decisions.

### 1. Introduction

U.S dry natural gas production in 2020 was about 33.5 trillion cubic feet, the second-highest annual amount recorded. Most of the production increases since 2005 are the result of horizontal drilling and hydraulic fracturing techniques, notably in shale, sandstone, carbonate, and other tight geologic formations [1]. Natural gas trapped under shale formation or shale gas is an increasingly valuable energy resource in the United States [2]. Shale gas reserves have been identified as a possible additional energy source with useful, abundant, and environment-friendly features [3]. To obtain the gas trapped in the subsoil, hydraulic fracturing has been used, which consists of a stimulation technique used to increase the production of hydrocarbons from poor quality and low permeability reservoirs [4]. The process involves the injection of water containing chemical additives and proppant under high pressure to fracture the shales [5]. Water issues such as the withdrawal of water for the hydraulic fracturing process and the treatment and/or disposal of wastewater (flowback and produced fluids) must ensure that they occur within acceptable environmental and regulatory limits [6]. Water quality and quantity are inextricably linked; water quality degradation not only poses threats to environmental

sustainability and public health, but also increases the competition for freshwater and causes quantity depletion and intensifies water scarcity [7]. It is important to have better water management strategies such as water reuse and recycling technologies [8]. Reuse means that the effluent from a water-using operation is sent to other operations and does not re-enter operations where it is generated, a recycle scheme permits the effluent to re-enter the operations where it is emitted. The use of water distribution networks allows for better management of the resource by involving the flow rate targeting and the network design [9]. Additionally, the correct management of water must be considered to satisfy the needs of society over the lifetime of the infrastructure while also maintaining key ecological functions that support the long-term provision of ecosystem goods, services and values, including biodiversity maintenance [10], together with design and planning of the shale gas supply chain [11].

Water management strategy is a complex task because of the availability of various sources of water [12], it involves both water availability and demand; however, it is important to compare not only management strategies for future states, but also consider the pathway towards the future state to include human response to natural variability [13]. It is important to obtain sustainable solutions when using water management through storage and distribution in macroscopic systems,

\* Corresponding author.

E-mail address: [esbeydi.villicana@umich.mx](mailto:esbeydi.villicana@umich.mx) (E. Villicaña-García).

<https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108968>

Received 10 December 2021; Received in revised form 27 April 2022; Accepted 3 May 2022

Available online 13 May 2022

0255-2701/© 2022 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 2. Artículo en proceso

Se muestra un artículo de difusión que de acuerdo a la revista “Saber más” será publico en Mayo 2023.



Saber Más: Revista de Divulgación  
Año 11  
Revista con Arbitraje y Comité Editorial  
Registro ISSN: 2007-7041

Morelia, Michoacán a 06 de octubre de 2022

Estimados: **Esbeydi Villicaña-García** y **José María Ponce-Ortega**:

Nos resulta muy grato comunicarles que el comité editorial de la Revista Saber Más ha tomado la decisión de **ACEPTAR** el artículo de divulgación científica “Gas *sahle* o gas de lutitas: Un combustible no convencional” que será publicado en un próximo número de Saber Más. Agradecemos su colaboración y les invitamos a seguir colaborando, así como a ayudarnos a difundir Saber Más.



Dr. Horacio Cano Camacho  
Editor

REVISTA DE DIVULGACIÓN Saber Más, ES UNA REVISTA SIN FINES DE LUCRO. LAS EXPRESIONES SON RESPONSABILIDAD DE LOS AUTORES. COMITÉ EDITORIAL: DR. RAFAEL SALGADO GARCIGLIA (DIRECTOR), DR. HORACIO CANO CAMACHO (EDITOR), DR. MARCO ANTONIO LANDAVAZO ARIAS, DR. CEDERIK LEÓN DE LEÓN ACUÑA, DRA. EK DEL VAL DE GORTARI, M.C. ANA CLAUDIA NEPOTE GONZÁLEZ, DR. LUIS MANUEL VILLASEÑOR CENDEJAS Y DR. JUAN CARLOS ARTEAGA VELÁZQUEZ.

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
Edificio C2 ° Ciudad Universitaria ° C.P. 58030 ° Morelia, Michoacán ° [www.sabermas.umich.mx](http://www.sabermas.umich.mx)  
[sabermasumich@gmail.com](mailto:sabermasumich@gmail.com) ° Tel. (443) 322 3500

### 3. Artículo en revisión

Se presenta además un trabajo en revisión en la revista “Sustainable Production and Consumption”.

## **Applying the “Matching Law” Optimization Approach to Promote the Sustainable Use of Resources in the Water-Energy-Food Nexus**

*Esbeydi Villicaña-García<sup>†</sup>, Brenda Cansino Loeza<sup>†</sup>, José María  
Ponce-Ortega<sup>†\*</sup>*

*<sup>†</sup> Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,  
Av. Francisco J. Múgica S/N, Ciudad Universitaria, Edificio VI, Morelia, Michoacán,  
58060, México*

*\* Corresponding author: J.M. Ponce-Ortega*

*E-mail: [jose.ponce@umich.mx](mailto:jose.ponce@umich.mx)*

*Tel. +52 443 3223500 ext. 1277*

*Fax. +52 443 3273584*

#### 4. Capítulos de libros

Anton A. Kiss, Edwin Zondervan, Richard Lakerveld, Leyla Özkan (Eds.)  
Proceedings of the 29<sup>th</sup> European Symposium on Computer Aided Process Engineering  
June 16<sup>th</sup> to 19<sup>th</sup>, 2019, Eindhoven, The Netherlands. © 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818634-3.50168-5>

### **Sustainable Strategic Planning for a National Natural Gas Energy System Accounting for Unconventional Sources**

**Esbeydi Villicaña-García<sup>a</sup>**, Betzabe González-Campos<sup>a</sup>, José María Ponce-Ortega<sup>a,\*</sup>

*<sup>a</sup>Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. Francisco J. Múgica S/N, Ciudad Universitaria, Edificio V1, Morelia, Michoacán, 58060, México*

*[jmponce@umich.mx](mailto:jmponce@umich.mx)*

PROCEEDINGS OF THE 31<sup>st</sup> European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE31) June 6<sup>th</sup> to 9<sup>th</sup>, 2021, Istanbul, Turkey.  
M. Türkay, R. Gani (Editors). © 2021 Elsevier B.V. All rights reserved.  
<http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-88506-5.50264-3>

### **Planning production of solar grade silicon to yield solar panels involving behaviour of population**

**Esbeydi Villicaña-García<sup>a</sup>**, César Ramírez-Márquez<sup>b</sup>, Juan Gabriel Segovia-Hernández<sup>b</sup>, José María Ponce-Ortega<sup>a,\*</sup>

*<sup>a</sup>Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. Francisco J. Múgica S/N, Ciudad Universitaria, Edificio V1, Morelia, Michoacán, 58060, México*

*<sup>b</sup>Chemical Engineering Department, Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato, Guanajuato, 36005, México*

*[jmponce@umich.mx](mailto:jmponce@umich.mx)*