



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**DISEÑO DE ESTRATEGIAS PARA LA LOCALIZACIÓN
ÓPTIMA DE PLANTAS INDUSTRIALES**

TESIS

Presentada por:

LUIS FERNANDO LIRA BARRAGÁN

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

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

ASESOR:

D.C. JOSÉ MARÍA PONCE ORTEGA

Morelia, Mich. Febrero 2011

Resumen
**DISEÑO DE ESTRATEGIAS PARA LA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE PLANTAS
INDUSTRIALES**

Por
I.Q. Luis Fernando Lira Barragán
Febrero de 2011
Maestro en Ciencias en Ingeniería Química
Dirigida por: Dr. José María Ponce Ortega

El presente trabajo propone incluir aspectos ambientales en la decisión de la localización de nuevas plantas industriales, en específico se restringen las composiciones y flujos de contaminantes en los ríos y en el destino final de los mismos, logrando mantener la calidad del agua en los cuerpos de aguas superficiales. Sin duda, la parte económica tiene mucho peso en este tipo de decisiones, por lo que la función objetivo a minimizar es el costo total anual. Para lograr esta tarea, se integra la descarga acuosa de la nueva planta que se desee instalar en una región determinada con todas las descargas y extracciones existentes en el río; en este sentido, se utiliza la técnica del análisis del flujo de los materiales, la cual considera también los fenómenos naturales que ocurren en los ríos como la precipitación, evaporación, filtración, etc. así como las reacciones químicas y bioquímicas que llevan a cabo la flora y fauna establecidas en el sistema. Esta herramienta es útil para predecir el comportamiento de los ríos al ser impactados por la descarga de la nueva planta en cualquier sitio que se encuentre disponible para su ubicación. Es importante mencionar que en este trabajo se desarrollaron dos modelos: el primero basado en un componente clave peligroso sin abordar el diseño interno de la planta, el segundo incluye la integración másica de las corrientes internas de la planta a través de una superestructura basada en múltiples contaminantes.

Además se incluye un modelo disyuntivo para la localización óptima de la nueva planta, obteniendo modelos mixto-entero no lineales (*MINLP*), que son generales y pueden ser aplicados a cualquier sistema. Uno de los propósitos de mayor relevancia es contribuir a la sustentabilidad del río, lo cual se logra con la imposición de restricciones que eviten la acumulación de contaminantes, así como mantener en condiciones óptimas la calidad del agua en el río. Finalmente, para mostrar la aplicación de los modelos, se proponen dos casos de estudios, los cuales, presentan un análisis detallado de la correlación entre los diferentes escenarios ambientales posibles con los costos totales anuales.

Dedicatoria

A Mi Madre. María de Lourdes Barragán Valladares

Gracias por haberme dado la vida, gracias por todo tu amor y apoyo mamá. También agradecerte por ser la persona que nos ha encaminado y enseñado las lecciones más importantes de la vida y que es la vida misma. Tus enseñanzas han sido muy importantes para mí, las cuales me han sacado adelante en momentos muy decisivos.

A Mi Novia. Nancy Alvarado Luna

Por todos los momentos agradables que hemos pasado, también por los tiempos difíciles que siempre han sido mejores a tu lado. Por todo tu amor, por estar siempre conmigo. Te Amo!!

A Mis Hermanos. Hugo Antonio Lira Barragán, Lourdes Ivette Lira Barragán y Tania Vanessa Martínez Barragán

Hermanos le doy gracias a la vida por estar compartiendo nuestras experiencias en familia, gracias por su apoyo incondicional. Los quiero!

A Manuel Martínez Benavídes

Gracias por todos los consejos y por el apoyo que me has brindado, tal vez sin merecerlo. Muchas Gracias!

A Mis Amigos. Algunos son: Caleb, Arís, Eusiel, Oscar, Julián, Fabrício

Por acudir a mis llamados y estar siempre dispuestos a ayudarme. Gracias por su apoyo y palabras de aliento, saben que en mi tienen un amigo sincero.

Índice

Resumen.....	iii
Índice de Tablas.....	vii
Índice de Figuras.....	ix
Nomenclatura.....	x
Agradecimientos.....	xx
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Objetivo.....	1
1.2.1 Objetivo General.....	1
1.2.2 Objetivos Particulares.....	1
1.3 Justificación.....	2
1.4 Antecedentes.....	2
1.5 Alcance.....	4
1.6 Hipótesis.....	4
Capítulo 2. Marco Teórico.....	5
2.1 Aspectos Generales de los Ríos.....	5
2.2 Integración Másica de Procesos.....	7
2.3 Formulación Inversa.....	9
2.4 Localización de Plantas Industriales.....	10
2.5 Planteamiento del Problema.....	11

2.5.1 Modelo sin Integración Másica y Basado en un sólo Componente (Capítulo 3).....	11
2.5.2 Modelo con Integración Másica Considerando Múltiples Contaminantes (Capítulo 4).....	14
Capítulo 3. Modelo sin Integración Másica Basado en un sólo Componente.....	19
3.1 Metodología.....	19
3.2 Resultados y Discusión.....	27
Capítulo 4. Modelo con Integración Másica Considerando Múltiples Contaminantes.	39
4.1 Metodología.....	39
4.2 Resultados y Discusión.....	49
Conclusiones.....	61
Bibliografía.....	62
Apéndices.....	67

Índice de Tablas

Tabla 3.1 Costos de instalación de los diferentes sitios para el Ejemplo 1.....	28
Tabla 3.2 Costo del tratamiento para los interceptores disponibles para el Ejemplo 1.....	30
Tabla 3.3 Comparación de resultados para una restricción de 1.3 ppm en el Ejemplo 1.....	31
Tabla 3.4 Análisis de sensibilidad del costo total anual y las restricciones de sustentabilidad para cada sitio en el Ejemplo 1.....	32
Tabla 3.5 Costos de instalación para el Ejemplo 2.....	34
Tabla 3.6 Datos de los interceptores disponibles para el Ejemplo 2.....	35
Tabla 3.7 Comparación de resultados para diferente restricciones de sustentabilidad en el Ejemplo 2.....	37
Tabla 3.8 Costos totales para diferentes restricciones de sustentabilidad y algunos de los sitios disponibles en el Ejemplo 2.....	38
Tabla 3.9 Tamaño y tiempo de cómputo para los problemas considerados.....	38
Tabla 4.1 Costos de instalación para los distintos sitios disponibles para ubicar la nueva planta industrial en el Ejemplo 1.....	49
Tabla 4.2 Suposiciones utilizadas para el Ejemplo 1.....	51
Tabla 4.3. Corrientes de proceso y frescas para el Ejemplo 1.....	52
Tabla 4.4 Requerimientos de los equipos de proceso del Ejemplo 1.....	52
Tabla 4.5 Características de los interceptores disponibles para el Ejemplo 1.....	52
Tabla 4.6 Costos de instalación para el Ejemplo 2.....	56
Tabla 4.7 Suposiciones del Ejemplo 2.....	56
Tabla 4.8 Corrientes de proceso y frescas para el Ejemplo 2.....	57

Tabla 4.9 Requerimientos de los equipos de proceso del Ejemplo 2.....	57
Tabla 4.10 Interceptores disponibles para el Ejemplo 2.....	58
Tabla 4.11 Tamaño y tiempo de cómputo para los problemas considerados.....	59

Índice de Figuras

Figura 2.1 Redes de reciclado directo.....	8
Figura 2.2 Redes de reciclado y reúso.....	8
Figura 2.3 Modelo directo para el análisis de un proyecto nuevo.....	9
Figura 2.4 Formulación inversa para el análisis de un proyecto nuevo.....	10
Figura 2.5 Representación de la localización de la nueva planta industrial.....	13
Figura 2.6 Alternativas para localizar la nueva planta industrial, contemplando el manejo de múltiples contaminantes.....	16
Figura 2.7 Superestructura para la red de reciclado/reúso.....	18
Figura 3.1 Red de intercepción para la corriente de desecho de la nueva planta.....	24
Figura 3.2 Sitios candidatos para la localización de la nueva planta en el Ejemplo 1.....	29
Figura 3.3 Curva Pareto para el Ejemplo 1.....	32
Figura 3.4 Localizaciones disponibles para la nueva planta industrial para el Ejemplo 2.....	33
Figura 3.5 Curva Pareto para el Ejemplo 2.....	38
Figura 4.1 Sitios disponibles para la localización de la nueva planta industrial con restricciones para el Ejemplo 1.....	50
Figura 4.2 Solución óptima del Ejemplo 1.....	53
Figura 4.3 Localizaciones disponibles para la nueva planta industrial, incluyendo concentraciones y restricciones de contaminantes para el Ejemplo 2.....	55
Figura 4.4 Solución óptima para el Ejemplo 2.....	60

Nomenclatura

Debido a que en este trabajo se presentan dos metodologías distintas (Capítulo 3 y Capítulo 4), la nomenclatura que se presenta a continuación ha sido clasificada para cada una de ellas, con la finalidad de lograr un mejor entendimiento.

Nomenclatura del Modelo para el Capítulo 3

- $A_{r,t}$ Área de riego del efluente t que descarga en el tramo r , acre o ha
- CD_r Concentración de las descargas directas al tramo r , ppm
- $CD_{r,t}$ Concentración de las descargas agrícolas del efluente t al tramo r , ppm
- CH_r Concentración de la descarga total (por ejemplo: industriales + sanitarias) al tramo r , ppm
- $CI_{r,t}$ Concentración de descargas industriales del efluente t al tramo r , ppm
- CL_r Concentración de las pérdidas totales (filtración y evaporación) del tramo r , ppm
- $CL_{r,t}$ Concentración de las pérdidas totales (filtración y evaporación) del efluente t , ppm
- $CLAND_p$ Costo de instalación anualizado de la nueva planta industrial en el sitio p , \$/año
- CP_r Concentración de la precipitación que entra al tramo r , ppm
- $CP_{r,t}$ Concentración de la precipitación descargada del efluente t al tramo r , ppm
- $CPNEW_p$ Concentración del contaminante descargado por la nueva planta en el sitio p , ppm
- CQ_r Concentración del flujo de salida del tramo de río r , ppm
- CQ_{r-1} Concentración del flujo de entrada del tramo de río r , ppm
- CQ^{final} Concentración del contaminante descargado al reservorio final, ppm

$CT_{r,t}$	Concentración de la descarga del efluente t al tramo de río r , ppm
CU_r	Concentración del agua usada del tramo r , ppm
$CU_{r,t}$	Concentración del agua usada del efluente t que descarga en el tramo r , ppm
$CS_{r,t}^{tratada}$	Concentración de las descargas residuales sin tratamiento al tramo r del efluente t , ppm
$CS_{r,t}^{notratada}$	Concentración de las descargas residuales tratadas al tramo r del efluente t , ppm
$D_{r,t}$	Descargas agrícolas al efluente t que descarga en el tramo r , m ³ /s
D_r	Descargas directas al tramo r , m ³ /s
FC^j	Costo fijo para el interceptor j , \$/año
$FT_{r,t}$	Descarga del efluente t al tramo r , m ³ /s
f_j	Flujo segregado del desecho de la nueva planta industrial al interceptor j
f^{UP}	Límite superior de f_j
H_y	Horas de operación de la planta por año, hr/año
H_r	Descarga total (por ejemplo: industriales + sanitarias) al tramo r , m ³ /s
$I_{r,t}$	Descarga industrial del efluente t al tramo r , m ³ /s
J	Conjunto para los interceptores
k	Constante cinética de la degradación del contaminante en el sistema
k_f	Factor de anualización
$L_{r,t}$	Pérdidas totales (filtración y evaporación) del efluente t , m ³ /s

L_r	Pérdidas totales (filtración y evaporación) del tramo r , m^3/s
N_j	Número total de interceptores
N_p	Número total de sitios disponibles para localizar la nueva planta
N_r	Número total de tramos de río
N_t	Número total de efluentes
$N R$	Subconjunto para los tramos de río que requieren restricciones de composición
P	Conjunto de los sitios disponibles para localizar a la nueva planta
$P_{r,t}$	Precipitación descargada del efluente t al tramo r , m^3/s
P_r	Precipitación descargada al tramo r , m^3/s
Q_r	Flujo de salida del tramo r , m^3/s
Q_{r-1}	Flujo de entrada al tramo r , m^3/s
$QPNEW_p$	Flujo descargado por la nueva planta en el sitio p
$QPNEWDATA$	Flujo descargado por la nueva planta
R	Conjunto para los tramos de río
r_r	Reacción química llevada a cabo en el tramo r
$r_{r,t}$	Reacción química llevada a cabo en el efluente t del tramo r
$S_{r,t}^{notrada}$	Descarga residual sin tratamiento del efluente t al tramo r , m^3/s
$S_{r,t}^{tratada}$	Descarga residual tratada del efluente t al tramo r , m^3/s

T	Conjunto para los efluentes
TAC	Costo total anual, \$/año
$U_{r,t}$	Extracción de agua del efluente t que descarga al tramo r , m^3/s
U_r	Extracción de agua del tramo r , m^3/s
VC^j	Costo variable del interceptor j , \$/ton año
$V_{r,t}$	Volumen del efluente t descargado al tramo r , m^3
V_r	Volumen del tramo r , m^3
W_p	Variable booleana para la localización de la nueva planta industrial
w_p	Variable binaria para la localización de la nueva planta industrial
$y_n^{deseada}$	Límite para las concentraciones deseadas en algunos tramos
y^{disc}	Concentración del contaminante para la descarga final de la nueva planta al río
y^{RegAmb}	Regulación ambiental para la concentración del contaminante a ser descargada por la nueva planta
y^{in}	Concentración del contaminante a la salida de la planta y a la entrada al sistema de tratamiento
y_j^{out}	Concentración del contaminante a la salida del interceptor j
$y^{sustentable}$	Restricción de sustentabilidad en la disposición final
z_j	Variable binaria asociada a la existencia del interceptor j

Símbolos Griegos

$\alpha_{r,t}$	Flujo agrícola por área, m ³ /ha*s
$\beta_{r,t}$	Uso agrícola de agua del efluente t , m ³ /ha s
γ_j	Factor de eficiencia para remover el contaminante del interceptor j
δ	Número pequeño

Índices

j	Interceptor
n	Tramos de río que requieren una restricción de composición
p	Sitio para localizar la nueva planta
r	Tramo de río
t	Efluente
UP	Límite superior

Nomenclatura del Modelo del Capítulo 4

$A_{r,t}$	Área de riego del efluente t que descarga en el tramo r , acre o ha
$CD_{c,r}$	Concentración de los contaminantes de las descargas directas al tramo r , ppm
$CD_{c,r,t}$	Concentración de los contaminantes de las descargas agrícolas del efluente t al tramo r , ppm
$CH_{c,r}$	Concentración de los contaminantes de la descarga total (por ejemplo: industriales + sanitarias) al tramo r , ppm

-
- $CI_{c,r,t}$ Concentración de los contaminantes de descargas industriales del efluente t al tramo r , ppm
- $CL_{c,r}$ Concentración de los contaminantes de las pérdidas totales (filtración y evaporación) del tramo r , ppm
- $CL_{c,r,t}$ Concentración de los contaminantes de las pérdidas totales (filtración y evaporación) del efluente t , ppm
- $Cland_p$ Costo de instalación anualizado de la nueva planta industrial en el sitio p , \$/año
- $CP_{c,r}$ Concentración de los contaminantes de la precipitación que entra al tramo r , ppm
- $CP_{c,r,t}$ Concentración de los contaminantes de la precipitación descargada del efluente t al tramo r , ppm
- $CPNEW_{c,p}$ Concentración de los contaminantes descargados por la nueva planta en el sitio p , ppm
- $CQ_{c,r}$ Concentración de los contaminantes del flujo de salida del tramo de río r , ppm
- $CQ_{c,r-1}$ Concentración de los contaminantes del flujo de entrada del tramo de río r , ppm
- CQ_c^{final} Concentración de los contaminantes descargados al reservorio final, ppm
- $CT_{c,r,t}$ Concentración de los contaminantes de la descarga del efluente t al tramo de río r , ppm
- $CU_{c,r}$ Concentración de los contaminantes del agua usada del tramo r , ppm
- $CU_{c,r,t}$ Concentración de los contaminantes del uso de agua del efluente t que descarga en el tramo r , ppm

$CS_{c,r,t}^{tratada}$	Concentración de las descargas residuales sin tratamiento al tramo r del efluente t , ppm
$CS_{c,r,t}^{notratada}$	Concentración de las descargas residuales tratadas al tramo r del efluente t , ppm
$D_{r,t}$	Descargas agrícolas al efluente t al tramo r , m^3/s
D_r	Descargas directas al tramo r , m^3/s
$EqPipC$	Costo de tuberías para enviar las corrientes a los equipos de proceso, $\$/m^3$
F_k	Flujo total de la corriente fresca k , m^3/s
$f_{k,j}$	Flujo segregado de la corriente fresca k al equipo j , m^3/s
$FixC^{int}$	Costo fijo del interceptor int , $\$/año$
$FreC_k$	Costo unitario de la corriente fresca k , $\$/m^3$
$FrPipC$	Costo de tubería para enviar las corrientes frescas a los equipos de proceso, $\$/m^3$
$FT_{r,t}$	Descarga del efluente t al tramo r , m^3/s
G_j	Flujo total del equipo de proceso j , m^3/s
$g_{i,j}^{int}$	Flujo segregado de los interceptores int al equipo de proceso j de la corriente de proceso i , m^3/s
$g_{i,Waste}^{int}$	Flujo segregado de los interceptores int al desperdicio, de la corriente de proceso i , m^3/s
H_Y	Horas de operación de la planta por año, hr/año
H_r	Descarga total (por ejemplo: industriales + sanitarias) al tramo r , m^3/s
I	Conjunto para las corrientes de proceso, $i i=1,\dots,N_i$

INT	Conjunto para los interceptores, $int int = 1, \dots, N_{int}$
$I_{r,t}$	Descarga industrial del efluente t al tramo r , m^3/s
k_c	Constante cinética de la degradación del contaminante c en el sistema
k_f	Factor de anualización
K	Conjunto para las corrientes frescas, $k k = 1, \dots, N_k$
$L_{r,t}$	Pérdidas totales (filtración y evaporación) del efluente t , m^3/s
L_r	Pérdidas totales (filtración y evaporación) del tramo r , m^3/s
N_c	Número total de componentes
N_i	Número total de corrientes de proceso
N_{int}	Número total de interceptores
N_j	Número total de equipos de proceso
N_k	Número total de corrientes frescas
N_p	Número total de sitios disponibles para localizar la nueva planta industrial
N_r	Número total de tramos de río
N_t	Número total de efluentes
$N R$	Subconjunto para tramos de río que requieren restricciones de composición
P	Conjunto de los sitios disponibles para localizar a la nueva planta, $p p = 1, \dots, N_p$

$P_{r,t}$	Precipitación descargada del efluente t al tramo r , m^3/s
P_r	Precipitación descargada al tramo r , m^3/s
Q_r	Flujo de salida del tramo r , m^3/s
Q_{r-1}	Flujo de entrada al tramo r , m^3/s
$QPNEW_p$	Flujo descargado por la nueva planta en el sitio p
R	Conjunto para los tramos de río, $r r = 1, \dots, N_r$
r_r	Reacción química llevada a cabo en el tramo r
$r_{r,t}$	Reacción química llevada a cabo en el efluente t del tramo r
$S_{r,t}^{notratada}$	Descarga residual sin tratamiento del efluente t al tramo r , m^3/s
$S_{r,t}^{tratada}$	Descarga residual tratada del efluente t al tramo r , m^3/s
T	Conjunto para los efluentes, $t t = 1, \dots, N_t$
TAC	Costo total anual, $\$/año$
$TrPipC$	Costo de tuberías del tratamiento, $\$/m^3$
$U_{r,t}$	Extracción de agua del efluente t que descarga al tramo r , m^3/s
U_r	Extracción de agua del tramo r , m^3/s
$VarC^{int}$	Costo variable del interceptor int , $\$/m^3$
$V_{r,t}$	Volumen del efluente t descargado al tramo r , m^3
V_r	Volumen del tramo r , m^3

W_i Flujo total de las corrientes de proceso i , m^3/s

w_i^{int} Flujo segregado de la corriente de proceso i al interceptor int , m^3/s

$WaPipC$ Costo de tubería de enviar las corrientes tratadas al desecho, $\$/m^3$

$Waste$ Flujo total de la corriente de desecho al ambiente, m^3/s

Y_p Variable booleana para la localización de la nueva planta industrial

y_p Variable binaria para la localización de la nueva planta industrial

$y_{c,n r}^{deseada}$ Concentraciones deseadas en algunos tramos

y_c^{disc} Concentración del contaminante para la descarga final de la nueva planta al río

$y_c^{disc,max}$ Regulación ambiental para la concentración del contaminante c a ser descargada por la nueva planta

$y_c^{sustentable}$ Restricción de sustentabilidad en la disposición final

z_i^{int} Variable binaria asociada a la existencia del interceptor int de la corriente de proceso i

Símbolos Griegos

$\alpha_{r,t}$ Flujo agrícola por área, $m^3/ha*s$

$\beta_{r,t}$ Uso agrícola de agua del efluente t , $m^3/ha s$

γ_c^{int} Factor de eficiencia para remover el contaminante c del interceptor int

δ Número pequeño, $1e10^{-3}$

Índices

c Componente

<i>i</i>	Corriente de proceso
<i>int</i>	Interceptor
<i>In</i>	Entrada
<i>j</i>	Equipo
<i>k</i>	Corriente Fresca
<i>LO</i>	Límite Inferior
max	Máximo
min	Mínimo
<i>n r</i>	Tramos de río que requieren una restricción
<i>Out</i>	Salida
<i>p</i>	Sitio disponible para localizar la nueva planta
<i>r</i>	Tramo de río
<i>Sink</i>	Equipo
<i>Source</i>	Corriente de proceso
<i>t</i>	Efluente
<i>UP</i>	Límite superior
<i>Waste</i>	Desecho descargado al ambiente

Agradecimientos

A Mi Asesor. Dr. José María Ponce Ortega

Gracias por transmitirme el conocimiento adquirido que me ha motivado a continuar en el camino de la investigación. Es usted el más claro ejemplo de que el conocimiento de una persona no depende de la edad. Usted y el **Dr. Medardo Serna González** no solo han contribuido a mi formación profesional y ética, también han aportado mucho en la parte personal. Son grandes ejemplos como personas.

To Professor Mahmoud El-Halwagi

For give me the opportunity to stay at the Texas A&M University, enriching this project with his experience and knowledge. I hope that the stay is just the beginning of a fruitful professional and personal relationship.

Al Comité Tutorial. Dr. Medardo Serna González, Dr. Agustín Jaime Castro Montoya, Dr. Marco Antonio Martínez Cinco y Dra. Ma. Del Carmen Chávez Parga

Por sus aportaciones y mejoras.

Al Conacyt

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo que me otorgaron para realizar mis estudios de Maestría. Gracias por su valioso patrocinio.

A Mi Querida Universidad

Agradezco a mi Universidad por ofrecerme continuar preparándome y formándome, realizando mis estudios de posgrado.

A Mi País

Por haberme brindado la oportunidad de alcanzar este grado. Me siento realmente orgulloso de ser **Mexicano**, ojalá este sentimiento lo compartiéramos más Mexicanos.

Luís Fernando Lira Barragán

Capítulo 1. Introducción

1.1 Generalidades

Cuando se inició el desarrollo industrial los únicos aspectos que prevalecieron en las decisiones del diseño, capacidad y localización de una nueva planta fueron los económicos, dejando de lado los aspectos ambientales. Para ese entonces no se tenía en claro el daño que se le estaba provocando al ambiente, tanto por las descargas acuosas a las cuencas como por las emisiones gaseosas a la atmósfera y la disposición inapropiada de residuos sólidos. Posteriormente, cuando se tomó consciencia del daño ambiental que provocaban las descargas residuales emitidas por las industrias, éstas comenzaron a ser reguladas, por lo que ahora las descargas tienen que ser tratadas antes de ser arrojadas al ambiente para satisfacer las regulaciones ambientales. Sin embargo, si se visualiza el proceso global, la prioridad sigue estando en los aspectos económicos, sin que los aspectos ambientales jueguen un papel importante en las decisiones industriales. Recientemente se han realizado esfuerzos para incluir al ambiente dentro de este tipo de decisiones, tratando de dañarlo lo menos posible y cuidando que la contaminación generada sea equiparable a lo que el ambiente por sí mismo sea capaz de “*auto depurar*”; dicho en otras palabras, la finalidad será cerrar ciclos como lo hace la misma naturaleza en sus procesos y de esta manera lograr sistemas sostenibles.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Desarrollar una metodología para determinar la localización óptima de una nueva planta industrial considerando simultáneamente aspectos económicos y aspectos ambientales.

1.2.2 Objetivos Particulares

- Diseñar una estrategia que permita establecer la localización óptima de plantas industriales basada en el control de un sólo contaminante.
- Implementar la metodología obtenida en la plataforma de programación *GAMS* y obtener los resultados de la formulación.

- Obtener un modelo que permita la integración másica interna de la planta con sus alrededores además de generalizar el modelo obtenido para que permita el control de múltiples contaminantes.

1.3 Justificación

Hoy en día los aspectos económicos son los que tienen más importancia en la toma de decisiones industriales, tal es el caso de la localización final de nuevas plantas industriales. Sin embargo, los aspectos ambientales se han convertido en un tema de relevancia debido a la contaminación ambiental actual. En este sentido, este trabajo propone incluir aspectos ambientales en la localización de una nueva planta industrial, donde se imponen restricciones máximas permitidas de contaminantes, tanto al río que recibirá la descarga acuosa de la planta industrial, como al destino final del mismo (lago, mar u océano). Además, la integración másica de procesos es una estrategia que actualmente permite un mejor aprovechamiento de las corrientes internas del proceso, la cual ha mostrado grandes beneficios económicos y ambientales. En este sentido, después de satisfacer las restricciones ambientales se deben buscar las mejores soluciones desde el punto de vista económico, el cual sigue siendo primordial para los inversionistas. En resumen, debido a la problemática ambiental actual, es necesaria la búsqueda de alternativas o estrategias que permitan disminuir el daño provocado al ambiente y obtener procesos económica y ambientalmente sostenibles.

1.4 Antecedentes

La técnica del análisis de flujo de los materiales (*MFA*) es muy útil para monitorear las especies químicas que causan contaminación en los ríos y analizar las causas de los problemas de contaminación en una región considerando todas las actividades relevantes que puede intercambiar flujos de agua con las cuencas y drenajes como lo son la industria, zonas agrícolas, zonas residenciales e incluso en los lugares donde sea importante considerar el flujo aportado por la lluvia, éste no debe de ser excluido, además de los fenómenos físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo en los ríos (Brunner y Rechberg, 2004). Baccini y Brunner (1991) desarrollaron un modelo *MFA* para analizar ecosistemas con actividades humanas donde se intercambia materia, energía e información con los alrededores. Así mismo, Lampert y Brunner (1999) propusieron un modelo *MFA* para rastrear los principales nutrientes descargados en el río

Danubio. El-Baz y col. (2005a) desarrollaron un modelo *MFA* en el sistema de drenaje Bahr El-Baquer para rastrear compuestos nitrogenados. Mientras que El-Baz y col. (2005b) propusieron un modelo *MFA* para incluir la integración másica en el mismo sistema de drenaje Bahr El-Baquer de Egipto.

Por otro lado, se han reportado varias metodologías enfocadas a las estrategias de reciclaje/reúso para la conservación de los recursos dentro de las instalaciones industriales (véase por ejemplo Dunn y El-Halwagi, 2003; El-Halwagi, 1997, 2006; El-Halwagi y Spriggs, 1998). Estas metodologías logran un uso eficiente de los recursos, reduciendo las corrientes de desecho descargadas al ambiente, y que desde el punto de vista ambiental, cumplen la restricción especificada para la corriente de descarga. Además, estas metodologías de conservación de los recursos pueden clasificarse como técnicas pinch y técnicas formuladas como modelos matemáticos (ver Pillai y Bandyopadhyay, 2007). Las tecnologías pinch usan reglas heurísticas basadas en objetivos específicos de composición dirigiendo el diseño a aproximaciones secuenciales. Foo (2009) presentó una revisión de las técnicas pinch para la síntesis de redes de agua (ver por ejemplo: Wang y Smith, 1994; Dhole y col., 1996; El-Halwagi y Spriggs, 1998; Polley y Polley, 2000; Hallale, 2002; Manan y col., 2004; El-Halwagi y col., 2003; Feng y col., 2007). Otro conjunto de metodologías basadas en técnicas algebraicas para la conservación de recursos han sido reportadas por Sorin y Bedard (1999), Agrawal y Shenoy (2006), y Gomes y col. (2007). Finalmente, también se han reportado formulaciones de modelos matemáticos para automatizar la síntesis de redes de reciclaje y reúso dentro de la planta (ver por ejemplo: Savelski y Bagajewicz, 2000, 2001, 2003; Alva-Argaez y col., 1998, 1999; Benko y col., 2000; Teles y col., 2008; Gabriel y El-Halwagi, 2005; Kuo y Smith, 1997; Doyle y Smith, 1997; Galan y Grossmann, 1998; Hernandez-Suárez y col., 2004; Gunaratman y col., 2005; Karuppiah y Grossmann, 2006; Putra y Amminudin, 2008; Ponce-Ortega y col., 2009a, 2010; Nápoles-Rivera y col., 2010). Sin embargo, todas las formulaciones previas consideran exclusivamente los procesos que ocurren dentro de la planta, ignorando los procesos que ocurren afuera de la misma; es decir, la forma en que estas descargas afectan al ambiente, por lo que desatienden la conservación de los ríos y lagos al no mantener dentro de los límites permitidos la composición de contaminantes o propiedades de las descargas para garantizar la sobrevivencia de la flora y fauna del medio acuático.

El trabajo de Lovelady y col. (2009) fue el primero en introducir una aproximación para integrar las descargas de un proceso industrial con cuerpos de agua macroscópicos basado en un modelo *MFA*, problema al que denominaron la formulación inversa. En la formulación inversa, la máxima concentración para los contaminantes descargados al ambiente se fijan para evitar acumulaciones peligrosas en la disposición final; de esta manera, se aseguran procesos sostenibles a través de la técnica del análisis del flujo de los materiales. Sin embargo, esta técnica es una aproximación secuencial que no optimiza simultáneamente el modelo.

Por último, es necesario garantizar una solución óptima y para ello se requiere el uso de herramientas de optimización; en este sentido, técnicas de programación disyuntiva (ver Ponce-Ortega y col., 2009) han resultado ser herramientas muy eficientes para obtener modelos mixto enteros no lineales (MINLP) que reformulados a través de técnicas desarrolladas por Grossmann y Lee (2003) como la del *convex-hull*, garantizan la solución óptima del problema.

1.5 Alcance

La aportación de este trabajo es simular los ríos con todas las descargas y extracciones existentes, lo que permite una representación muy apegada a lo que sucede realmente y que se puede utilizar para integrar las descargas de la planta que son enviadas al ambiente o recirculadas a la misma planta; dicho de otra manera, se integra a la descarga de la planta con la forma en que perjudica al ambiente, sin permitir que dichas descargas rompan los ciclos naturales de “auto depuración” del medio. Esto equivale a incluir los aspectos ambientales y económicos para la toma de la decisión del sitio óptimo para la localización de nuevas plantas industriales. Lo anterior se puede lograr considerando la integración másica de las corrientes internas de la planta.

1.6 Hipótesis

En el presente trabajo se formularán modelos matemáticos basados en composiciones a fin de desarrollar una metodología que tome en cuenta tanto aspectos económicos como ambientales para determinar la localización óptima de nuevas plantas cuyas descargas acuosas tengan uno o más contaminantes. Por consiguiente, se espera que la aplicación de la metodología desarrollada proporcione soluciones atractivas desde un punto de vista económico y ambiental, en especial, que contribuyan en la toma de decisiones para el desarrollo de nuevos procesos considerando la sustentabilidad del medio.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Aspectos Generales de los Ríos

Las cuencas son los sistemas acuíferos de mayor relevancia ecológica ya que representan la principal fuente de agua dulce no sólo de los animales, plantas y árboles que se encuentran alrededor de ellas, sino en gran medida del hombre. Normalmente, un río se encuentra interconectado con otros de mayor o menor volumen; también, es común que un río se subdivida en otros, lo que puede dar origen a que se formen los brazos o arroyos. Las cuencas también funcionan como receptores, ya que la mayoría de los drenajes descargan sus aguas en los cuerpos de agua de la cuenca. El destino final de las cuencas son los lagos, mares y océanos, donde finalmente se descargan las aguas que arrastran. Si se analizan en forma global las interacciones entre cuencas y drenajes se puede observar que existe toda una red muy compleja en la forma que se interconectan y un número importante de efluentes que descargan en ellos. Sin duda, las cuencas se ven impactadas por las alimentaciones de agua de los alrededores provenientes de sistemas agrícolas, residenciales e industriales. Además de que las cuencas proporcionan un gran impacto en los elementos biológicos, físicos, de salud y sociales en los alrededores del sistema. Para entender este tipo de sistemas, de cómo las cuencas se ven impactadas por los alrededores y de cómo impactan éstas a los alrededores, es importante desarrollar modelos cuantitativos que rastreen los flujos y composiciones de los contaminantes a través de ellas.

En este sentido, una técnica que ha resultado ser muy eficiente es el análisis de flujo de los materiales, la cual es particularmente útil para monitorear las especies químicas que causan contaminación en las cuencas y analizar las causas de los problemas de contaminación en una región considerando todas las actividades relevantes que pueden intercambiar flujos de agua con las cuencas y drenajes como lo son la industria, campos agrícolas, zonas residenciales e incluso en los lugares donde sea importante considerar el flujo aportado por la lluvia no debe de ser excluido, y por último, también se debe considerar los fenómenos físicos, químicos y biológicos que impactan la cuenca.

Debido a que hasta ahora no se ha tenido el suficiente cuidado de limpiar o de tratar los efluentes que se descargan en los ríos, la gran mayoría de ellos presentan un grado importante de contaminación y, por consiguiente, lo mismo sucede para los lagos, mares y océanos. Para

apreciar físicamente lo antes mencionado basta con observar el estado que guardan las cuencas, mares, lagos y océanos (UNESCO, 2009). Sin duda alguna, la responsabilidad en gran medida de que actualmente las cuencas se encuentren muy dañadas ambientalmente es la industria, la cual desde que se originó ha producido grandes beneficios económicos y productivos a la sociedad, pero al mismo tiempo ha representado la principal fuente del deterioro ambiental (El-Halwagi, 2006). Debido a las características de la mayoría de los materiales procesados, es inevitable que algunos desperdicios sean descargados al ambiente. Cuando estos desperdicios son descargados en los ríos, lagos, mares, tierras y en el aire causan un impacto adverso en la salud humana y en el ecosistema en general.

Adicionalmente, las plantas industriales instaladas hasta ahora han sido diseñadas para maximizar las ganancias económicas, mientras que los desechos son tratados en instalaciones auxiliares para cumplir con las regulaciones ambientales de los residuos peligrosos. Existe una gran cantidad de casos en los cuales los residuos han sido descargados al ambiente sin tratamiento alguno, lo que ha provocado que se conviertan en un problema de seguridad y salud pública. Además, la preocupación de regular los efluentes descargados a los ríos y cuerpos de agua o de mantenerlos en condiciones apropiadas, no se debe sólo a los motivos antes expuestos, sino a la infinidad de usos que el agua en condiciones óptimas tiene para la humanidad, también hay que preservar sus alrededores que equivale a la flora y fauna establecida en ellos; así como también la que se encuentra dentro de las mismas cuencas.

Por otra parte, en las corrientes de la gran mayoría de las industrias se encuentran una gran cantidad de contaminantes mezclados, debido a que no existen separaciones perfectas ni reactores en los que la totalidad de los reactivos son convertidos en productos útiles; por el contrario, es común que en los reactores se generen productos no deseados. Es entonces cuando juega un papel importante el tratamiento de los residuos, para que estos cumplan con las regulaciones ambientales y dañen lo menos posible al ambiente. Cabe mencionar que al inicio del desarrollo industrial no existían las regulaciones ambientales, por lo que los residuos arrojados perjudicaron fuertemente al ambiente. Luego, cuando se visualizó el daño provocado por los residuos industriales, se impusieron las regulaciones ambientales. Actualmente, debido a la reciente presión pública, las regulaciones ambientales son cada vez más estrictas y la responsabilidad ambiental de algunas industrias se ha traducido en el desarrollo de

procedimientos de diseño y operación de procesos limpios. Es por ello que las industrias deben instalar equipos eficientes para el tratamiento de sus desechos con el fin de satisfacer las regulaciones ambientales, lo cual representa un costo considerable que se ve reflejado en los precios de sus productos. En el afán de que sus productos sean económicamente competitivos, se busca reducir tanto los costos de producción y de tratamiento de sus residuos. Debido a esta inquietud por lograr la minimización de costos se han propuesto técnicas que permiten el reúso de las corrientes de las industrias, lo que se ha denominado integración másica de procesos (El-Halwagi, 2006).

2.2 Integración Másica de Procesos

Actualmente, la industria requiere de grandes consumos de recursos naturales para satisfacer las necesidades humanas, lo cual ha causado el acelerado consumo de recursos, además de incrementos en los precios de las materias primas. Por otro lado, el ambiente es un tema de preocupación mundial, debido a que se encuentra severamente dañado en gran medida por la misma industria, lo cual ha originado que las regulaciones ambientales, sean cada vez más estrictas para las descargas de desecho acuosas. En este contexto, la industria de procesos se ha visto en la necesidad de desarrollar nuevas metodologías para la conservación de recursos, así como también, para la minimización de desechos a través de las estrategias de integración másica. La integración másica es una herramienta integral usada para la localización, transformación y separación de especies y corrientes.

La integración másica de procesos ha sido el tema de estudio de muchas investigaciones en el pasado reciente debido a los beneficios económicos y ambientales que su implementación produce. En el área de diseño sustentable, la integración másica puede ser usada para disminuir el consumo de materias primas (agua, reactivos, solventes, etc.) y al mismo tiempo disminuir los desechos industriales descargados hacia el ambiente. Las publicaciones de El-Halwagi (1997, 2006) proporcionan una revisión bibliográfica exhaustiva sobre la integración másica de procesos. En este sentido, existen dos estrategias importantes de integración másica: las redes de reciclado directo y las redes de reciclado y reúso. En las redes de reciclado directo las corrientes de proceso son enviadas a los equipos y al desecho sin tratamiento alguno, posteriormente la corriente de desecho es tratada para cumplir las regulaciones ambientales como se muestra en la Figura 2.1.

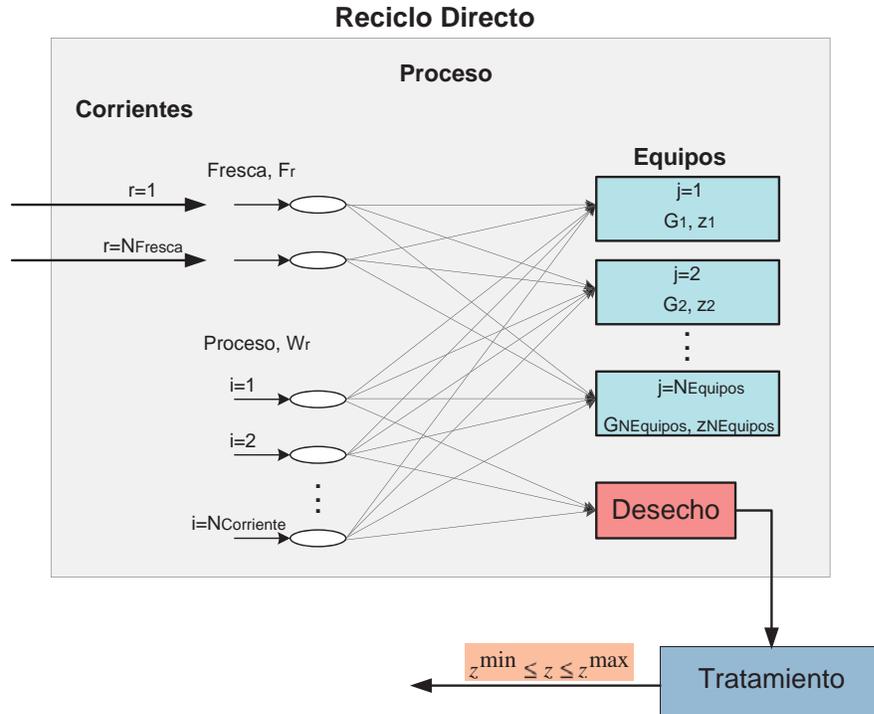


Figura 2.1 Redes de reciclo directo

En las redes de reciclo y reúso a diferencia de las redes de reciclo directo, las corrientes del proceso puede ser tratadas antes de enviarse a los equipo de proceso y a la corrientes de desecho como se muestra en la Figura 2.2.

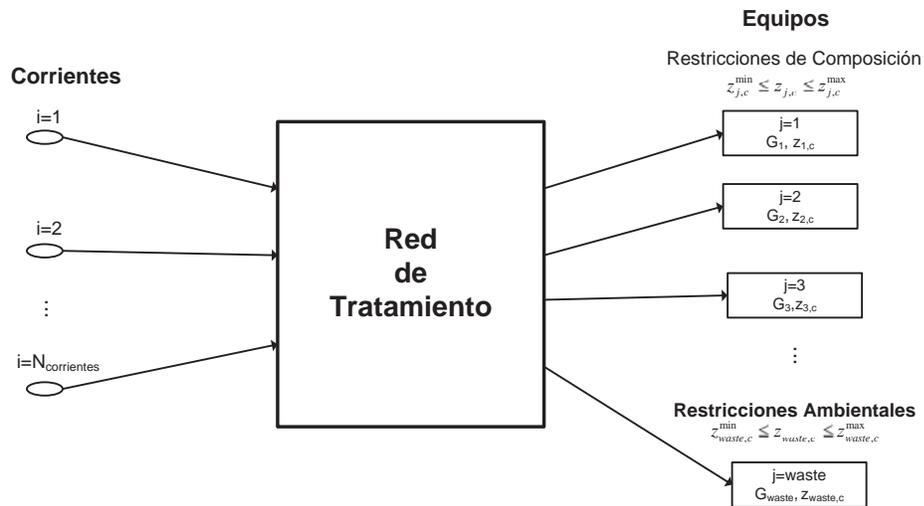


Figura 2.2 Redes de reciclo y reúso.

2.3 Formulación Inversa

La formulación inversa es una forma reciente de abordar el desarrollo de nuevos proyectos donde se prepondera el aspecto ambiental (Lovelady y col., 2009). Para entender la formulación inversa, primeramente se detalla el “sentido directo”, que es la forma tradicional en que se desarrollan los nuevos proyectos industriales (ver Figura 2.3). Cuando surge la inquietud de desarrollar un nuevo proyecto industrial, irremediablemente éste verterá sus residuos en los ríos circundantes que eventualmente desembocarán en lagos, mares u océanos; en este sentido, los aspectos económicos determinan la capacidad de la nueva planta industrial e implícitamente las características de la corriente de residuo descargada. Sin embargo, las descargas de esta nueva planta perjudicarán tanto al río como a su disposición final; a pesar de considerar restricciones en la concentración que descarga la nueva planta, la concentración de los contaminantes en el reservorio final usualmente no es considerada en el diseño de la nueva planta, y los efectos adversos no son detectados hasta después de instalada la nueva planta. Entonces, el sentido directo da prioridad a la parte económica en la síntesis de nuevos proyectos industriales dejando de lado lo que pasa con los contaminantes fuera de la planta.

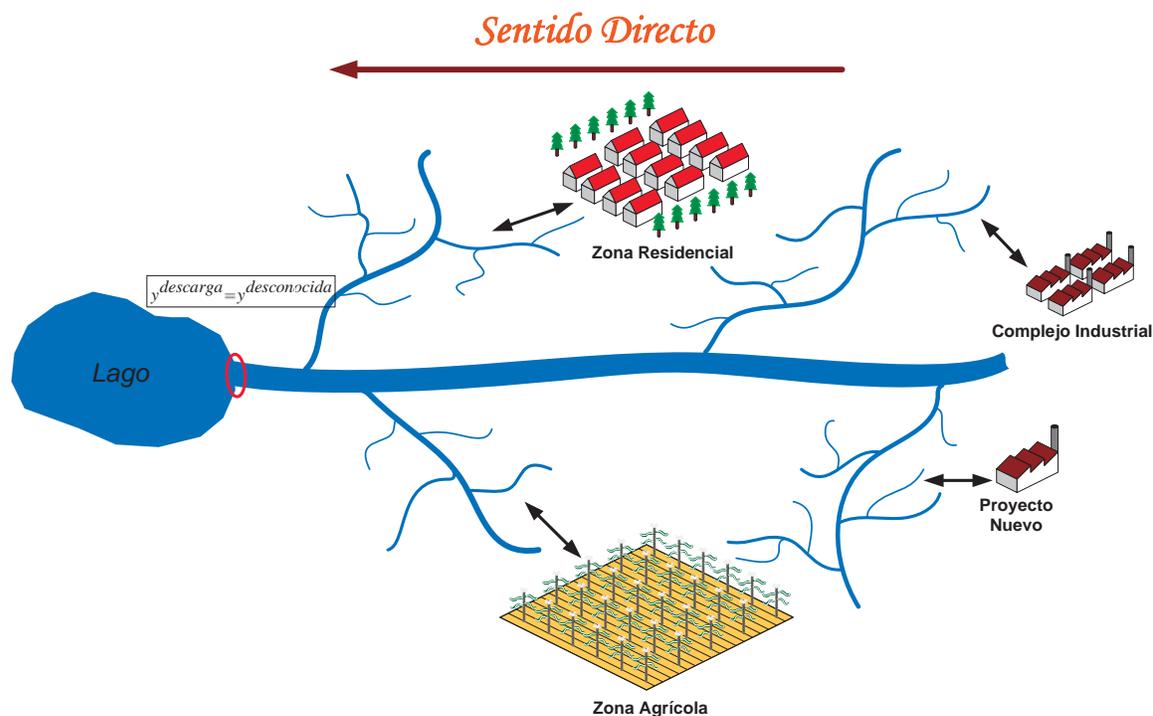


Figura 2.3 Modelo directo para el análisis de un proyecto nuevo.

Por otro lado, recientemente se ha reportado un enfoque para el diseño de nuevos procesos llamado *formulación inversa* (ver Figura 2.4). Este enfoque inicia “con el ambiente en mente”, por lo que las características deseadas del lago es lo primero que se especifica. Entonces, el modelo *MFA* debe incluir una formulación de optimización que determine la máxima descarga de contaminantes aceptable de la nueva planta de proceso, con la cual se logrará un impacto tolerable sobre el río y el lago, tomando en cuenta todas las interacciones a lo largo de la cuenca. En este enfoque se considera como aspecto primordial la sustentabilidad del sistema y finalmente se determina económicamente la localización del nuevo proyecto.

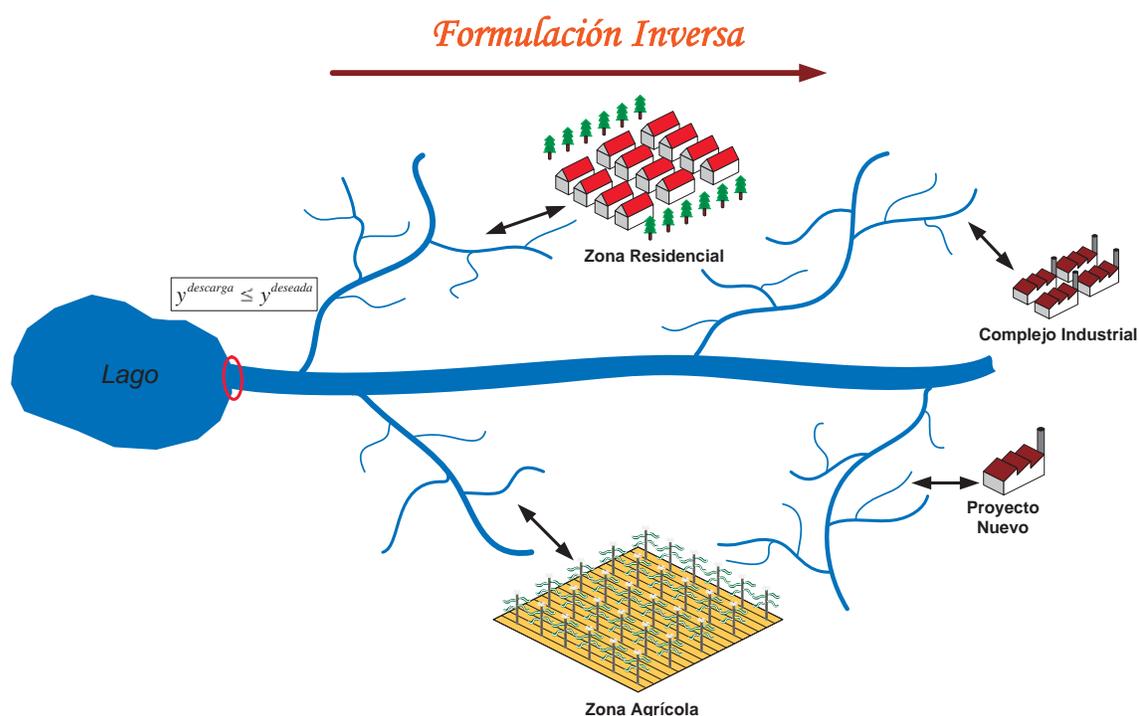


Figura 2.4 Formulación inversa para el análisis de un proyecto nuevo.

2.4 Localización de Plantas Industriales

Hasta el día de hoy, la forma convencional de determinar la localización de plantas industriales es realizando estudios exclusivamente económicos, donde el sitio ideal corresponde al de mínimo costo posible. Los costos que se toman en cuenta en este tipo de estudios y que varían de acuerdo a la localización son, por ejemplo: el costo del terreno, costos de transportar las materias primas desde el lugar donde se encuentren hasta la posible localización de la planta y el

costo de transportar los productos hasta los clientes. Sin embargo, al decidir la localización de plantas no se toman en cuenta los daños ambientales que provocará instalar la planta en cada una de las alternativas con las que se cuenta, ni mucho menos el cómo resarcir el daño ambiental que generará la instalación de la planta. No es sino hasta después de que la planta ha sido instalada que se plantea cómo se tratará la corriente de residuos para cumplir con las regulaciones ambientales. Además, en esta aproximación el único aspecto a cubrir es el cumplimiento de dicha regulación ambiental. Entonces, ni antes de instalar la planta, ni después de instalada, se considera lo que pueda suceder en el ambiente al desechar los residuos ya que a pesar de que la descarga acuosa cumpla con la restricción ambiental, existe la posibilidad de que sea suficiente para alterar drásticamente el hábitat ecológico sobre el río, en virtud de que no fueron consideradas las demás descargas que recibe el río. Debido a todo esto, es que se cree que los aspectos ambientales deben tener una participación más importante al decidir lo referente a la localización de la planta.

En este trabajo se propone determinar la localización óptima económicamente de plantas industriales considerando también aspectos ambientales, lo cual se hace a través del modelo del *MFA*.

2.5 Planteamiento del Problema

A continuación se presentan los planteamientos del problema para los distintos modelos que se desarrollan posteriormente.

2.5.1 Modelo sin Integración Másica y Basado en un sólo Componente (Capítulo 3)

El problema a tratar puede ser descrito de la siguiente manera: Dada una serie de alternativas de localización para una planta nueva $P = p | p = 1, 2, \dots, N_p$, cada una tiene asociado su respectivo costo de instalación $CLAND_p$, este último incluye el costo asociado al transporte de materias primas y productos, así como el costo del terreno. El problema consiste en determinar la localización óptima para la nueva planta industrial que satisfaga las regulaciones ambientales (y^{RegAmb}) para los efluentes industriales y , al mismo tiempo, que evite la

acumulación de contaminantes en el reservorio final ($y^{sustentable}$), además de satisfacer las restricciones para regiones específicas n a lo largo de la cuenca ($y_{nr}^{deseada}$).

La descarga a la salida de la planta es conocida por las condiciones del proceso (flujo total y su composición) pero la calidad para la descarga de la planta sobre el río debe ser determinada, la cual puede ser tratada o no para cumplir con las regulaciones ambientales, así como evitar la acumulación de contaminantes en la disposición final (río, lago, mar u océano). Es evidente, que si la corriente de descarga requiere tratamiento o no, y si lo requiere, hasta qué punto requiere ser tratada, depende fuertemente de la localización de la planta. Para lograr estos objetivos, el comportamiento de la cuenca es simulado considerando todas las corrientes de entrada y salida de la misma, a través de la técnica del Análisis del Flujo de los Materiales.

La función objetivo consiste en la minimización del costo total anual (TAC), que se constituye por dos componentes: el costo de instalación de la nueva planta y el costo de tratamiento para la corriente de descarga. El costo de instalación incluye el costo del terreno y producción, así como el costo de transportar las materias primas y productos. El segundo término es el costo del tratamiento de las descargas de desecho, usando las tecnologías disponibles para el tratamiento. Este costo es dividido en costos fijos (independientes del flujo a tratar) y costos variables (dependientes del flujo tratado).

La Figura 2.5 muestra un sistema general, donde la corriente principal del río es alimentada por varias corrientes o afluentes ($FT_{r,t}$). Esta misma corriente del río intercambia agua a lo largo de su trayecto. De acuerdo a su uso, los siguientes tipos de intercambios de agua pueden identificarse: uso agrícola, aguas residuales con y sin tratamiento, efluentes industriales y residenciales, etc. Además, el modelo toma en cuenta fenómenos naturales como la precipitación filtración y evaporación. Estos procesos modifican significativamente la composición de los materiales transportados en el río; por lo tanto, para predecir adecuadamente la composición media de los componentes peligrosos, se requiere que el río sea seccionado en tramos donde la composición global pueda ser considerada como constante (esas secciones son representadas en la Figura 2.5 con óvalos). Estas secciones son nombradas como tramos de río, en donde no se descargan o extraen más de un afluente de gran tamaño o caudal. El flujo y las concentraciones en cada tramo son diferentes entre estos, debido a las corrientes de descarga y extracción. Los

afluentes son canales o brazos del río, los cuales pueden contener descargas con/sin tratamiento, descargas industriales, etc., donde sus flujos ($FT_{r,t}$) y composiciones ($CT_{r,t}$) afectan los tramos donde son descargados.

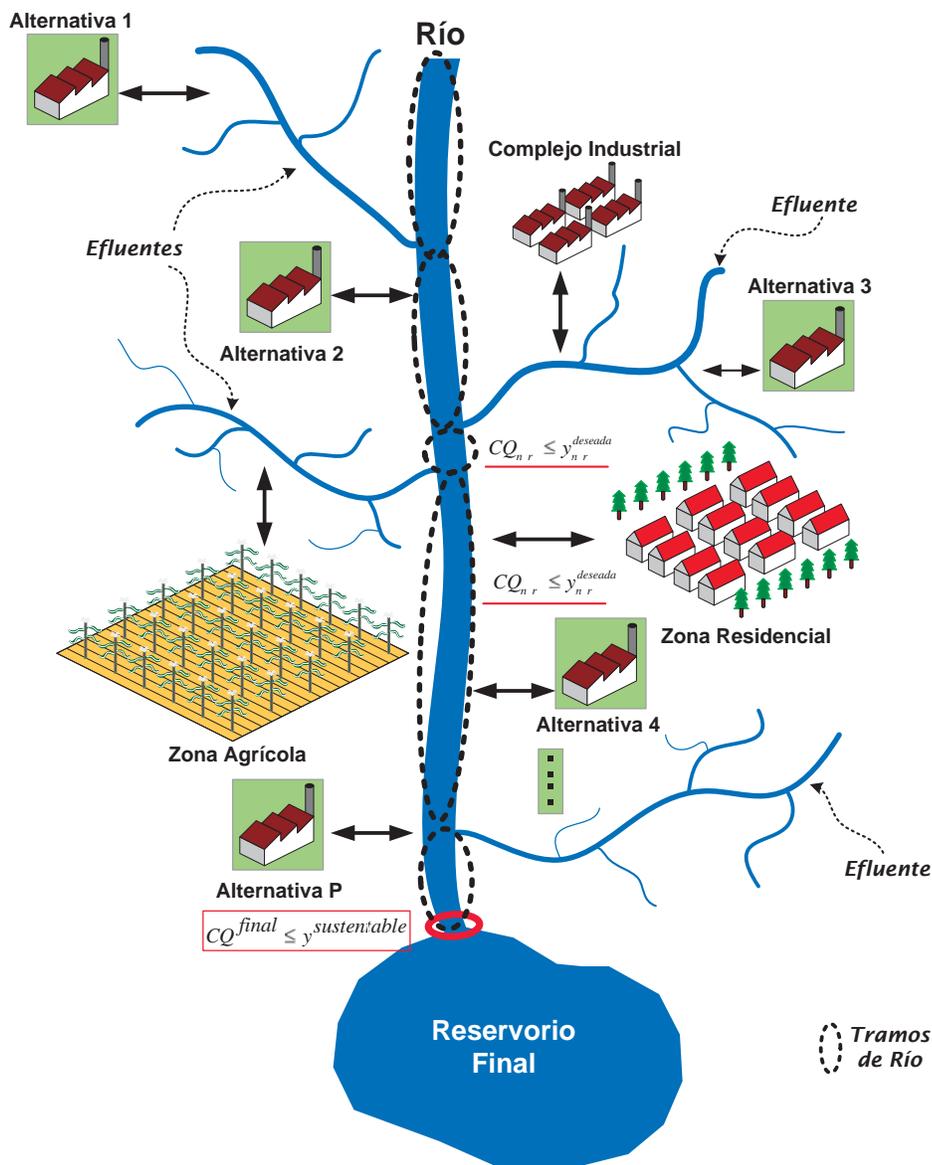


Figura 2.5 Representación de la localización de la nueva planta industrial.

Por otro lado, un término interesante en el modelo es el término reactivo. Este término toma en cuenta las posibles reacciones químicas y bioquímicas que llevan a cabo la flora y fauna de los ríos, pudiendo descomponer o producir materiales peligrosos. Un objetivo importante es mantener limpia la disposición final del río, tomando en cuenta las descargas actuales y nuevas.

La descarga de desecho de la nueva planta debe contener una composición igual o menor a la que garantice un proceso sostenible para el reservorio final. Además, el modelo debe satisfacer las restricciones para la calidad del agua que pueden ser requeridas en el trayecto de la cuenca, las cuales son independientes entre ellas, pero dependen del lugar y del uso del agua (véase la Figura 2.5). Es común que se extraiga agua de los ríos para enviarla tanto a las ciudades como a las zonas agrícolas; por lo tanto, es importante mantener la calidad del agua en el río.

Otro aspecto importante de la formulación es que puede considerar el comportamiento del costo total anual (*TAC*) en función de la concentración del contaminante descargado a la disposición final, optimizando simultáneamente la localización y el sistema de tratamiento. Entonces, cuando las regulaciones ambientales sean más estrictas, el costo asociado al tratamiento de las corrientes de desecho y el costo de la localización son más grandes. Por el contrario, para regulaciones ambientales relajadas, el costo total asociado es menor. Como resultado, la localización final de la planta depende de los inversionistas, gobiernos y sociedad, y la metodología presentada permite la optimización simultánea del costo total y la calidad del agua descargada. Finalmente, los gobiernos locales regularmente ofrecen incentivos para atraer a las industrias a sus territorios, debido a los beneficios sociales que conlleva la generación de empleos al instalar nuevas plantas industriales; por tanto, el modelo propuesto puede ser útil también para determinar el gasto que los gobiernos locales requieren pagar en caso de que estén interesados en atraer la nueva industria a sus territorios.

2.5.2 Modelo con Integración Másica Considerando Múltiples Contaminantes (Capítulo 4)

Dado un conjunto de alternativas para localizar la nueva planta industrial ($P = p \mid p = 1, 2, \dots, N_p$). Cada sitio permitido p tiene asociado un costo de instalación, (C_{land_p}), el cual incluye el costo asociado al transporte de materias primas, productos finales y servicios, así como también el costo del terreno. También es dado un conjunto de corrientes de proceso ($I = i \mid i = 1, 2, \dots, N_i$). Cada corriente de proceso contiene varios componentes ($C = c \mid c = 1, 2, \dots, N_c$), y estas corrientes pueden segregarse para ser recirculadas y/o reusadas en los equipos de proceso. El flujo (W_i) y la composición ($y_{i,c}^{InSource}$) de cada componente es un dato conocido por el proceso. Además, dado un conjunto de equipos de proceso (unidades de

proceso), $J = j | j = 1, 2, \dots, N_j$. Cada equipo de proceso requiere un flujo (G_j , parámetro conocido) dado con límites específicos para la composición de entrada ($y_{j,c}^{InSink}$). Además existen un conjunto de corrientes frescas disponibles ($K = k | k = 1, 2, \dots, N_k$) con flujos (F_k) que serán determinados, mientras que sus composiciones son conocidas ($y_{k,c}^{Fresh}$). Hay un conjunto de interceptores disponibles para tratar a los contaminantes (*INT*). Finalmente, se tiene un conjunto de regulaciones ambientales para la descarga de desecho al ambiente, como también un conjunto de restricciones de sustentabilidad para la composición a ser descargada a la disposición final. Entonces, el problema consiste en determinar simultáneamente la síntesis de la red de reciclaje y reúso y la localización óptima de la nueva planta industrial que descargará su corriente de desecho al ambiente, de tal manera que se evite la acumulación de contaminantes en la disposición final y que al mismo tiempo satisfaga las restricciones ambientales de los contaminantes a lo largo del río. La función objetivo consiste en la minimización de costo total anual que incluye los costos de instalación para la nueva planta, los costos de tratamiento para las corrientes de proceso, el costo de las corrientes frescas y los costos de tubería.

El flujo total descargado por la nueva planta industrial y su concentración son variables de optimización, las cuales dependen fuertemente de la posición, que será determinada por el modelo; esto quiere decir que el tratamiento requerido también depende fuertemente de la localización de la nueva planta industrial. Además, la concentración debe satisfacer las regulaciones ambientales (en la descarga de la nueva planta), así como también las restricciones de sustentabilidad (en la disposición final) para evitar la acumulación de contaminantes en el reservorio final. Para satisfacer este último punto, se simula el comportamiento del río considerando todas las corrientes de entrada y salida del río, así como la nueva descarga de la nueva planta, a través de la técnica del *MFA*. Por otro lado, el tratamiento requerido también depende de las restricciones de composición a la entrada de los equipos de proceso. En este sentido, el tratamiento se realiza segregando las corrientes de proceso para tratar los contaminantes en los interceptores, donde cada interceptor puede tratar todos los contaminantes; las eficiencias para remover cada componente dependen del tipo de unidad usada. Como se puede ver en la Figura 2.6, la corriente principal del río se alimenta por varias corrientes o afluentes ($FT_{r,i}$). El río intercambia agua a lo largo de su trayecto; de acuerdo a su uso, los siguientes tipos

de intercambios de agua pueden identificarse: uso agrícola, aguas residuales con y sin tratamiento, efluentes industriales y residenciales, etc. y finalmente descarga al reservorio final. Además, el modelo toma en cuenta fenómenos naturales como la precipitación, filtración y evaporación.

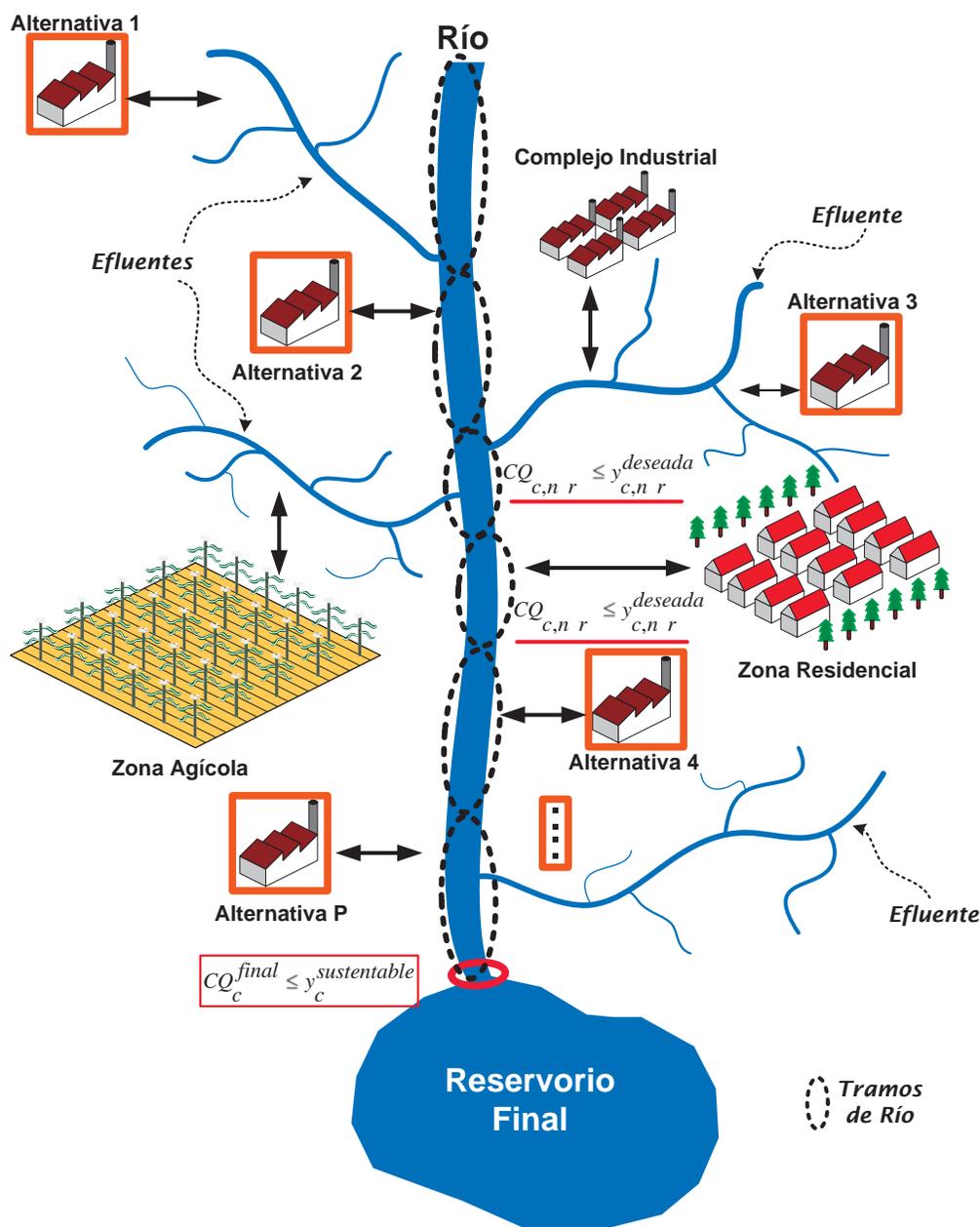


Figura 2.6 Alternativas para localizar la nueva planta industrial, contemplando el manejo de múltiples contaminantes.

Evidentemente los procesos en el río modifican significativamente la composición de los materiales transportados; por lo tanto, para predecir adecuadamente la composición media de los componentes peligrosos, resulta necesario que el río sea seccionado en tramos donde la composición global pueda ser considerada como constante (esas secciones son representadas en la Figura 2.6 con óvalos). Estas secciones son nombradas como tramos de río, en donde no se descargan o extraen más de un afluente de gran tamaño o caudal. El modelo también identifica los principales afluentes descargados en cada tramo de río. Los afluentes son canales o brazos del río, los cuales pueden tener descargas con/sin tratamiento, descargas industriales, etc., sus flujos ($FT_{r,t}$) y composiciones ($CT_{c,r,t}$) afectan los tramos donde son descargados. Las descargas al río contienen contaminantes con concentraciones específicas, los cuales interactúan química y bioquímicamente con el sistema, en otras palabras, con la flora y fauna establecida en la cuenca.

Una de las metas de este trabajo es asegurar la sustentabilidad de la cuenca y sus alrededores; para lograrla se requiere realizar un análisis antes del proceso de optimización acerca de la capacidad del reservorio final para descomponer química y bioquímicamente cada componente. De este análisis se obtienen las restricciones de sustentabilidad, las cuales permiten asegurar que los contaminantes no se acumularán en el sistema.

La Figura 2.7 presenta la superestructura propuesta (basada en las formulaciones previamente reportadas por Gabriel y El-Halwagi 2005 y Ponce-Ortega y col. 2010) donde se realiza la integración másica. Como se puede ver en la superestructura, las corrientes de proceso son segregadas para tratar todos los contaminantes requeridos, evitando el mezclado de diferentes corrientes de proceso. A la salida del sistema de tratamiento, cada corriente es segregada para que sea enviada a cada equipo de proceso o a la corriente de desecho. Las corrientes frescas disponibles pueden ser usadas en los equipos de proceso cuando sean requeridas. Cada interceptor tiene asociado un factor de eficiencia (γ_c^{int}) para cada componente a ser removido. Estas eficiencias están relacionadas con la cantidad de contaminante, y son calculadas antes del proceso de optimización. Entonces, la composición a la salida de cada unidad de tratamiento se calcula como sigue:

$$y_{i,c}^{Out,int} = 1 - \gamma_c^{int} y_{i,c}^{InSource}, \quad \forall i \in I, c \in C, int \in INT$$

Nótese que la superestructura incluye un conjunto de interceptores ficticios, útiles para cuando no se requiere tratamiento, con eficiencias y costos iguales a cero.

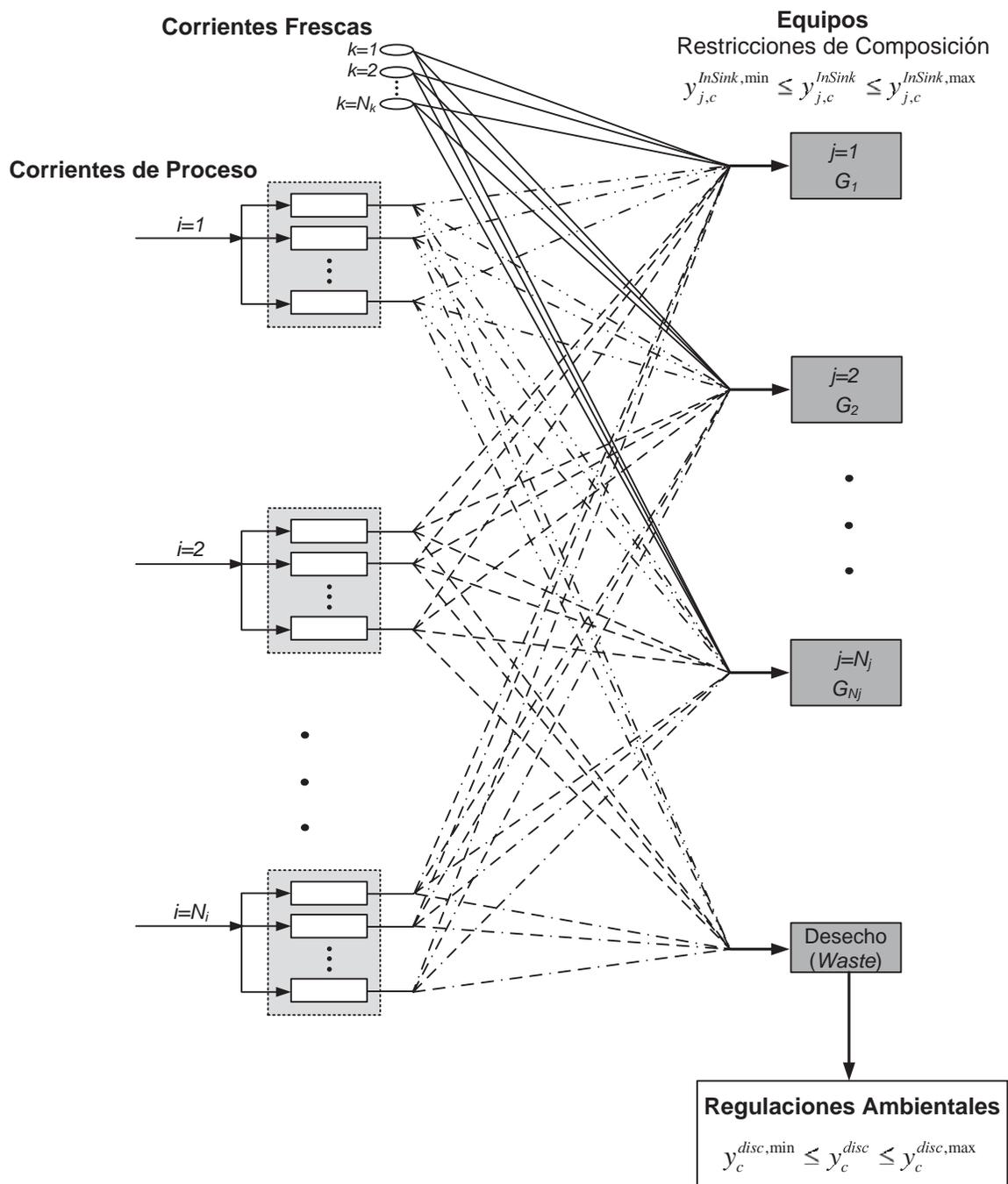


Figura 2.7 Superestructura para la red de reciclaje/reuso.

Capítulo 3. Modelo sin Integración Másica Basado en un sólo Componente

3.1 Metodología

La formulación está constituida por: un modelo para predecir el comportamiento del sistema del río que será impactado por la nueva descarga de la planta industrial, un modelo disyuntivo así como su reformulación para localizar la nueva planta industrial y las ecuaciones que describen el funcionamiento del sistema de tratamiento de la corriente de desecho. Para realizar esta tarea, se desarrolla un modelo basado en la técnica del *MFA*, la cual considera todas las descargas (industriales, residenciales, agrícolas, etc.) y extracciones, así como las reacciones que se pueden llevar a cabo en la cuenca (como la mostrada en la Figura 2.3). El *MFA* realiza balances totales y por componente a secciones o tramos del río, así como también a los efluentes que descargan en ellos. El modelo disyuntivo para ubicar la planta industrial considera seleccionar sólo un sitio óptimo para ésta, además de que se reformula como un modelo algébrico a través de la herramienta del *convex-hull*. Por último, a los dos modelos anteriores se les incorpora un modelo que describe el funcionamiento del tratamiento, donde cada interceptor tiene asociado sus respectivos costos fijos y variables.

Ecuaciones del Modelo *MFA*

Primeramente los índices utilizados en la formulación del modelo se describen a continuación para un mejor entendimiento. r es un subíndice usado para denotar a la sección o tramo del río, mientras que N_r corresponde al número total de tramos de río. R es el conjunto que contiene todas las r . t es un subíndice para los afluentes descargados a cierto tramo de río, mientras que N_t es el número total de afluentes y T su conjunto. p es un subíndice para denotar las localizaciones disponibles para la nueva planta, N_p denota el número total de sitios disponibles y P es su conjunto. j es un subíndice usado para los interceptores disponibles para tratar la composición del efluente de la nueva planta, N_j denota el número total de interceptores (incluyendo un interceptor ficticio usado para modelar a la corriente cuando no requiere tratamiento) y J es el conjunto que contiene todas las j .

Las ecuaciones para el modelo son descritas a continuación:

Balance Total para cada Tramo de Río. El flujo a la salida (Q_r) de cada tramo r es igual al flujo de entrada al mismo (Q_{r-1}) más la precipitación (P_r), descargas directas industriales (D_r), residenciales (H_r), la sumatoria de las descargas de los afluentes ($FT_{r,t}$), incluyendo la posible descarga de la nueva planta ($QPNEW_{r,p}$), menos las pérdidas debidas a filtración y evaporación (L_r) así como al uso de agua (U_r).

$$Q_r = Q_{r-1} + P_r + D_r + H_r + \sum_{t=1}^{N_{t(r)}} FT_{r,t} + QPNEW_{r,p} - L_r - U_r, \quad \forall r \in R \quad (3.1)$$

donde $N_{t(r)}$ se refiere al número total de afluentes que se descargan al tramo de río r .

Balance por Componente para cada Tramo de Río. La masa del componente peligroso a la salida de cada tramo r ($Q_r CQ_r$) es igual a la masa a la entrada ($Q_{r-1} CQ_{r-1}$), más la masa contenida en la precipitación ($P_r CP_r$), descargas industriales ($D_r CD_r$), descargas residenciales ($H_r CH_r$), la sumatoria de los afluentes ($\sum_{t=1}^{N_{t(r)}} FT_{r,t} CT_{r,t}$) y la posible descarga de la nueva planta ($QPNEW_{r,p} CPNEW_{r,p}$), menos la masa contenida en las pérdidas ($L_r CL_r$) y el uso ($U_r CU_r$).

Además, aquí aparece un término muy interesante, que es el término de reacción, $\int_{V=0}^{V_r} r_r dV_r$. Este término reactivo considera las reacciones químicas y bioquímicas que se producen en el río, debido a la interacción del componente con el sistema. Finalmente, el balance para cada componente en cada tramo se escribe como sigue:

$$Q_r CQ_r = Q_{r-1} CQ_{r-1} + P_r CP_r + D_r CD_r + H_r CH_r + \sum_{t=1}^{N_{t(r)}} FT_{r,t} CT_{r,t} + QPNEW_{r,p} CPNEW_{r,p} - L_r CL_r - U_r CU_r - \int_{V=0}^{V_r} r_r dV_r, \quad \forall r \in R \quad (3.2)$$

Balance Total para cada Afluente. El balance para el afluente t que descarga al tramo r se describe a continuación:

$$FT_{r,t} = S_{r,t}^{notratada} + S_{r,t}^{tratada} + I_{r,t} + P_{r,t} + D_{r,t} + QPNEW_{r,t,p} - L_{r,t} - U_{r,t}, \quad \forall r \in R, t \in T \quad (3.3)$$

El flujo que se descarga al tramo r del afluente t es igual a la suma de las descargas residuales con/sin tratamiento ($S_{r,t}^{tratada}$, $S_{r,t}^{notratada}$), descargas industriales ($I_{r,t}$), la precipitación ($P_{r,t}$), descargas directas ($D_{r,t}$) y la posible descarga de la nueva planta ($QPNEW_{r,t p}$) menos las pérdidas ($L_{r,t}$) y el uso o extracción de agua ($U_{r,t}$).

Balance por Componente para Afluentes. La masa del componente clave que descarga el afluente t al tramo de río r , se calcula de la siguiente forma:

$$FT_{r,t}CT_{r,t} = S_{r,t}^{notratada}CS_{r,t}^{notratada} + S_{r,t}^{tratada}CS_{r,t}^{tratada} + I_{r,t}CI_{r,t} + P_{r,t}CP_{r,t} + D_{r,t}CD_{r,t} + QPNEW_{r,t p}CPNEW_{r,t p} - L_{r,t}CL_{r,t} - U_{r,t}CU_{r,t} - \int_{V=0}^{V_{r,t}} r_{r,t}dV_{r,t}, \quad \forall r \in R, t \in T \quad (3.4)$$

Aquí, una vez más aparece el término reactivo.

Descargas y Usos Agrícolas. Las descargas ($D_{r,t}$) y usos agrícolas ($U_{r,t}$) están relacionadas con las zonas de riego de sus alrededores, ya que tienen un comportamiento lineal con el área de cultivo:

$$D_{r,t} = \alpha_{r,t}A_{r,t}, \quad \forall r \in R, t \in T$$

$$U_{r,t} = \beta_{r,t}A_{r,t}, \quad \forall r \in R, t \in T$$

Donde $\alpha_{r,t}$ es el flujo de agua requerida por unidad de área para zonas de riego en $m^3/acre*s$, $\beta_{r,t}$ es el flujo usado de afluente t por unidad de área y sus unidades también son $m^3/acre*s$ mientras que $A_{r,t}$ es el área de cultivo a la que sirve el afluente t que descarga en el tramo de río r en acres.

Modelo Disyuntivo para la Localización de la Planta

El valor de la composición final descargada por la nueva planta al ambiente depende fuertemente de la localización de la misma. En este sentido, sí la planta se localiza en el sitio 1, los valores del flujo y la composición descargados en esa posición deben ser mayores a cero; de no instalarse la planta en esta posición, los valores del flujo y la composición del componente

serán iguales a cero. Para un conjunto p de posibles localizaciones de la planta, la decisión se modela a través de la disyunción:

$$\left[\begin{array}{c} Y_1 \\ CPNEW_1 \geq 0, QPNEW_1 \geq 0 \\ CPNEW_2 = 0, QPNEW_2 = 0 \\ \vdots \\ CPNEW_p = 0, QPNEW_p = 0 \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} Y_2 \\ CPNEW_1 = 0, QPNEW_1 = 0 \\ CPNEW_2 \geq 0, QPNEW_2 \geq 0 \\ \vdots \\ CPNEW_p = 0, QPNEW_p = 0 \end{array} \right] \vee \dots \vee \left[\begin{array}{c} Y_p \\ CPNEW_1 = 0, QPNEW_1 = 0 \\ CPNEW_2 = 0, QPNEW_2 = 0 \\ \vdots \\ CPNEW_p \geq 0, QPNEW_p \geq 0 \end{array} \right]$$

En la disyunción previa, Y_p es la variable Booleana asociada a la localización p de la planta y $QPNEW_p$ es el flujo de descarga que generará la nueva planta al ambiente en la posición p , mientras que $CPNEW_p$ es la concentración de la descarga de la nueva planta al río en la posición p . El modelo disyuntivo dice que cuando la localización óptima de la planta es ubicar la nueva planta en el sitio 1, entonces la variable Booleana Y_1 es verdadera y tanto $CPNEW_1$ como $QPNEW_1$ deben ser mayores a cero, y todas las demás variables Booleanas son falsas y los demás valores de $QPNEW_p$ y $CPNEW_p$ asociadas a estas localizaciones son iguales a cero. Situaciones similares ocurren para cuando la localización seleccionada es la 2, 3, ..., p alternativa. Es importante mencionar que el valor de la concentración está directamente sujeto al modelo *MFA* que puede predecir el comportamiento del río, satisfaciendo las restricciones propuestas para mantener bajo control el contaminante en la disposición final. En este trabajo, no se incluye el diseño interno de la planta, por lo que el diseño dentro de la planta es el mismo para cualquier posición; también se supone que el flujo descargado por la nueva planta industrial es un valor constante especificado antes del proceso de optimización. La disyunción previa se transforma a un modelo algebraico usando la reformulación *convex-hull* (ver Raman y Grossmann, 1994; Vecchiotti y col., 2003; Ponce-Ortega y col., 2009b).

Las variables Booleanas son transformadas en un conjunto de variables binarias. Cuando las variables Booleanas son verdaderas, las variables binarias asociadas a éstas son iguales a uno; en caso contrario, cuando las variables Booleanas son falsas, las variables binarias asociadas son iguales a cero. Para seleccionar sólo una alternativa para localizar la nueva planta industrial, se usa la siguiente expresión:

$$\sum_{p \in P} y_p = 1 \quad (3.5)$$

Después, son impuestos límites superiores a las variables $QPNEW_p$ y $CPNEW_p$.

$$QPNEW_p \leq QPNEW^{UP} y_p, \quad \forall p \in P \quad (3.6)$$

$$CPNEW_p \leq CPNEW^{UP} y_p, \quad \forall p \in P \quad (3.7)$$

Las ecuaciones (3.6 y 3.7) aseguran que sólo una de las $QPNEW_p$ y $CPNEW_p$ tomen valores mayores a cero, las cuales deben ser las variables asociadas al sitio que sea seleccionado y, si no es seleccionado, las variables asociadas deben ser iguales a cero.

Modelo del Tratamiento de la Corriente de Desecho

Como se muestra en la Figura 3.1, un conjunto de interceptores están disponibles para satisfacer los límites de concentración para la descarga de la nueva planta. Como el proceso de optimización debe determinar la selección óptima del sistema de tratamiento, el cual debe de ubicarse en el sitio que seleccione el proceso de optimización para instalar la nueva planta. Por lo tanto, es importante destacar que los requerimientos del tratamiento dependen en gran medida de la localización de la nueva planta para satisfacer la sustentabilidad del sistema en la disposición final.

Antes de mostrar las ecuaciones que describen el funcionamiento de las unidades de tratamiento (interceptores), se muestran dos ecuaciones que enlazan las variables usadas en el modelo disyuntivo para localizar la nueva planta con las que se requieren en el modelo del tratamiento de la corriente de desecho. La concentración de la corriente descargada por la nueva planta (y^{disc}) se calcula como la suma de las concentraciones que se generaron para todos los sitios p disponibles ($CPNEW_p$), lo cual se establece en la siguiente ecuación:

$$\sum_{p \in P} CPNEW_p = y^{disc} \quad (3.8)$$

Anteriormente se explicó que sólo una de las $CPNEW_p$, tendrá un valor mayor a cero, por lo que la ecuación (3.8) puede cumplirse sin mayores complicaciones. Ahora, haciendo un análisis similar para el flujo que será descargado:

$$\sum_{p \in P} QPNEW_p = QPNEWDATA \quad (3.9)$$

Sin embargo, $QPNEWDATA$ es un valor conocido por el problema, a diferencia de y^{disc} que es una variable de optimización. Por otro lado, la Figura 3.1 muestra el esquema en que se lleva a cabo el tratamiento de la corriente de desecho de la nueva planta industrial antes de ser enviada al ambiente, esta tarea se lleva a cabo con tecnologías o unidades de tratamiento que se encuentren disponibles para tratar al contaminante. Cada unidad de tratamiento o interceptor tiene asociado su costo fijo respectivo (independiente del flujo a tratar) y su costo variable (dependiente del flujo a tratar), así como también el factor de eficiencia con el que opera. En este sentido, el factor de eficiencia depende de parámetros de operación y diseño de la unidad, el cual se usa para simular cada unidad.

$$\gamma_j = f \text{ Parámetros de Diseño y Operación}$$

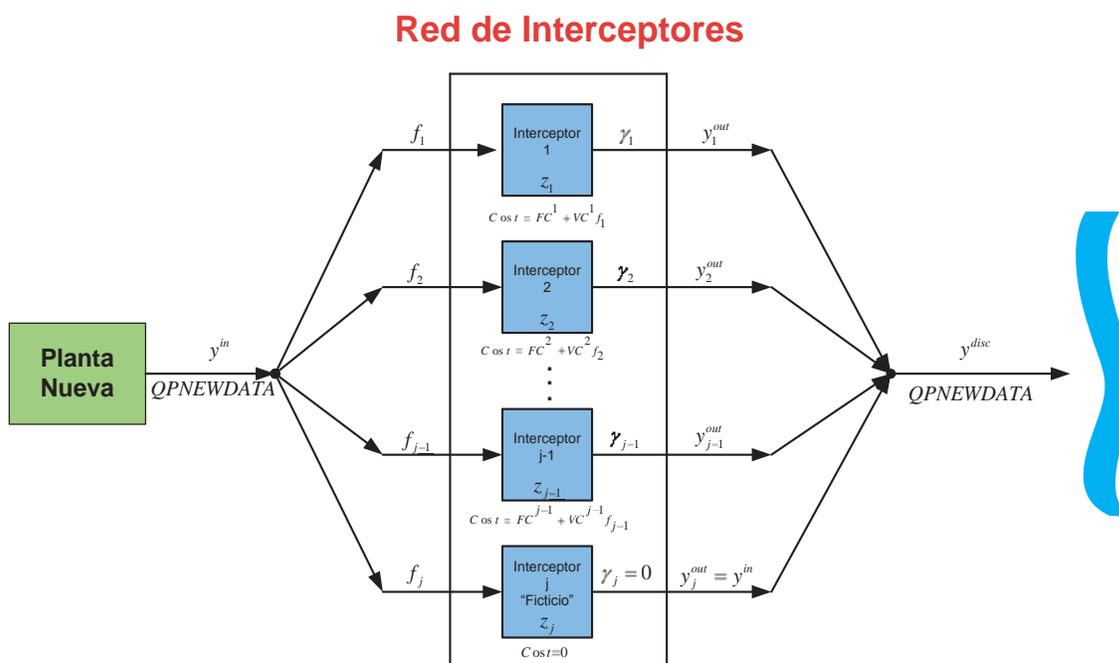


Figura 3.1 Red de interceptación para la corriente de desecho de la nueva planta

Para obtener los valores de los factores de eficiencia de los interceptores, se puede usar algún *software* convencional (por ejemplo: ASPEN PLUS; con la ecuación de Kremser, etc.), para simular su funcionamiento, antes del proceso de optimización. De esta manera, las concentraciones a la salida de las unidades de tratamiento dependen de la tecnología seleccionada

y de la concentración de entrada al equipo. Mientras que el costo total para la red de tratamiento depende de las unidades seleccionadas y del flujo a tratar en cada una de ellas. En general, las unidades de tratamiento o interceptores a usar, dependen de cada proceso en particular, pero pueden ser columnas de destilación, columnas de adsorción, columnas agotadoras, columnas de extracción líquido-líquido, etc.

Los puntos importantes de esta configuración son:

- Permite que la corriente de desecho sea tratada por una o más tecnologías disponibles para la remoción del contaminante.
- El flujo a la salida de la planta y en la descarga final al río es el mismo, no siendo el caso para la composición.
- Cada interceptor opera con un factor de eficiencia de remoción del contaminante, lo que está directamente asociado a la cantidad del contaminante que puede remover. Además, el costo de cada interceptor está compuesto por un costo fijo (FC^j) y un costo variable (VC^j) que depende del flujo que trata el interceptor j .
- El último interceptor en la red de tratamiento es un interceptor ficticio que se incluye para modelar el caso en que la corriente o parte de la corriente no requiera tratamiento (sólo se usa con fines de programación). Este interceptor ficticio tiene asociado un factor de eficiencia y costos iguales a cero.

La siguiente relación se usa para determinar la concentración a la salida de cada interceptor considerado:

$$y_j^{out} = y_j^{in} (1 - \gamma_j), \quad \forall j \in J$$

Nótese que la concentración de salida de cada interceptor es un parámetro que se puede conocer, porque sólo depende de los parámetros: concentración de entrada y de las eficiencias; sin embargo, la decisión óptima está dada en términos de los flujos de entrada a cada uno de ellos.

Los balances para la red de tratamiento, se presentan a continuación

$$QPNEWDATA = \sum_{j \in J} f_j \tag{3.10}$$

$$\sum_{j \in J} f_j y_j^{out} = QPNEWDATA y^{disc} \quad (3.11)$$

Donde f_j es el flujo segregado de la corriente de desecho al interceptor j , y^{in} es la concentración del contaminante a la salida de la nueva planta y a la entrada a los interceptores, y_j^{out} es la concentración del contaminante a la salida del interceptor j .

Las siguientes restricciones se requieren para activar la existencia y costos de los interceptores:

$$f_j \geq \delta z_j, \quad \forall j \in J \quad (3.12)$$

$$f_j \leq f^{UP} z_j, \quad \forall j \in J \quad (3.13)$$

Donde δ representa un parámetro pequeño usado con fines de programación, z_j es la variable binaria asociada a la existencia del interceptor j y f^{UP} es el límite superior para f_j . Note que f^{UP} es definida como: $f^{UP} = QPNEWDATA$

Restricciones para la Calidad del Agua de Algunos Tramos Específicos. Algunos tramos del río requieren restricciones específicas para la calidad del agua, debido a los usos específicos que se dan en estos. El modelo considera estas restricciones con la siguiente relación:

$$CQ_{n_r} \leq y_{n_r}^{deseada}, \quad \forall n_r \in N R \quad (3.14)$$

Donde $N(R)$ representa el subconjunto de tramos de río que requieren una calidad específica del agua.

Restricciones para la Disposición Final. La concentración del desecho descargado al río por la nueva planta industrial debe ser restringida por la regulación ambiental.

$$y^{disc} \leq y^{RegAmb}$$

Sin embargo, las regulaciones ambientales no prevén que la concentración a la disposición final evite su acumulación en el lago o mar. Para obtener un proceso sostenible en este sentido, se debe añadir la siguiente restricción al modelo:

$$CQ^{final} \leq y^{sustentable} \quad (3.15)$$

Función Objetivo

La función objetivo consiste en la minimización del costo total anual, considerando los costos de instalación de las plantas, así como también los costos del tratamiento. Entonces la función objetivo puede escribirse como:

$$\text{Min } TAC = \sum_{p \in P} CLAND_p y_p + k_f \sum_{j \in J} FC^j z_j + H_Y \sum_{j \in J} VC^j f_j \quad (3.16)$$

Donde TAC es el costo total anual, $CLAND_p$ es el costo de instalación anualizado de la nueva planta en el sitio p , k_f es un factor de anualización, FC^j es el costo fijo del interceptor j , VC^j es el costo variable del interceptor j , H_Y es el número de horas que opera la planta por año.

Puntos a Resaltar

- Las reacciones químicas y bioquímicas se representan por un modelo cinético simple, aunque puedan ocurrir varias reacciones complejas.
- Los costos de instalación ($CLAND_p$) incluyen tres rubros: transporte de materias primas, el transporte de productos y del terreno. Todos estos costos depende fuertemente de la localización.
- El flujo descargado por la nueva planta ($QPNEWDATA$) es una constante y el mismo caso aplica para la concentración a la salida de la planta (y^{in}), mientras que la concentración de los contaminantes para la descarga final de la nueva planta al río (y_c^{disc}) es una variable de optimización.

3.2 Resultados y Discusión

Se presentan dos casos de estudio para mostrar la aplicabilidad de la metodología propuesta.

Ejemplo 1. Control del Fósforo

Los datos de este caso de estudio corresponden al drenaje Bahr-Baqar, reportado previamente por El-Baz y col. (2005b) y que es uno de los sistemas de drenaje más grandes del Delta del Nilo en Egipto, el cual descarga finalmente en el Lago Manzala. El sistema tiene una longitud de 106.5 km y un ancho de aproximadamente 23 m al inicio y hasta de 70 m en el punto

final, mientras que el lago por si solo tiene un área de 1000 km^2 y una profundidad promedio de 1 m. El drenaje recibe varios tipos de descargas, entre las que destacan: drenaje agrícola, descargas domésticas con y sin tratamiento y descargas industriales. Respecto a este sistema, se puede encontrar información más detallada en Lovelady y col. (2009). Se desea instalar una planta de fertilizantes y el contaminante a controlar es el fósforo, el cual no debe exceder un límite máximo de descarga al lago de 1.3 ppm, para mantener la sustentabilidad del sistema. Se considera un ejemplo basado en el sistema mostrado en la Figura 3.1, donde se tienen 4 posibles localizaciones y cada una de ellas con diferentes costos de instalación (véase la Tabla 3.2). En el sistema existen descargas municipales, agrícolas, industriales y de plantas de tratamiento principalmente; como resultado de estas descargas se tienen incrementos alarmantes de varios componentes tóxicos, uno de ellos es el fósforo.

Tabla 3.1 Costos de instalación de los diferentes sitios para el Ejemplo 1.

Sitio	Costo de Instalación Anualizado, \$/año
1	10×10^6
2	17×10^6
3	35×10^6
4	18×10^6

El flujo de la nueva planta (*QPNEWDATA*) será $2 \text{ m}^3/\text{s}$ con una concentración para la descarga (y^{in}), aun sin tratamiento, de 12.5 ppm de fósforo. Obviamente, la instalación de la nueva planta alterará e impactará al ambiente, a través de la nueva descarga incrementando la composición del fósforo en el río y sus alrededores. Además, se extrae agua para abastecer a una ciudad del tramo 6, pero a su vez se impone una restricción para que cuando se instale la nueva planta no supere 2.1 ppm de fósforo, en dicho tramo. Del tramo 11, algunos agricultores extraen agua para regar sus cultivos, entonces, el agua que ellos tomen no debe de exceder 3.15 ppm, recordando que la descarga al reservorio final deber ser igual o menor a 1.3 ppm de fósforo para permitir la degradación natural del fósforo dentro del lago. Es importante mencionar que antes de que la nueva planta sea instalada la disposición final recibe una concentración de 1.17 ppm de fósforo.

En el desarrollo matemático se realizaron las siguientes suposiciones (Lovelady y col., 2009):

1. Lluvia insignificante: El valor de flujo debido a la precipitación fue eliminado, de acuerdo a la naturaleza del clima en Egipto.

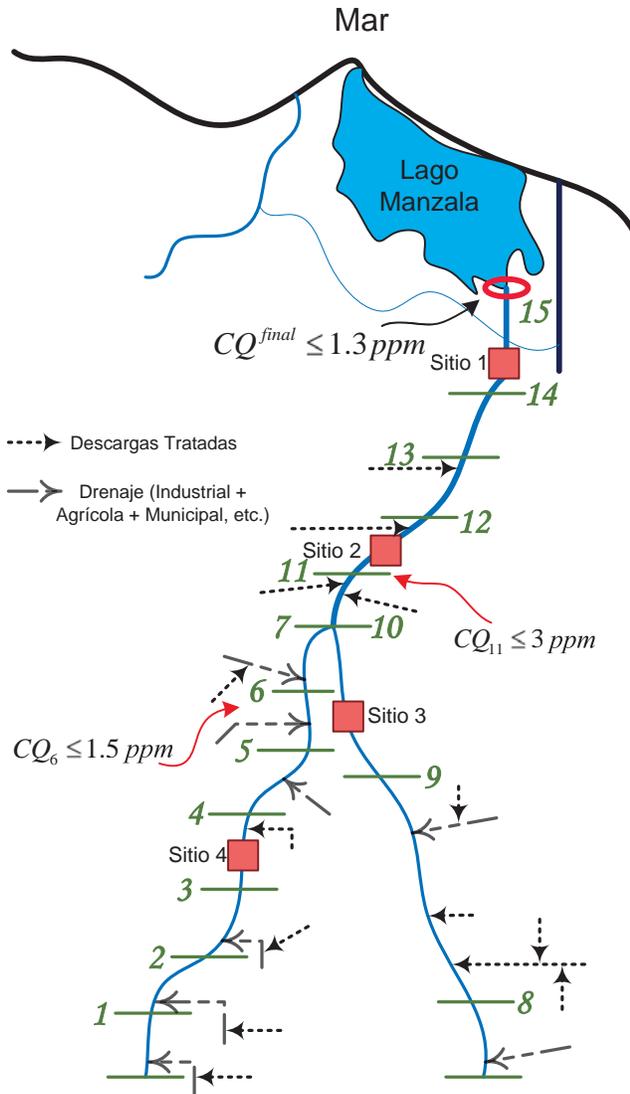


Figura 3.2 Sitios candidatos para la localización de la nueva planta en el Ejemplo 1.

2. Pérdidas insignificantes. Las pérdidas de filtración y evaporación son muy pequeñas en comparación de los flujos convectivos.
3. La concentración del fósforo a la salida de las plantas de tratamiento se tomó de 9 mg/L. Esta suposición se basa en los análisis de laboratorio de diferentes plantas de tratamiento.

4. La concentración del fósforo en las aguas residuales sin tratamiento fue tomada de 15 mg/L.
5. La concentración del fósforo para el agua con un primer tratamiento se tomó de 9.75 mg/L.
6. La concentración del drenaje agrícola fue tomado de 1.5 mg/L.

La cinética de la reacción que ocurre es de la siguiente forma:

Para tramos de río:

$$\int_{V=0}^{V_r} r_r dV_r = k * CQ_r * V_r, \forall r \in R$$

Para afluentes:

$$\int_{V=0}^{V_{r,t}} r_{r,t} dV_{r,t} = k * CT_{r,t} * V_{r,t}, \quad \forall r \in R, t \in T$$

Donde $k = 9.041909 \times 10^{-6} / s$ (Lovelady y col. 2009).

Además, se tienen los siguientes valores: $\alpha_{r,t} = 0.000066 m^3 / acre * s$, $\beta_{r,t} = 0.000023 m^3 / acre * s$ para los tramos de río 1-6 y 8, mientras que para los tramos de río 7 y 9-12 $\beta_{r,t} = 0.000011 m^3 / acre * s$. La planta opera 8600 hrs/año, el factor de anualización es 0.1.

Por último, los interceptores con sus respectivos costos y eficiencias son mostrados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Costo del tratamiento para los interceptores disponibles para el Ejemplo 1.

Interceptor	Costo Fijo, \$	Costo Variable, \$ h/m ³	Eficiencia, γ_j
1	568,000	0.235	0.95
2	446,000	0.193	0.84
3	353,000	0.168	0.76
4	0	0	0

El modelo se implementó en el lenguaje *General Algebraic Modeling System, GAMS* (Brooke y col., 2006) y usando el resolvidor DICOPT (Viswanathan y Grossmann, 1990). La solución óptima para este caso corresponde en ubicar a la nueva planta industrial en el sitio 1, donde 1.453 m³/s de la corriente de desecho de la nueva planta debe ser tratado en el interceptor

3, mientras que $0.547 \text{ m}^3/\text{s}$ de la misma corriente pueden enviarse sin tratamiento. De esta manera la corriente de descarga al río contiene 5.597 ppm de fósforo para asegurar que la degradación natural satisfaga la restricción a la descarga al reservorio final de 1.3 ppm, mientras que las restricciones en los tramos intermedios también se satisfacen. El costo total anual de esta solución son $\$17.6 \times 10^6/\text{año}$. La Tabla 3.3 muestra una comparación de resultados para los cuatro sitios que están disponibles. Cabe destacar que los sitios 1 y 2 requieren tratamiento para satisfacer la sustentabilidad del sistema, mientras que los sitios 3 y 4 no requieren tratamiento debido a su lejanía con el lago, por lo que en estos dos últimos casos el contaminante se degrada naturalmente; sin embargo, aunque no requieran tratamiento, sus costos de instalación son muy elevados y no son competitivos respecto a la solución óptima. Por otro lado, sí el problema se resuelve sin tomar en cuenta los aspectos ambientales (considerando exclusivamente los costos de instalación), la solución económica sería instalar la planta en el mismo sitio 1 sin tratamiento de la corriente de descarga; sin embargo, esto generaría una concentración descargada al lago de 1.5 ppm, el cual está 15.38% por encima de la concentración máxima requerida para mantener al sistema fuera de acumulaciones peligrosas.

En la Tabla 3.3 es posible identificar los incentivos que se requieren por los gobiernos locales de estas regiones para hacerlos económicamente atractivos a la instalación de la nueva planta industrial. Por ejemplo, el gobierno local del sitio 2 tendría que pagar un incentivo de $\$1.95 \times 10^6/\text{año}$ y el del sitio 4 $\$410,000/\text{año}$ para competir económicamente, considerando la parte ambiental. Por lo tanto, el modelo propuesto es una herramienta muy útil para los gobiernos, ya que les permite determinar los incentivos que tienen que pagar para considerarlos en la decisión final donde se ubicará a la nueva planta industrial, satisfaciendo las restricciones ambientales para los contaminantes descargados.

Tabla 3.3 Comparación de resultados para una restricción de 1.3 ppm en el Ejemplo 1.

Sitio	Costo de Instalación, $\$/\text{año}$	Costo del Tratamiento, $\$/\text{año}$	Costo Total Anual, $\$/\text{año}$
1	10×10^6	7.6×10^6	17.59×10^6
2	17×10^6	2.54×10^6	19.54×10^6
3	35×10^6	0	35×10^6
4	18×10^6	0	18×10^6

La Tabla 3.4 muestra una comparación detallada de los costos asociados a la instalación de la nueva planta para los diferentes sitios disponibles, con diferentes límites superiores de la

concentración del contaminante descargado a la disposición final. La información presentada en la Tabla 3.4 es el resultado de un análisis de sensibilidad para cuando la concentración del contaminante descargado a la disposición final varía, la cual también puede ser una herramienta útil para los inversionistas y autoridades de los gobiernos interesados en analizar varios escenarios antes de instalar la nueva planta.

Tabla 3.4 Análisis de sensibilidad del costo total anual y las restricciones de sustentabilidad para cada sitio en el Ejemplo 1.

Concentración Descargada a la Disposición Final menor a	Costo Total Anual, \$/año para cada sitio			
	1	2	3	4
1.2	21.73x10 ⁶	28.02x10 ⁶	46.63x10 ⁶	27.55x10 ⁶
1.25	19.46x10 ⁶	23.56x10 ⁶	39.86x10 ⁶	19.39x10 ⁶
1.3	17.59x10 ⁶	19.54x10 ⁶	35x10 ⁶	18x10 ⁶
1.4	13.86x10 ⁶	17x10 ⁶	35x10 ⁶	18x10 ⁶
1.503	10x10 ⁶	17x10 ⁶	35x10 ⁶	18x10 ⁶

Finalmente, usando la metodología propuesta es posible desarrollar una optimización multiobjetivo para determinar el comportamiento del costo total anual con respecto a la concentración descargada a la disposición final, considerando simultáneamente la localización óptima y los requerimientos del tratamiento. La curva Pareto óptima se presenta en la Figura 3.3. Note que las soluciones por encima de la curva Pareto, representan soluciones sub-óptimas, mientras que las que se encuentran por debajo son soluciones infactibles.

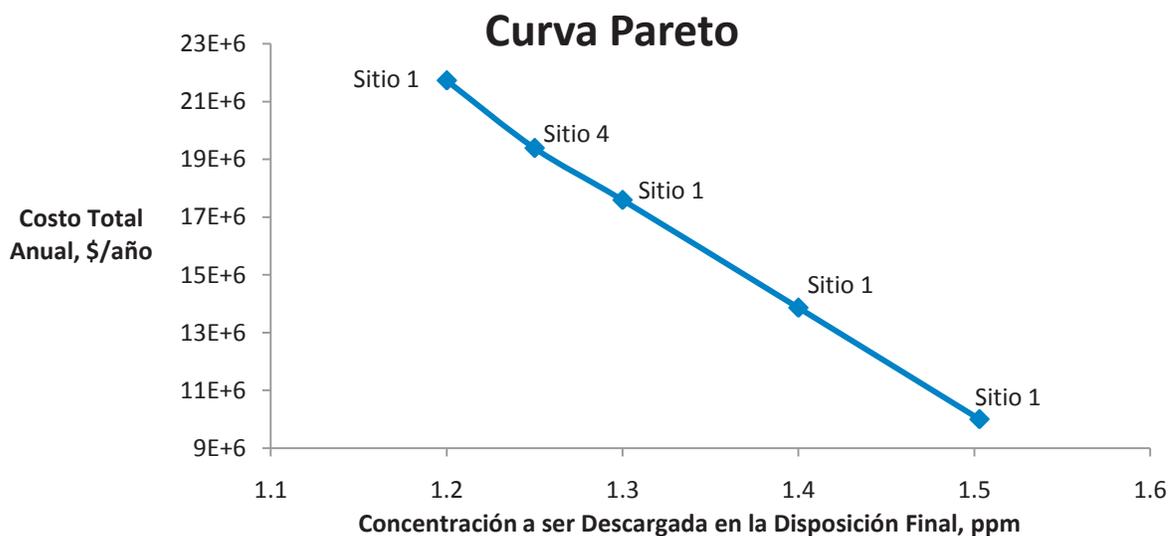


Figura 3.3 Curva Pareto para el Ejemplo 1.

Ejemplo 2. Caso de Estudio Local

Este caso de estudio está basado en la cuenca del Balsas localizado en nuestro país, cuyos datos se tomaron de CONAGUA (2009a, 2009b). Este sistema es uno de los más grandes en México, donde varias industrias descargan sus efluentes. La Figura 3.4 muestra las corrientes principales del río y las 20 posibles localizaciones para ubicar la nueva planta industrial que descarga un componente peligroso (en este caso el componente clave es el arsénico, el cual es muy tóxico).

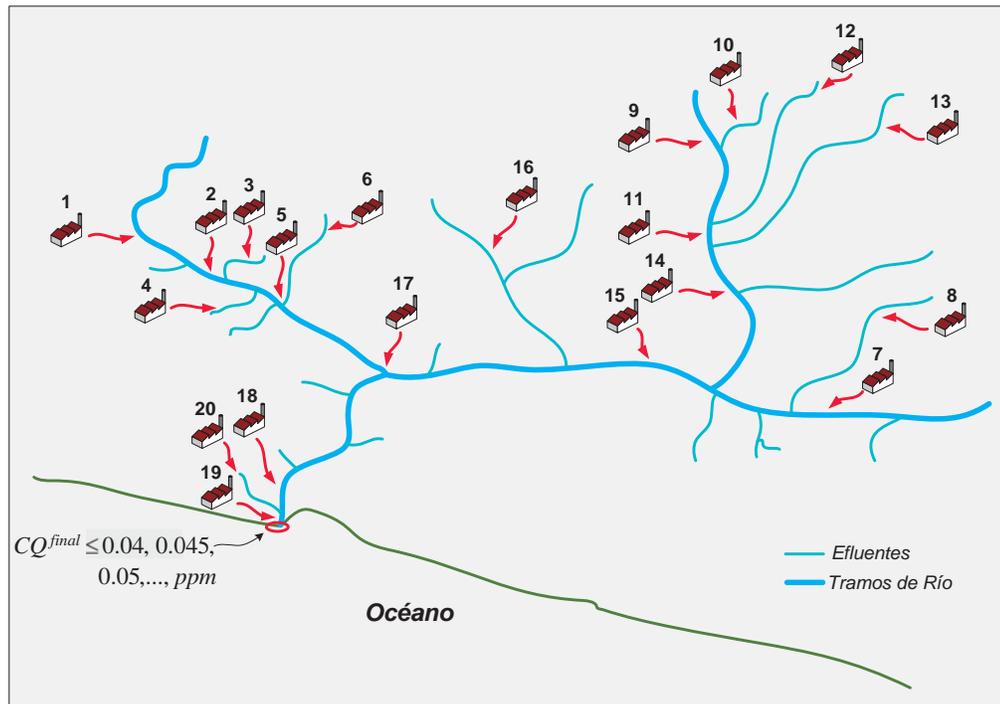


Figura 3.4 Localizaciones disponibles para la nueva planta industrial para el Ejemplo 2.

Se realizaron las siguientes suposiciones para el contaminante considerado en este ejemplo:

1. La concentración de las descargas sanitarias sin tratamiento ($CS_{r,t}^{notratada}$) es 0.5 ppm.
2. La concentración de las descargas sanitarias con tratamiento ($CS_{r,t}^{tratada}$) es 0.03 ppm.
3. La concentración de las descargas industriales ($CI_{r,t}$) es 0.06 ppm.
4. La concentración de la precipitación ($CP_{r,t}$) es 0 ppm.
5. La concentración de las descargas agrícolas ($CD_{r,t}$) es 0.055 ppm.

6. La concentración de las descargas sanitarias e industriales (CH_r) es 0.07 ppm.
7. La concentración de las descargas directas (CD_r) es 0.075 ppm.

Sin embargo, el modelo propuesto es general y puede ser aplicado a cualquier caso con sus datos y condiciones específicos. El flujo que descargará la nueva planta es $5 \text{ m}^3/\text{s}$ y la concentración a la salida de la nueva planta son 20 ppm.

La Tabla 3.5 muestra los datos para los costos de instalación para las diferentes alternativas para localizar la planta (recordando que estos costos incluyen el transporte de materias primas, productos y el costo del terreno). Note que los sitios 18, 19 y 20 son los más económicos, debido a que se encuentran cercanos a una zona portuaria, disminuyendo los costos del transporte.

Tabla 3.5 Costos de instalación para el Ejemplo 2.

Sitio	Costo de Instalación Anualizado, \$/año
1	12×10^6
2	8×10^6
3	9.5×10^6
4	8×10^6
5	9.5×10^6
6	8×10^6
7	12.5×10^6
8	10.5×10^6
9	7.7×10^6
10	7×10^6
11	7.8×10^6
12	7.5×10^6
13	8.2×10^6
14	8.5×10^6
15	7.6×10^6
16	9.5×10^6
17	9×10^6
18	5×10^6
19	4.8×10^6
20	5.5×10^6

Por otro lado, la interacción química entre el contaminante y el ambiente es representada por una reacción de primer orden con una constante cinética de $k = 4.52095 \times 10^{-7} / s$. Dicha constante fue aproximada de acuerdo a los datos reportados en CONAGUA 2009a, 2009b.

Para este caso se tienen los siguientes valores: $\alpha_{r,t} = 0.000148 \text{ m}^3 / \text{ha} * s$, $\beta_{r,t} = 0.000296 \text{ m}^3 / \text{ha} * s$, la planta opera 8600 hrs /año, el factor de anualización es 0.1.

Se requieren las siguientes restricciones para mantener la calidad del agua en tramos de río intermedios, para su uso adecuado: 1) En el tramo 5, algunos agricultores toman agua del río; por lo tanto, la composición de este tramo debe ser menor a 2.5 ppm; 2) Hay una ciudad que se abastece de agua del tramo 15, por lo que se requiere que la concentración del contaminante no supere 0.3 ppm; 3) Otra ciudad se localiza cerca del sitio 18 y el agua que se extrae de este tramo requiere una concentración máxima de 0.15 ppm. Los datos para los interceptores disponibles para el tratamiento se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Datos de los interceptores disponibles para el Ejemplo 2.

Interceptor	Costo Fijo, \$	Costo Variable, \$ h/m ³	Factor de Eficiencia, γ_j
1	195,000	0.058	0.95
2	186,000	0.052	0.88
3	179,500	0.049	0.85
4	175,400	0.047	0.82
5	170,000	0.043	0.79
6	162,000	0.039	0.75
7	158,000	0.035	0.73
8	144,000	0.031	0.71
9	137,500	0.028	0.68
10	126,000	0.025	0.64
11	0	0	0

Para considerar adecuadamente los aspectos ambientales se requiere incluir una restricción para la concentración del contaminante en la disposición final, la cual debe ser menor a la concentración del contaminante que puede ser degradada naturalmente por el sistema, evitando la acumulación. La concentración que actualmente se descarga a la disposición final sin considerar aún la descarga de la nueva planta es de 0.037 ppm para el contaminante considerado.

Para la solución del problema, primero se considera la solución económica (dejando de lado los aspectos ambientales); en este sentido, el sitio 19 es el que presenta el menor C_{land_p} , con un costo total anual de $\$4.8 \times 10^6/\text{año}$ y una concentración de 0.206 ppm que se descargará al reservorio final. Posteriormente, se consideran varios escenarios:

Caso A. La concentración disponible a ser descargada a la disposición final debe ser menor a 0.04 ppm. La solución óptima para el caso A es instalar la nueva planta en el sitio 2, con un costo total anual de $\$11.85 \times 10^6/\text{año}$ y un tratamiento de $0.471 \text{ m}^3/\text{s}$ de la corriente de desecho en el interceptor 9, mientras que el resto ($4.529 \text{ m}^3/\text{s}$) debe pasar al interceptor 10, para obtener una descarga al río de 7.125 ppm y que puede ser naturalmente degradada tanto en el río como en la disposición final. El caso A requiere invertir 247 % más en comparación a la solución económica y así obtener una reducción del 80% de la concentración en la corriente descargada a la disposición final.

Caso B. La concentración final a descargar en la disposición final debe ser menor a 0.045 ppm para el contaminante considerado. En este caso, la localización óptima de la nueva planta, también se ubica en el sitio 2, pero la corriente de desecho no requiere tratamiento alguno, resultando un costo de $\$8 \times 10^6/\text{año}$. Comparando este resultado con la solución económica, se tiene que se puede lograr una reducción de hasta el 78% (0.045 ppm) en la concentración que recibirá la disposición final, invirtiendo $\$8 \times 10^6/\text{año}$ que representa aproximadamente el 166%, respecto a la solución económica.

Caso C. La concentración en la disposición final debe ser menor a 0.05 ppm. En este caso, el costo es de $\$7.35 \times 10^6/\text{año}$ y la localización óptima es el sitio 10 usando el interceptor 10 para tratar $0.447 \text{ m}^3/\text{s}$ de la corriente que descarga la nueva planta. La concentración del contaminante que descargaría la planta sobre el río es de 18.855 ppm. Por lo tanto, invirtiendo 153% respecto a la solución económica, se puede reducir en un 75% la concentración que recibirá la disposición final respecto de la solución económica.

Caso D. La concentración en la disposición final debe ser menor a 0.06 ppm. La solución óptima para este caso es instalar la nueva planta en el sitio 10, lo cual representaría un costo total anual de $\$7 \times 10^6/\text{año}$, sin tratamiento alguno de la corriente de desecho ya que se puede degradar naturalmente el contaminante. Comparando este resultado con la solución económica, el Caso D

necesita invertir 146% más para obtener una reducción del 70% para la concentración descargada a la disposición final.

Caso E. La concentración en la disposición final debe ser menor a 0.14 ppm. Debido a que en este caso la restricción es más relajada. La solución óptima es el sitio 18, un sitio cercano a la disposición final con un costo de total de $\$6.17 \times 10^6/\text{año}$. Se requiere tratar $2.235 \text{m}^3/\text{s}$ usando el interceptor 10 para satisfacer las restricciones ambientales y reducir la concentración de la corriente que descargará la nueva planta al río hasta 14.279 ppm. Además, para este caso se tiene que invirtiendo 128% más que la solución económica y la concentración en la disposición final se reduce en un 32%

La Tabla 3.7 presenta una comparación de resultados para los casos previamente analizados (incluyendo la solución económica en la última fila). La Tabla 3.7 muestra también las concentraciones para los tramos intermedios que requieren restringirse, donde se observa que éstas se cumplen satisfactoriamente. Obsérvese que el costo total anual incrementa proporcionalmente a la regulación de la disposición final del contaminante.

Tabla 3.7 Comparación de resultados para diferentes restricciones de sustentabilidad en el Ejemplo 2.

Restricción	Sitio	y^{disc} (ppm)	Concentración Tramos Intermedios, ppm			Costo de Instalación, $\$/\text{año}$	Costo del Tratamiento, $\$/\text{año}$	Costo Total Anual, $\$/\text{año}$
			1	2	3			
0.04 ppm	2	7.125	0.943	0.139	0.032	8×10^6	3.85×10^6	11.85×10^6
0.045 ppm	2	20	2.445	0.139	0.037	8×10^6	0	8×10^6
0.05 ppm	10	18.855	0.123	0.277	0.042	7×10^6	3.50×10^5	7.35×10^6
0.06 ppm	10	20	0.123	0.285	0.043	7×10^6	0	7×10^6
0.14 ppm	18	14.279	0.123	0.139	0.137	5×10^6	1.7×10^6	6.7×10^6
0.206 ppm	19	20	0.123	0.139	0.029	4.8×10^6	0	4.8×10^6

Por otro lado, la Tabla 3.8 muestra diferentes escenarios para instalar la nueva planta en diferentes localizaciones con diferentes concentraciones de descarga a la disposición final. Todas estas opciones satisfacen las restricciones intermedias de los tramos del río. De esta tabla, pueden surgir discusiones como la siguiente: si se fija una concentración de 0.05 ppm para la disposición final, entonces la localización óptima es el sitio 10. Sin embargo, si los gobiernos locales de los sitios 15 y 17 estuvieran interesados en atraer la nueva industria, ellos requerirían incentivos de $\$2.23 \times 10^6/\text{año}$ y de $\$3.74 \times 10^6/\text{año}$, respectivamente, para competir con la solución óptima.

Tabla 3.8 Costos totales para diferentes restricciones de sustentabilidad y algunos de los sitios disponibles en el Ejemplo 2.

Límite Superior para la Concentración en la Disposición Final, ppm	Costo Total Anual para el Sitio, \$/año					
	2	10	15	17	18	19
0.04	11.85x10 ⁶	13.25x10 ⁶	14.84x10 ⁶	16.30x10 ⁶	Infactible	Infactible
0.045	8x10 ⁶	9.54x10 ⁶	11.13x10 ⁶	12.60x10 ⁶	13.73x10 ⁶	Infactible
0.05	8x10 ⁶	7.35x10 ⁶	9.58x10 ⁶	11.09x10 ⁶	13.14x10 ⁶	13.16x10 ⁶
0.06	8x10 ⁶	7x10 ⁶	7.6x10 ⁶	9x10 ⁶	11.96x10 ⁶	12.15x10 ⁶
0.14	8x10 ⁶	7x10 ⁶	7.6x10 ⁶	9x10 ⁶	6.70x10 ⁶	7.13x10 ⁶
0.206	8x10 ⁶	7x10 ⁶	7.6x10 ⁶	9x10 ⁶	5x10 ⁶	4.8x10 ⁶

La Figura 3.5 muestra la curva Pareto para este caso. Mostrando el comportamiento de las diferentes soluciones óptimas, para varias concentraciones que se pueden descargar al océano. Igualmente, esta curva Pareto puede usarse para un análisis de los diferentes escenarios.

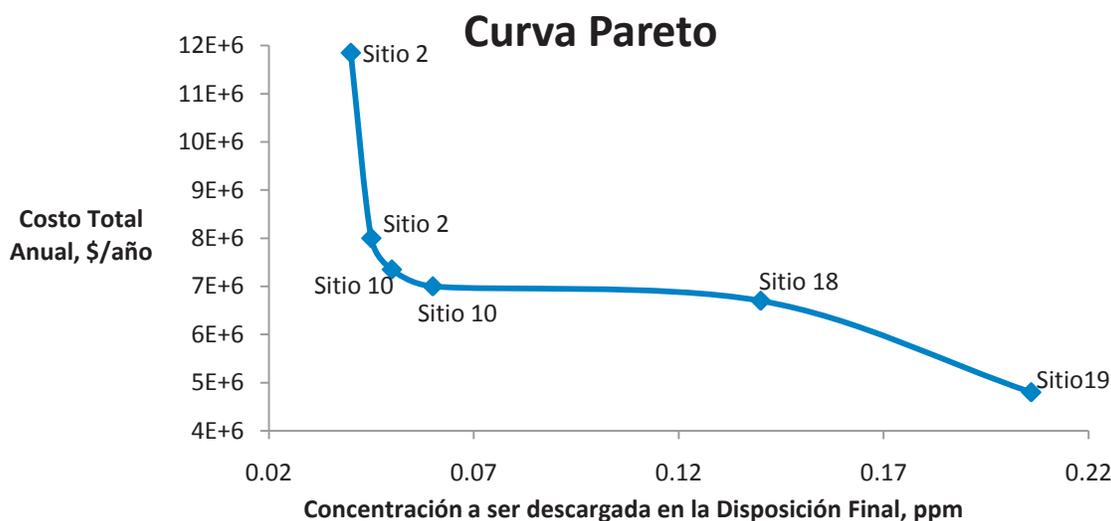


Figura 3.5 Curva Pareto para el Ejemplo 2.

Finalmente, la Tabla 3.9 muestra el tamaño y tiempo de cómputo para ambos ejemplos en un procesador Core 2, con 3 MB de RAM. Resaltando que los tiempos de cómputo son pequeños, haciendo amigable su uso. Este trabajo ha sido publicado en el *IECR* (ver Apéndice A).

Tabla 3.9 Tamaño y tiempo de cómputo para los problemas considerados.

Concepto	Ejemplo 1	Ejemplo 2
Número de Ecuaciones	81	1,479
Número de Variables Continuas	82	1,476
Número de Variables Binarias	8	31
Tiempo de Cómputo (s)	0.37	1.68

Capítulo 4. Modelo con Integración Másica Considerando Múltiples Contaminantes

Con el propósito de facilitar su entendimiento, primeramente se definirán los conjuntos usados en la formulación del modelo: i es un subíndice que denota las corrientes de proceso de la nueva planta industrial, N_i corresponde al número total de corrientes de proceso, así I es el conjunto de las mismas. j es el subíndice de los equipos de proceso de la nueva planta, N_j es el número total de los equipos de proceso y J es su conjunto. k es un subíndice usado para las corrientes frescas disponibles, N_k es el número total de corrientes frescas, mientras que K es el conjunto. c es un subíndice usado para denotar un componente, mientras que N_c corresponde al número total de componentes, C es un conjunto que contiene todos los c . r es un subíndice usado para denotar una sección del río, mientras que N_r corresponde al número total de secciones del río usado para un problema específico, R es un conjunto que contiene todas las r . t es un subíndice para los afluentes descargados al río, N_t es el número total de afluentes y T su conjunto. p es un subíndice para denotar las localizaciones de la nueva planta, N_p denota el número total de posibles localizaciones y P su conjunto. Ahora, para el tratamiento de las corrientes, int es el subíndice para las unidades de tratamiento, N_{int} corresponde al número total de interceptores disponibles para tratar los componentes, mientras que INT es el conjunto.

Las diferencias principales entre el capítulo presente y el anterior se enlistan a continuación:

- ✚ Se realiza la integración másica de las corrientes internas de la nueva planta a través de la superestructura propuesta por Ponce-Ortega y col. (2010).
- ✚ El modelo del análisis del flujo de los materiales es extendido a múltiples contaminantes.
- ✚ El flujo de descarga de la nueva planta industrial al ambiente (*Waste*) ahora se considera como una variable de diseño.
- ✚ Se integra a la función objetivo el costo de las materias primas y el costo generado por las tuberías.

4.1 Metodología

El modelo se basa en la técnica del análisis del flujo de los materiales para predecir el comportamiento de la cuenca, así como también se usa un modelo disyuntivo para localizar la

nueva planta industrial y las ecuaciones requeridas para modelar la superestructura de la red de reciclaje y reúso dentro de la planta. El modelo generado se describe a continuación.

Ecuaciones del Modelo MFA

La técnica del MFA se usa para modelar al sistema acuífero y para predecir la trayectoria de los contaminantes descargados de la nueva planta y sus interacciones con el ambiente. De esta forma, la cuenca se clasifica en afluentes y tramos de río, y se requieren los siguientes balances totales y de componente.

Balance Total para cada Tramo de Río. El balance establece que el flujo a la salida (Q_r) de cada tramo r es igual al flujo de entrada al mismo (Q_{r-1}), más la precipitación (P_r), descargas directas industriales (D_r), residenciales (H_r), la sumatoria de las descargas de los afluentes ($FT_{r,t}$), y la posible descarga de la nueva planta ($QPNEW_{r,p}$) del sitio disponible p al tramo r , menos las pérdidas debidas a filtración y evaporación (L_r) así como al uso de agua (U_r). Este último se refiere a las corrientes de extracción sobre la sección del río. De esta manera, el balance puede escribirse como sigue:

$$Q_r = Q_{r-1} + P_r + D_r + H_r + \sum_{t=1}^{N_{t(r)}} FT_{r,t} + QPNEW_{r,p} - L_r - U_r, \quad \forall r \in R \quad (4.1)$$

Donde $N_{t(r)}$ se refiere al número total de afluentes que se descargan al tramo de río r .

Balance por Componente para cada Tramo de Río. La masa de cada componente peligroso c a la salida de cada tramo r es igual a la masa a la entrada, más la masa contenida en la precipitación, descargas industriales, descargas residenciales, la sumatoria de los afluentes y la posible descarga de la nueva planta, menos la masa contenida en las pérdidas y el uso, considerando también la masa descompuesta en las reacciones químicas que se llevan a cabo en esa sección del río. El término reactivo considera las reacciones químicas y bioquímicas que se producen en el río, debido a la interacción del componente con el sistema. Por lo tanto, el balance para cada componente en cada tramo se escribe como sigue:

$$Q_r C Q_{c,r} = Q_{r-1} C Q_{c,r-1} + P_r C P_{c,r} + D_r C D_{c,r} + H_r C H_{c,r} + \sum_{t=1}^{N_t(r)} F T_{r,t} C T_{c,r,t} + Q P N E W_{r,p} C P N E W_{c,r,p} - L_r C L_{c,r} - U_r C U_{c,r} - \int_{V=0}^{V_r} r_{c,r} dV_r, \quad \forall c \in C, r \in R \quad (4.2)$$

Balance Total para cada Afluente. El flujo del afluente t que descarga al tramo r es igual a la suma de las descargas residuales sin tratamiento ($S_{r,t}^{notratada}$), con tratamiento ($S_{r,t}^{tratada}$), industriales ($I_{r,t}$), precipitación ($P_{r,t}$) descargas directas ($D_{r,t}$) y la posible descarga de la nueva planta ($Q P N E W_{r,t,p}$) menos las pérdidas ($L_{r,t}$) y el uso ($U_{r,t}$).

$$F T_{r,t} = S_{r,t}^{notratada} + S_{r,t}^{tratada} + I_{r,t} + P_{r,t} + D_{r,t} + Q P N E W_{r,t,p} - L_{r,t} - U_{r,t}, \quad \forall r \in R, t \in T \quad (4.3)$$

Balance por Componente para Afluentes. La masa del componente c en el afluente t que descarga al tramo de río r , se calcula de la siguiente forma:

$$F T_{r,t} C T_{c,r,t} = S_{r,t}^{notratada} C S_{c,r,t}^{notratada} + S_{r,t}^{tratada} C S_{c,r,t}^{tratada} + I_{r,t} C I_{c,r,t} + P_{r,t} C P_{c,r,t} + D_{r,t} C D_{c,r,t} + Q P N E W_{r,t,p} C P N E W_{c,r,t,p} - L_{r,t} C L_{c,r,t} - U_{r,t} C U_{c,r,t} - \int_{V=0}^{V_{r,t}} r_{c,r,t} dV_{r,t}, \quad \forall c \in C, r \in R, t \in T \quad (4.4)$$

Aquí, una vez más aparece el término reactivo.

Descargas y Usos Agrícolas. Las descargas ($D_{r,t}$) y usos ($U_{r,t}$) agrícolas se calculan a través de las siguientes relaciones:

$$D_{r,t} = \alpha_{r,t} A_{r,t}, \quad \forall r \in R, t \in T$$

$$U_{r,t} = \beta_{r,t} A_{r,t}, \quad \forall r \in R, t \in T$$

Donde $\alpha_{r,t}$ es el flujo de agua requerida por unidad de área para propósitos agrícolas en $m^3/acre*s$, $\beta_{r,t}$ es el flujo descargado por unidad de área y sus unidades también son $m^3/acre*s$ mientras que $A_{r,t}$ es el área de cultivo a la que sirve el afluente t que descarga en el tramo de río r .

Ecuaciones de la Localización de la Planta

El modelo disyuntivo presentado para la formulación basada en un sólo componente puede funcionar para el caso de múltiples contaminantes con una ligera alteración, la cual se detalla a continuación: Si existe un conjunto p de posibles localizaciones donde puede ser instalada la nueva planta, se genera una posible descarga de la nueva planta por cada sitio disponible debido a que el flujo y la composición de cada contaminante que puede descargar la nueva planta al río dependen directamente de su posición. Por lo tanto, si la nueva planta se localiza en la posición 1, el flujo y la composición de cada componente descargados de la nueva planta al ambiente en la posición 1 deberán ser mayores a cero; de no instalarse la planta en esta posición, los valores del flujo y las composiciones de los contaminantes serán iguales a cero. Este esquema se repite para las p posibles localizaciones de la planta. Lo anterior se modela a través de la disyunción siguiente:

$$\left[\begin{array}{c} Y_1 \\ CPNEW_{c,1} \geq 0, QPNEW_1 \geq 0 \\ CPNEW_{c,2} = 0, QPNEW_2 = 0 \\ \vdots \\ CPNEW_{c,p} = 0, QPNEW_p = 0 \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} Y_2 \\ CPNEW_{c,1} = 0, QPNEW_1 = 0 \\ CPNEW_{c,2} \geq 0, QPNEW_2 \geq 0 \\ \vdots \\ CPNEW_{c,p} = 0, QPNEW_p = 0 \end{array} \right] \vee \dots \vee \left[\begin{array}{c} Y_p \\ CPNEW_{c,1} = 0, QPNEW_1 = 0 \\ CPNEW_{c,2} = 0, QPNEW_2 = 0 \\ \vdots \\ CPNEW_{c,p} \geq 0, QPNEW_p \geq 0 \end{array} \right], \forall c \in C$$

Donde Y_p es la variable booleana asociada a la localización p de la planta y $QPNEW_p$ es el flujo de descarga que generará la nueva planta al ambiente en la localización p , mientras que $CPNEW_{c,p}$ es la concentración final de cada componente c descargado de la nueva planta al río en la posición p . En este sentido, lo que dice el modelo disyuntivo es que si la localización óptima de la planta es instalar la nueva planta en el sitio 1, entonces Y_1 es verdadera y tanto $CPNEW_{c,1}$ como $QPNEW_1$ tienen valores mayores de cero, mientras que todas las demás Y_p son falsas y sus correspondientes valores de $QPNEW_p$ y $CPNEW_{c,p}$ toman un valor de cero. Situaciones similares ocurren para cuando la localización seleccionada es la 2, 3, ..., p alternativa. Es importante mencionar que los valores de $QPNEW_p$ y $CPNEW_{c,p}$ están directamente sujetos al modelo *MFA* que puede predecir el comportamiento del río, cumpliendo con las regulaciones ambientales de cada contaminante descargado al lago para mantenerlos bajo control, e incluyendo

las restricciones de sustentabilidad en el reservorio final. Finalmente, la disyunción se reformula usando la técnica del *convex-hull* (ver Raman y Grossmann, 1994; Vecchietti y col., 2003; Ponce-Ortega y col., 2009b).

Las variables Booleanas se transforman en un conjunto de variables binarias. Cuando las variables Booleanas son verdaderas, las variables binarias asociadas son iguales a uno; en caso contrario, cuando las Booleanas son falsas, las variables binarias asociadas son iguales a cero. Por lo tanto, la siguiente relación se usa para seleccionar sólo una alternativa para localizar la nueva planta industrial:

$$\sum_{p \in P} y_p = 1 \quad (4.5)$$

Los límites superiores para el flujo ($QPNEW_p$) y la concentración de cada componente ($CPNEW_{c,p}$) de la nueva planta que deben cumplirse se expresan como:

$$QPNEW_p \leq QPNEW^{UP} y_p, \quad \forall p \in P \quad (4.6)$$

$$CPNEW_{c,p} \leq CPNEW^{UP} y_p, \quad \forall c \in C, p \in P \quad (4.7)$$

Donde $QPNEW^{UP}$ y $CPNEW^{UP}$ son los límites superiores para $QPNEW_p$ y $CPNEW_{c,p}$, respectivamente. $CPNEW^{UP}$ es el límite superior para la concentración de cualquier contaminante. Este par de restricciones se usan para asegurar que tanto $QPNEW_p$ como $CPNEW_{c,p}$ tomen valores mayores a cero sólo cuando la nueva planta se localice en esa posición; por otro lado, $QPNEW_p$ y $CPNEW_{c,p}$ deben tomar valores iguales a cero, cuando el sitio no es seleccionado.

Ecuaciones de la Superestructura

La superestructura que se propone en el presente trabajo se basa en las superestructuras propuestas por Ponce-Ortega y col., (2010) y Gabriel y El-Halwagi (2005). La ventaja de esta representación es que segrega las corrientes de recursos frescos y del proceso evitando los términos no lineales que de otra manera aparecerían en el modelo al permitir el mezclado de corrientes como sucede en las superestructuras convencionales. En el modelado de la

superestructura se incorporan las restricciones de composición tanto a la entrada de los equipos como en la corriente de descarga (*Waste*); estas últimas se conocen como regulaciones ambientales. Para satisfacer estas restricciones, las corrientes de proceso pueden ser tratadas en el esquema de intercepción (como se aprecia en la Figura 2.5). La segregación de las corrientes de proceso se presenta antes de ser enviadas a cada interceptor y a la salida de la red de tratamiento para ser enviadas a los equipos y a la corriente de desecho de la nueva planta. En el caso de las corrientes frescas, la segregación existe al enviarlas a los equipos de proceso (nótese que las corrientes frescas únicamente pueden enviarse a los equipos y no a la corriente de desecho) con el fin de diluir la mezcla de corrientes antes de entrar a los equipos y satisfacer las restricciones impuestas.

Al integrar la superestructura para la integración másica dentro de la nueva planta con el modelo del análisis del flujo de los materiales para considerar los procesos que ocurren fuera de la planta, incluyendo el modelo disyuntivo para la localización, es necesario conectar las variables usadas en cada uno de estos modelos. En este sentido, el flujo descargado de la nueva planta se calcula como la suma de las descargas en todas las posiciones disponibles, situación similar ocurre para la composición; de esta manera se originan las siguientes ecuaciones:

$$\sum_{p \in P} QPNEW_p = Waste \quad (4.8)$$

$$\sum_{p \in P} CPNEW_{c,p} = y_c^{disc}, \quad \forall c \in C \quad (4.9)$$

Donde *Waste* es el flujo de la descarga de la nueva planta y y_c^{disc} representa la composición de cada contaminante. La ecuación (4.5) asegura la selección de sólo un sitio para la solución óptima, entonces sólo una de las variables *p* se activará, lo que a su vez garantiza que sólo las $QPNEW_p$ y $CPNEW_{c,p}$ asociadas al sitio seleccionado serán mayores a cero, por lo que las ecuaciones (4.8) y (4.9) se satisfacen.

Segregación de las Corrientes Frescas. Cada corriente fresca se segrega para ser enviada a los equipos:

$$F_k = \sum_{j \in J} f_{k,j}, \quad \forall k \in K \quad (4.10)$$

Donde F_k es el flujo total de la corriente k y $f_{k,j}$ es el flujo segregado de la corriente fresca k al equipo j . Recordando que las corrientes frescas sólo pueden ser enviadas a los equipos.

Segregación de las Corrientes de Proceso a los Interceptores. La red de tratamiento se segrega de manera tal que no se permite el mezclado entre ellas durante el tratamiento, sólo está permitido su mezclado al final del tratamiento (a la entrada de los equipos o antes de ser enviada al ambiente). Cuando una corriente de proceso no requiere ser tratada, se usa una unidad ficticia (colocada al final) con eficiencias y costos iguales a cero.

La ecuación siguiente representa la segregación de cada corriente de proceso para tratar los componentes en los interceptores disponibles, cada uno de ellos con costos y eficiencias dados:

$$W_i = \sum_{int \in INT} w_i^{int}, \quad \forall i \in I \quad (4.11)$$

Segregación de las Corrientes a la Salida de la Red de Tratamiento. Una vez que los componentes han sido tratados, las corrientes a la salida de la red de tratamiento se envían a los equipos y al desecho:

$$w_i^{int} = \sum_{j \in J} g_{i,j}^{int} + g_{i,Waste}^{int}, \quad \forall i \in I, int \in INT \quad (4.12)$$

Balance Total en el Punto de Mezclado Antes de Cada Equipo. El flujo total a la entrada de cada equipo es igual a la suma de las corrientes de proceso a la salida de la red de tratamiento que se envían al equipo j , y el flujo de las corrientes frescas que entran al equipo j :

$$G_j = \sum_{i \in I} \sum_{int \in INT} g_{i,j}^{int} + \sum_{k \in K} f_{k,j}, \quad \forall j \in J \quad (4.13)$$

Nótese que el flujo a la entrada de los equipos es un dato en el problema que se debe satisfacer.

Balance de Componente en el Punto de Mezclado a la Entrada de Cada Equipo. Los balances de componente antes de la entrada a los equipos se usan para determinar el valor de las composiciones de las corrientes que alimentan a cada equipo.

$$G_j y_{j,c}^{InSink} = \sum_{i \in I} \sum_{int \in INT} g_{i,j}^{int} y_{i,c}^{Out,int} + \sum_{k \in K} f_{k,j} y_{k,c}^{InFresh}, \quad \forall j \in J, c \in C \quad (4.14)$$

Balance Total en la Corriente de Desecho. El flujo total de la corriente de desecho que se enviará al ambiente es igual a la suma de las corrientes segregadas de la red de tratamiento que se dirigen al mismo:

$$Waste = \sum_{i \in I} \sum_{int \in INT} g_{i,Waste}^{int} \quad (4.15)$$

Balance de Componente en la Corriente de Desecho. El balance de componente en la corriente de desecho es necesario para determinar la composición de cada componente en dicha corriente, y que además funciona para verificar el cumplimiento de las regulaciones ambientales:

$$Waste y_c^{disc} = \sum_{i \in I} \sum_{int \in INT} g_{i,Waste}^{int} y_{i,c}^{Out,int}, \quad \forall c \in C \quad (4.16)$$

Ecuaciones que Activan los Costos Fijos de los Interceptores. Estas ecuaciones son necesarias para activar los costos fijos de los interceptores, ya que sin ellas, el modelo sólo tomaría en cuenta los costos variables de las unidades de tratamiento. Por lo tanto, para activar los costos fijos en el tratamiento se requieren las siguientes ecuaciones:

$$w_i^{int} \geq w^{LO} z_i^{int}, \quad \forall i \in I, int \in INT \quad (4.17)$$

$$w_i^{int} \leq w^{UP} z_i^{int}, \quad \forall i \in I, int \in INT \quad (4.18)$$

Donde w^{LO} es el flujo mínimo que puede ser tratado en cualquier interceptor. w^{UP} es un límite superior para w_i^{int} , mientras que z_i^{int} es una variable binaria asociada a la existencia del interceptor int para tratar las corrientes de proceso i .

Restricciones en los equipos. Además de las restricciones ambientales, existen otro conjunto de restricciones para la composición de las corrientes de entrada a los equipos de proceso. Estas restricciones para los equipos pueden ser límites tanto mínimos como máximos:

$$y_{j,c}^{InSink,min} \leq y_{j,c}^{InSink} \leq y_{j,c}^{InSink,max}, \quad \forall j \in J, c \in C \quad (4.19)$$

Regulaciones Ambientales. Las regulaciones ambientales imponen un conjunto de restricciones en términos de composición para la corriente de descarga:

$$y_c^{disc,min} \leq y_c^{disc} \leq y_c^{disc,max}, \quad \forall c \in C \quad (4.20)$$

A pesar de que existan regulaciones ambientales en la corriente de descarga, es posible que éstas no sean suficientes para evitar la acumulación de contaminantes en la disposición final (lago, mar u océano), pudiendo generar que el proceso global no sea sostenible.

Restricciones para la Calidad de Agua en Tramos de Río. Algunos tramos del río requieren restricciones específicas, debido a que en ellos se le da un uso específico al agua, por lo que se requiere mantener la calidad de la misma. El modelo puede considerar este tipo de restricciones, y en este caso en particular se hace a través de las siguientes relaciones:

$$CQ_{c,nr} \leq y_{c,nr}^{deseada}, \quad \forall c \in C, n \in N, r \in R \quad (4.21)$$

Donde $N(R)$ representa un subconjunto de tramos de río n que requieren una calidad de agua en específico.

Restricciones de Sustentabilidad. Aunque se imponen regulaciones ambientales a la corriente de desecho y se satisfagan, es posible que éstas no resulten suficientes para prever y evitar la acumulación de los contaminantes en la disposición final. Entonces, para lograr la sostenibilidad del proceso se imponen la siguientes restricciones:

$$CQ_c^{final} \leq y_c^{sustentable} \quad (4.22)$$

Donde CQ_c^{final} es la concentración de cada componente en el último tramo de río. En otras palabras, ésta es la concentración que recibirá el reservorio o disposición final después de instalar la nueva planta industrial, y $y_c^{sustentable}$ son las restricciones de sustentabilidad impuestas para cada componente. Obsérvese que las restricciones de sustentabilidad se generan de un estudio previo al proceso de optimización.

Función Objetivo

La función objetivo consiste en la minimización del costo total anual (*TAC*), que se constituye de cuatro componentes: el costo de la instalación de la nueva planta ($Cland_p$), el costo de las corrientes frescas ($FreC_k$), los costos del tratamiento ($VarC^{int}$ y $FixC^{int}$) y los costos de tubería para diferentes segmentos ($TrPipC_i^{int}$, $WaPipC_i^{int}$, $EqPipC_{i,j}^{int}$ y $FrPipC_{k,j}$). El costo de instalación incluye el costo del terreno, como también el costo del transporte de materias primas, productos y servicios. El segundo se refiere a los costos de las corrientes frescas; el modelo selecciona de las corrientes frescas disponibles el flujo de cada corriente fresca óptimo para enviar a los equipos. En este sentido, los costos de las corrientes frescas dependen del flujo a utilizar. El tercer componente del costo está relacionado con los costos del tratamiento de las corrientes del proceso, las cuales pueden ser tratadas en las tecnologías que se encuentren disponibles; el costo del tratamiento se subdivide en dos componentes: costos fijos (independientes del flujo) y los costos variables (dependientes del flujo tratado). Los costos de tubería de los diferentes segmentos considerados dependen de los flujos. La función objetivo también considera los costos de tubería del segmento de las unidades de tratamiento. Además, los costos de tubería para enviar las corrientes de proceso a la corriente de desecho está incluida, y la tubería requerida para conectar tanto las corrientes de proceso como las corrientes frescas con los equipos de proceso, también están contempladas en la función objetivo.

$$\begin{aligned}
 Min TAC = & \sum_{p \in P} Cland_p y_p + H_Y \sum_{k \in K} FreC_k F_k + H_Y \sum_{i \in I} \sum_{int \in INT} VarC^{int} w_i^{int} + k_f \sum_{i \in I} \sum_{int \in INT} FixC^{int} z_i^{int} \\
 & + H_Y \left[\sum_{i \in I} \sum_{int \in INT} TrPipC_i^{int} w_i^{int} + WaPipC_i^{int} g_{i,waste}^{int} + \sum_{i \in I} \sum_{int \in INT} \sum_{j \in J} EqPipC_{i,j}^{int} g_{i,j}^{int} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} FrPipC_{k,j} f_{k,j} \right] \quad (4.23)
 \end{aligned}$$

Donde H_Y son las horas por año que operará la nueva planta industrial y k_f es un factor de anualización.

Notas Importantes

- ✚ Las reacciones químicas y bioquímicas de cada componente se representan por medio de un modelo cinético simple (incluso cuando ocurren varias reacciones).

- ✚ Los costos de instalación (C_{land_p}) incluye tres costos diferentes: el costo de transporte de materias primas, costo de transporte de productos, así como también el costo del terreno. Cada uno de los costos anteriores dependen directamente de la localización.
- ✚ También es importante mencionar que se realiza la integración másica dentro de la nueva planta.

4.2 Resultados y Discusión

En esta sección se presentan dos casos de estudio para mostrar la aplicación de la metodología propuesta.

Ejemplo 1. Lago Manzala

Los datos para este ejemplo corresponden al sistema de drenaje Bahr El-Baqar reportado previamente por Lovelady y col., (2009). Los contaminantes considerados son el fenol y el fósforo. La Figura 4.1 presenta la esquematización del sistema. En el sistema existen descargas municipales, agrícolas, industriales y de plantas de tratamiento que cambian significativamente las composiciones de fósforo y fenol en el río. La Figura 4.1 muestra también los 4 sitios donde es posible localizar la nueva planta industrial; cada una de estas tiene asociado diferentes costos de instalación que se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Costos de instalación para los distintos sitios disponibles para ubicar la nueva planta industrial en el Ejemplo 1.

Sitio	Costo de Instalación Anualizado, \$/año
1	18×10^6
2	17×10^6
3	35×10^6
4	10×10^6

La Figura 4.1 presenta las características de los tramos de río 6, 11 y el último (15) antes de instalar la nueva planta industrial; el tramo 6 tiene 1.312 ppm de fósforo y 0.0076 ppm de fenol, el tramo 11 contiene 2.841 ppm y 0.0058 ppm de fósforo y fenol, respectivamente; mientras que la disposición final recibe 1.17 ppm de fósforo y 0.005 ppm de fenol. Sin embargo, al mismo tiempo cada uno de los tramos antes mencionados tiene su conjunto de restricciones para mantener en buenas condiciones la calidad del agua.

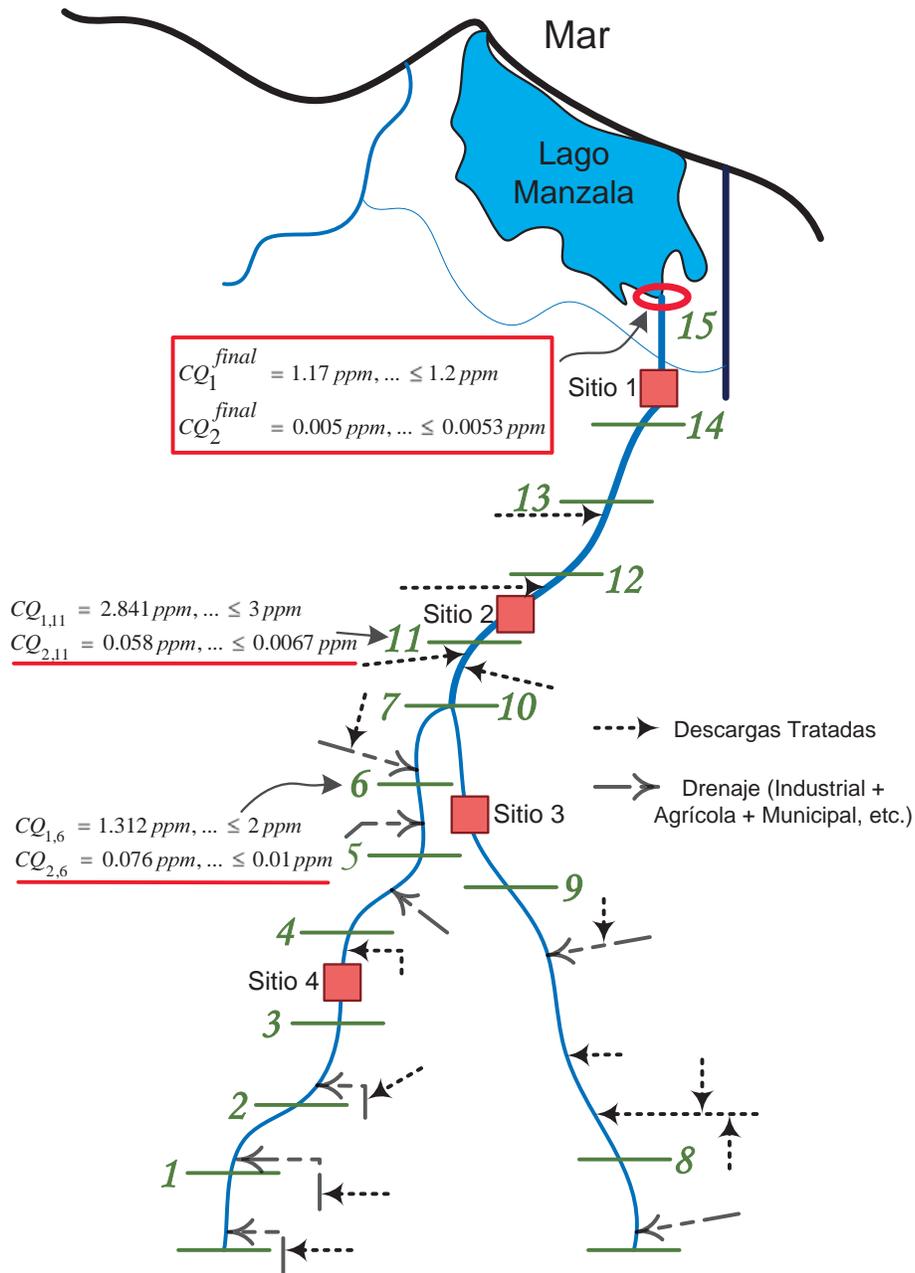


Figura 4.1 Sitios disponibles para la localización de la nueva planta industrial con restricciones para el Ejemplo 1.

De la zona que corresponde al tramo 6 se extrae agua por agricultores, mientras que del tramo 11 se extrae agua para alimentar a una ciudad; entonces, en el tramo 6 la concentración no debe superar 2 ppm y 0.01 ppm para fósforo y fenol, respectivamente. Finalmente, el fósforo

descargado por la nueva planta no debe exceder una concentración final en el lago de 1.2 ppm y la concentración de fenol no debe ser mayor a 0.0053 ppm (véase la Figura 4.1). Además, se cuenta con un conjunto de restricciones conocidas como regulaciones ambientales para la corriente de desecho de la nueva planta industrial, las cuales tienen valores de 50 ppm y de 0.1 ppm para fósforo y fenol, respectivamente. Para propósitos prácticos, en este ejemplo el fósforo se llamará componente 1 y el fenol será el componente 2.

Sin duda, la instalación de la nueva planta alterará e impactará al ambiente con la nueva descarga que se generará, incrementando la composición de contaminantes en el río y sus alrededores, además de contaminar el lago (disposición final). La Tabla 4.2 muestra las suposiciones usadas para este ejemplo.

Tabla 4.2 Suposiciones utilizadas para el Ejemplo 1.

Tipo de Descarga / Componente	Fósforo, ppm	Fenol, ppm
Descargas sin Tratamiento, $CS_{c,r,t}^{notratada}$	12.5	0.5
Descargas Tratadas, $CS_{c,r,t}^{tratada}$	9.5	0.005
Descargas Industriales, $CI_{c,r,t}$	10	0.1
Precipitación, $CP_{c,r,t}$, $CP_{c,r}$	0	0
Drenaje Agrícola, $CD_{c,r,t}$	1.5	0.0025
Pérdidas, $CL_{c,r,t}$, $CL_{c,r}$	0	0
Descargas Agrícolas, $CD_{c,r}$	1.5	0.0045

La degradación del fósforo y del fenol se representa por reacciones de primer orden con constantes cinéticas de $k_1 = 9.041909 \times 10^{-6} / s$ para el fósforo y $k_2 = 5.20847 \times 10^{-7} / s$ para fenol (Lovelady y col. 2009). El tiempo de operación de la nueva planta industrial es 8000 hr/año y el factor de anualización $k_f = 0.1$. Por otro lado, las características de las corrientes frescas se muestran en la Tabla 4.3. Los costos de las corrientes frescas 1 y 2 son $\$0.194/m^3$ y $\$0.142/m^3$, respectivamente. La Tabla 4.4 muestra los requerimientos de los equipos de proceso.

Normalmente, un interceptor puede separar efectivamente ciertos componentes; sin embargo, es evidente que mientras un componente puede ser separado con una buena eficiencia,

éste puede no ser el caso para otro componente tratado en el mismo interceptor. Por esta razón, y debido a que los componentes clave seleccionados son muy distintos, cada interceptor trabaja con diferentes eficiencias para cada contaminante (ver la Tabla 4.5).

Tabla 4.3. Corrientes de proceso y frescas para el Ejemplo 1.

<i>Corriente</i>	<i>Flujo, m³/s</i>	<i>Composición 1, ppm</i>	<i>Composición 2, ppm</i>
<i>Proceso</i>			
1	0.316	88.7	0.14
2	0.435	77.2	0.22
3	0.402	52.4	0.16
<i>Frescas</i>			
1	-	0	0
2	-	10	0.005

Tabla 4.4 Requerimientos de los equipos de proceso del Ejemplo 1.

<i>Equipo de Proceso</i>	<i>Flujo, m³/s</i>	<i>y_{j,1}^{InSink,max}, ppm</i>	<i>y_{j,2}^{InSink,max}, ppm</i>
1	0.365	55.5	0.013
2	0.290	36.2	0.011
3	0.335	30	0.010

Obsérvese que el interceptor de mayor costo es el Rec3, lo cual se debe a que puede lograr una mejor separación del fenol. Por otro lado, los costos de tubería que han sido divididos en cuatro categorías se presentan a continuación: el costo para segregar las corrientes de proceso al tratamiento es \$0.01/m³, los costos de tubería para enviar las corrientes de proceso a la corriente de desecho es \$0.006/m³, mientras que el costo de enviar las corrientes de proceso y las frescas a los equipos es \$0.013/m³.

Tabla 4.5 Características de los interceptores disponibles para el Ejemplo 1.

Interceptor	Factor de Eficiencia 1, γ_1	Factor de Eficiencia 2, γ_2	Costo Fijo, \$	Costo Variable, \$/m³
Rec1	0.95	0.54	123,000	0.09
Rec2	0.68	0.65	112,000	0.063
Rec3	0.51	0.90	168,000	0.107

El modelo y datos de este caso de estudio se implementaron en la plataforma de programación GAMS (Brooke y col., 2006) con el resolvidor DICOPT (Viswanathan y Grossmann, 1990). La solución óptima que satisface todas las restricciones del ejemplo es instalar la nueva planta en el sitio 4 con un costo total anual de \$15.583x10⁶/año, de los cuales \$10x10⁶/año corresponden al costo de instalación, \$3.06x10⁶/año es el costo del tratamiento

(\$2.98x10⁶/año representa el costo variable y \$81,700/año al costo fijo), \$1.72x10⁶/año es el costo de las corrientes frescas. Por último, el costo de las tuberías es \$803,000/año. Como se observa en la Figura 4.2, todas las restricciones se satisfacen.

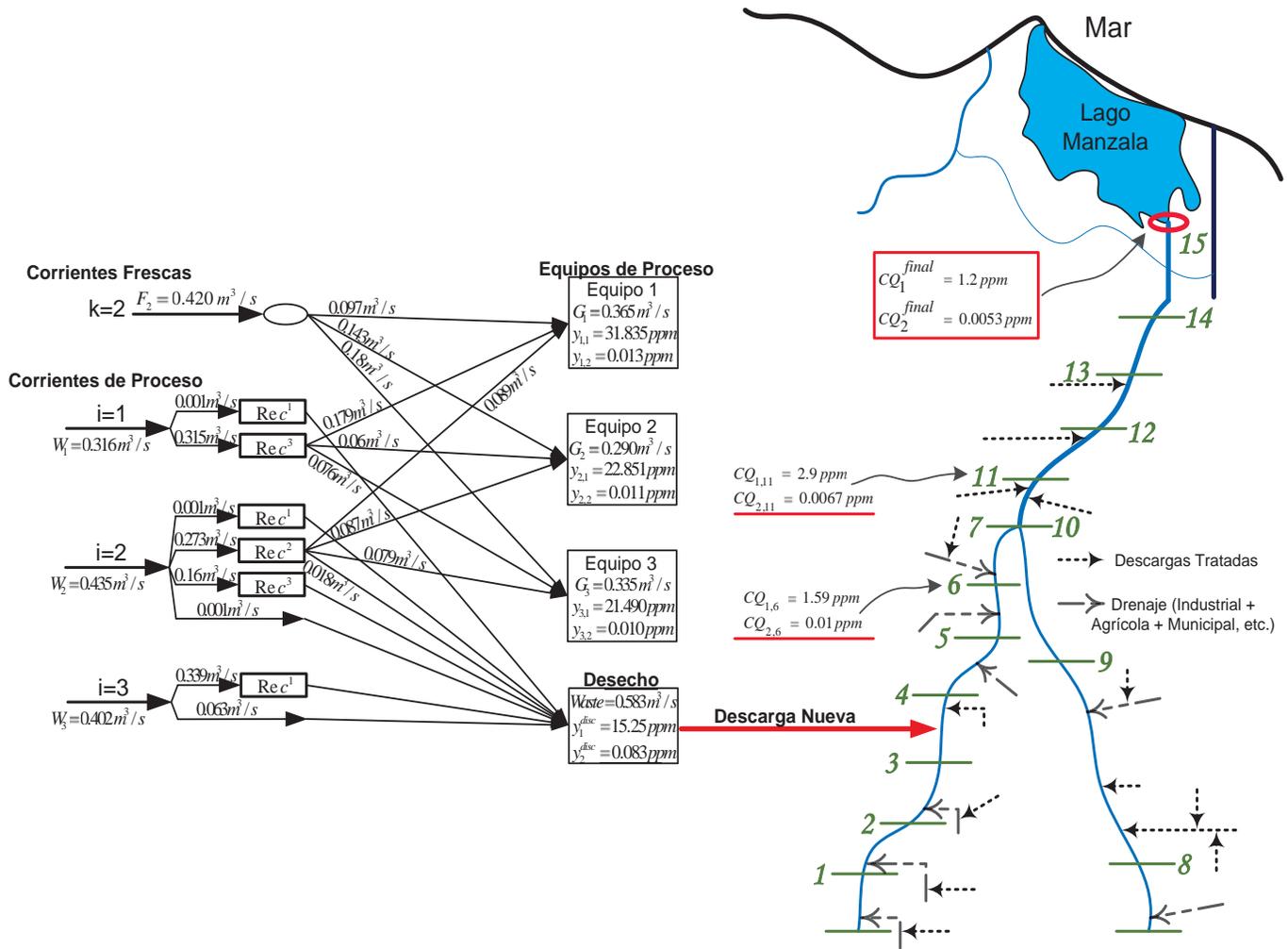


Figura 4.2 Solución óptima del Ejemplo 1

La Figura 4.2 incluye la integración másica dentro de la planta. Nótese que fue necesario que la corriente de desecho tenga concentraciones de contaminantes muy inferiores a las máximas permitidas por las regulaciones ambientales; por lo que se puede deducir que las regulaciones ambientales por si solas no aseguran la sustentabilidad del sistema para este caso de estudio. Por otro lado, el costo total anual de la solución que no consideraría las restricciones ambientales a la disposición final es de \$14.93x10⁶/año; sin embargo, las concentraciones que serian descargadas a la disposición final son 1.254 ppm de fósforo y 0.0057 ppm de fenol. Por lo

que pondría en riesgo al sistema, ya que generaría un exceso de 4.5% de fósforo y 7.55% de fenol que no podrían ser degradados naturalmente.

Ejemplo 2. Cuenca del Balsas

Este caso de estudio está basado en datos aproximados del sistema Balsas, el cual es uno de los ríos más grandes del país, cubriendo varios estados y ciudades, lo que a su vez también implica que varias ciudades, industrias y zonas agrícolas descarguen sus efluentes. Los datos de la cuenca se tomaron de CONAGUA (2009a, 2009b). Debido a que la metodología propuesta puede funcionar para cualquier contaminante, para este caso de estudio tres componentes claves fueron considerados para el análisis, éstos son llamados c_1 , c_2 y c_3 . Donde c_1 es el componente menos tóxico, mientras que c_3 es el de mayor toxicidad. La Figura 4.3 muestra al sistema bajo estudio, incluyendo las 20 alternativas para ubicar a la nueva planta industrial, además de mostrar las concentraciones de los contaminantes antes de instalar la nueva planta industrial para los tramos de río donde se desea mantener cierta calidad del agua, así como las restricciones impuestas a dichos tramos de río.

Por ejemplo, para el tramo 2 las concentraciones de los contaminantes sin que se instale la nueva planta son: para c_1 es 1.827 ppm y la restricción es que no supere los 2 ppm, para c_2 la concentración sin instalar la industria es de 0.864 ppm y se desea una concentración máxima de 1.1 ppm después de instalarla la planta.

También existen extracciones de corrientes de agua de los tramos 2 y 6, para alimentar ciudades diferentes, mientras que de los tramos 4 y 8 se extrae el agua para zonas de riego. En la Figura 4.3, se puede observar que aunque los tramos 2 y 6 alimentan a ciudades, las restricciones para el tramo 2 son más estrictas que las del tramo 6, esto debido a que la ciudad que es alimentada por el tramo 2 es de mayor tamaño que la del 6, por lo que el gobierno local de la ciudad que se alimenta del tramo 2 es más estricto para la calidad de agua que recibe. Las diferencias existentes en las restricciones de los tramos que alimentan a las zonas de riego (4 y 8) se deben al tipo de cultivo. La Tabla 4.6 muestra los costos de instalación anualizados para cada sitio disponible para ubicar la nueva planta industrial.

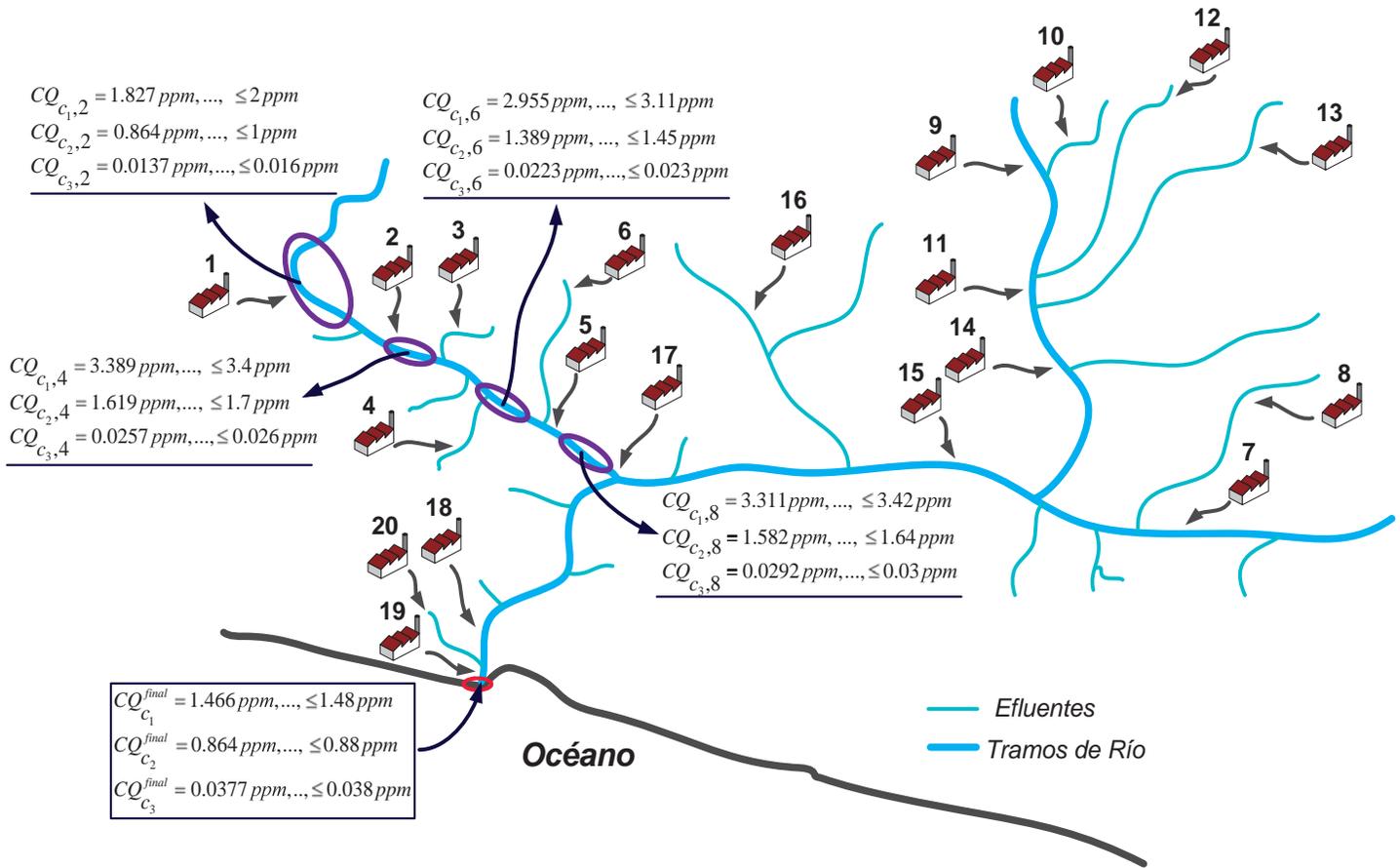


Figura 4.3 Localizaciones disponibles para la nueva planta industrial, incluyendo concentraciones y restricciones de contaminantes para el Ejemplo 2

La Tabla 4.7 presenta las suposiciones usadas para las concentraciones de descarga al sistema. Nótese cómo la concentración del contaminante c_1 es siempre mayor a los demás componentes. Por otro lado, la degradación de los componentes se lleva a cabo siguiendo una cinética de primer orden, con las siguientes constantes de reacción: $k_{c_1} = 3.23764 \times 10^{-6} / s$, $k_{c_2} = 1.492 \times 10^{-6} / s$, $k_{c_3} = 4.52095 \times 10^{-7} / s$. Los valores de las constantes cinéticas se aproximaron en base a los datos reportados en CONAGUA (2009a, 2009b). Además, para este caso $\alpha_{r,t} = 0.000148 m^3 / ha * s$ y $\beta_{r,t} = 0.000148 m^3 / ha * s$, el tiempo de operación de la planta es 8,000 hr/año y $k_f = 0.1 \text{ año}^{-1}$.

La Tabla 4.8 muestra las características de las corrientes frescas y de proceso. Los costos de las corrientes frescas 1, 2, 3 y 4 son \$0.094/m³, \$0.085/m³, \$0.072/m³, y \$0.065/m³, respectivamente. La Tabla 4.9 muestra los requerimientos de los equipos de proceso.

Tabla 4.6 Costos de instalación para el Ejemplo 2.

Sitio	Costo de Instalación Anualizado, \$/año
1	8x10 ⁶
2	8.5x10 ⁶
3	9x10 ⁶
4	10.5x10 ⁶
5	9.5x10 ⁶
6	9x10 ⁶
7	15.5x10 ⁶
8	14.5x10 ⁶
9	17.7x10 ⁶
10	22x10 ⁶
11	18x10 ⁶
12	17.5x10 ⁶
13	24x10 ⁶
14	28x10 ⁶
15	23.5x10 ⁶
16	17x10 ⁶
17	20x10 ⁶
18	19x10 ⁶
19	16x10 ⁶
20	17x10 ⁶

Tabla 4.7 Suposiciones del Ejemplo 2.

Tipo de Descarga / Componente	c ₁ , ppm	c ₂ , ppm	c ₃ , ppm
Descargas sin Tratamiento, $CS_{r,t}^{notratada}$	24.5	13	0.5
Descargas Tratadas, $CS_{r,t}^{tratada}$	10.5	5	0.03
Descargas Industriales, $CI_{r,t}$	25	10	0.06
Drenaje Agrícola, $CD_{r,t}$	12.8	5.6	0.055
Descargas Totales, CH_r	21.8	8.5	0.07
Descargas Directas, CD_r	18.5	9.5	0.075

Tabla 4.8 Corrientes de proceso y frescas para el Ejemplo 2.

<i>Corriente</i>	<i>Flujo, m³/s</i>	<i>Composición c₁, ppm</i>	<i>Composición c₂, ppm</i>	<i>Composición c₃, ppm</i>
<i>Proceso</i>				
1	0.363	64.6	22.4	0.11
2	0.241	38	21.6	0.24
3	0.046	55.3	10	0.22
4	0.447	30	32.5	0.3
5	0.196	49.8	16.5	0.31
6	0.204	12	28.7	0.15
7	0.281	74.2	36.6	0.14
8	0.329	57.8	42	0.3
9	0.282	46	18.2	0.09
10	0.266	32.1	25.1	0.1
11	0.215	66.4	17.8	0.13
<i>Fresca</i>				
1	-	0	0	0
2	-	1	0.5	0.002
3	-	2	0.7	0.005
4	-	2.5	1	0.007

Tabla 4.9 Requerimientos de los equipos de proceso del Ejemplo 2.

<i>Equipo de Proceso</i>	<i>Flujo, m³/s</i>	$y_{j,c_1}^{InSink,max}$ <i>ppm</i>	$y_{j,c_2}^{InSink,max}$ <i>ppm</i>	$y_{j,c_3}^{InSink,max}$ <i>ppm</i>
1	0.348	11	5	0.013
2	0.428	9.4	6.3	0.61
3	0.406	13.3	3.5	0.1
4	0.312	8.2	4.5	0.023
5	0.336	6.5	2.1	0.009
6	0.294	14.2	3.2	0.017
7	0.196	9.6	1.3	0.012

Las regulaciones ambientales ($y_c^{disc,max}$) para la corriente de desecho de la nueva planta son: $y_{c_1}^{disc,max} = 50 ppm$, $y_{c_2}^{disc,max} = 35 ppm$ y $y_{c_3}^{disc,max} = 0.5 ppm$. La Tabla 4.10 presenta las eficiencias operacionales de cada interceptor disponible para remover a cada componente y los

costos unitarios de las unidades de tratamiento. Nótese que el interceptor de mayor costo (Rec3) es el que puede remover con la mejor eficiencia al componente más tóxico (c_3).

Finalmente, los costos unitarios de tubería son los siguientes: $TrPipC = \$0.0025 / m^3$, $WaPipC = \$0.001 / m^3$, $EqPipC = \$0.006 / m^3$ y $FrPipC = \$0.004 / m^3$. Todos estos costos están referenciados al flujo transportado por la tubería.

Tabla 4.10 Interceptores disponibles para el Ejemplo 2.

Interceptor	Factor de Eficiencia para c_1	Factor de Eficiencia para c_2	Factor de Eficiencia para c_3	Costo Fijo, \$	Costo Variable, $\$/m^3$
Rec1	0.95	0.72	0.58	307,000	0.007
Rec2	0.68	0.92	0.64	353,000	0.013
Rec3	0.59	0.74	0.9	458,000	0.027
Rec4	0.73	0.8	0.52	270,000	0.018
Rec5	0.61	0.57	0.7	320,000	0.01

La Figura 4.4 muestra la solución a este caso de estudio que se resolvió en GAMS usando el resolvidor DICOPT. La solución óptima muestra que la planta debe ser instalada en la alternativa 3, con un costo total anual de $\$12.69 \times 10^6 / \text{año}$. El cual se constituye por $\$9 \times 10^6 / \text{año}$ del costo de instalación, $\$1.65 \times 10^6 / \text{año}$ del costo de tratamiento, $\$1.44 \times 10^6 / \text{año}$ del costo de las corrientes frescas y $\$6 \times 10^5 / \text{año}$ del costo de tuberías. Además, en este caso de estudio las restricciones de sustentabilidad no se activaron debido a que el flujo promedio de la cuenca es demasiado grande comparado con el flujo que descarga la nueva planta industrial; sin embargo, las restricciones impuestas a los tramos de río 2, 4, 6 y 8 fueron activadas, debido a que el flujo de la parte izquierda del río (el sistema puede observarse en las Figuras 4.3 y 4.4), es muy pequeño respecto al lado derecho. Cabe mencionar que sólo si la planta fuera instalada en las posiciones que se encuentran cercanas a la disposición final (por ejemplo alternativas 18, 19 y 20), el flujo de desecho descargado por la nueva planta tendría un efecto significativo sobre las composiciones que se descargarían al reservorio final u océano, aunque el costo total anual de éstas, no son competitivos debido al alto costo de instalación.

Finalmente, este ejemplo muestra que las regulaciones ambientales para la descarga de desecho de las industrias no son suficientes para asegurar la sustentabilidad de los sistemas, para

ello es necesario considerar o tener una visión global de los sistemas, considerando lo que sucede más allá de las plantas industriales, como es el caso del presente trabajo.

La Tabla 4.11 contiene el tamaño y el tiempo de cómputo de los problemas considerados, haciendo uso de un procesador i5 a 2.3 GHz con 4 MB de RAM.

Tabla 4.11 Tamaño y tiempo de cómputo para los problemas considerados.

Concepto	Ejemplo 1	Ejemplo 2
Número de Restricciones	195	4,062
Número de Variables Continuas	212	4,486
Número de Variables Binarias	16	86
Tiempo de Cómputo (s)	0.37	1.68

Este trabajo ha sido enviado al *Computers and Chemical Engineering (CACE)*, revista internacional de gran prestigio y reconocimiento. El artículo se encuentra en revisión con observaciones menores y que próximamente será publicado (el resumen enviado se muestra en el Apéndice B).

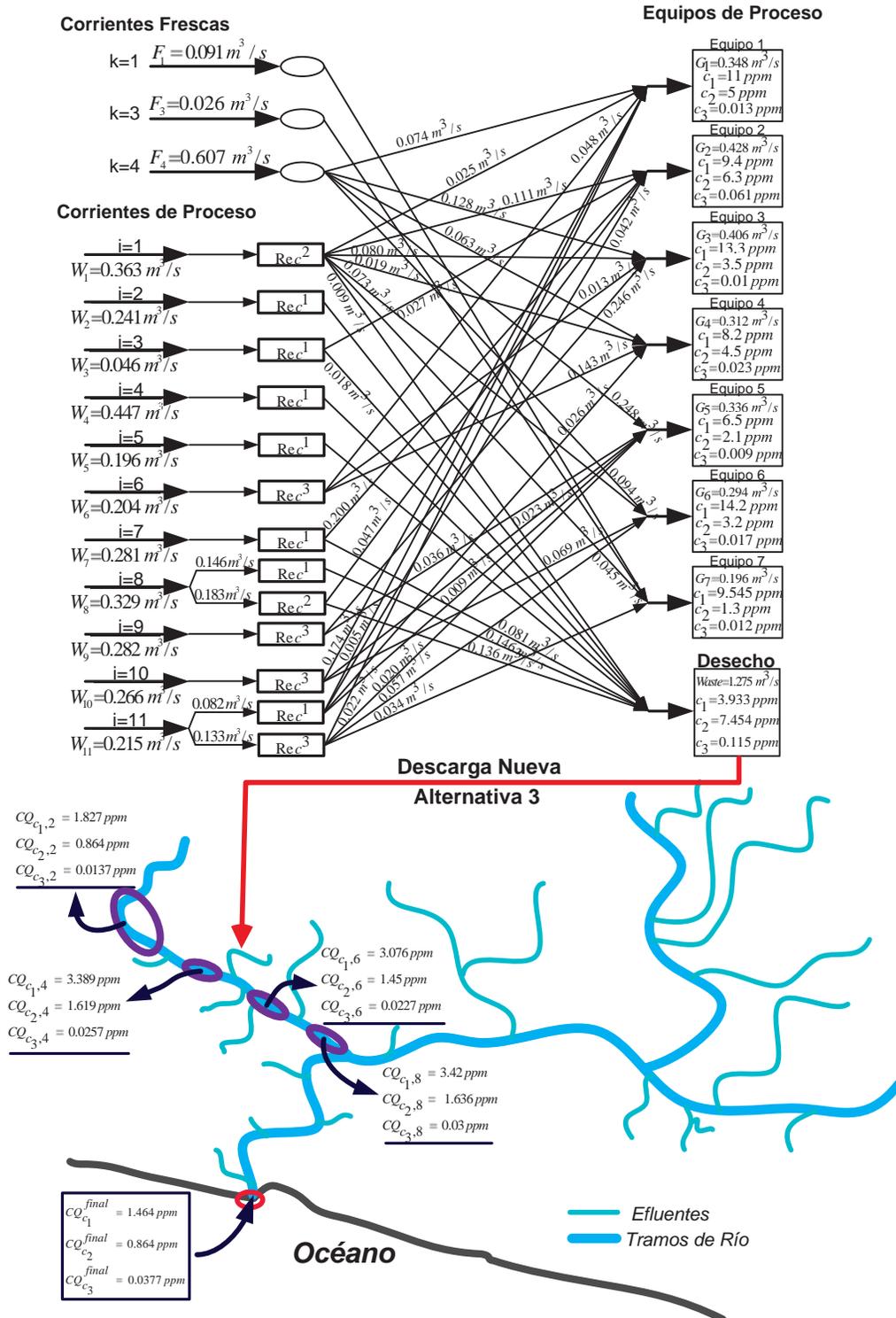


Figura 4.4 Solución óptima para el Ejemplo 2.

Conclusiones

En este trabajo se presentan dos nuevos modelos para la localización óptima de una nueva planta industrial satisfaciendo todas las restricciones ambientales involucradas, tanto para las corrientes de desecho a los ríos, así como también para las que se imponen sobre el río con el fin de asegurar la sustentabilidad de la cuenca. En los modelos propuestos, se realiza la integración másica para la corriente de descarga simultáneamente con la integración másica de la cuenca. En el segundo modelo propuesto (Capítulo 4) se incluye la integración másica dentro de la planta además de que permite tomar en cuenta las concentraciones de múltiples contaminantes. Los modelos se formularon prediciendo el comportamiento del río al ser impactado por la nueva descarga contaminada, a través de la técnica del análisis del flujo de los materiales. Los resultados de la aplicación de los modelos propuestos muestran que es posible considerar desde la etapa de síntesis de nuevos procesos los aspectos ambientales simultáneamente con los aspectos económicos.

Por otra parte, la corriente de desecho se integra permitiendo que el proceso de optimización elija la selección óptima del tratamiento, así como los flujos segregados a cada uno de ellos. Este trabajo es una herramienta muy útil para el gobierno y la sociedad al determinar los incentivos que se requieren para que las localizaciones sean atractivas económicamente para que se instale en ellas la nueva planta, obteniendo los beneficios sociales en sus regiones.

La solución de los casos de estudio propuestos muestra cómo se relaciona el sitio elegido para instalar la nueva planta industrial con los requerimientos del tratamiento para obtener procesos sostenibles.

Además de que en los casos de estudio del Capítulo 4 se constata que en muchos sistemas de cuenca, ya no es suficiente que la corrientes de desechos industriales cumplan o satisfagan las regulaciones ambientales para evitar la acumulación de contaminantes, asegurando de esta manera la sostenibilidad de la misma. Para lograr este objetivo es necesario considerar e integrar todas las corrientes que afectan al sistema, cómo se hace en la formulación propuesta en este trabajo.

Bibliografía

- **Agrawal, V., y Shenoy, U. V., 2006.** “Unified conceptual approach to targeting and design of water and hydrogen networks”. *AICHE Journal*, 52-3, 1071-1082.
- **Alva-Argaez, A., Kokossis, A. C., y Smith, R., 1998.** “Wastewater minimization of industrial systems using an integrated approach”. *Computers and Chemical Engineering*, 22 (Suppl), S741-S744.
- **Alva-Argaez, A., Vallianatos, A., y Kokossis, A., 1999.** “A multi-contaminant transshipment model for mass exchange networks and wastewater minimization problems”. *Computers and Chemical Engineering*, 23-10, 1439-1453.
- **Baccini P. y Brunner P., 1991.** “Metabolism of the anthroposphere”. Springer-Verlag, Berlin.
- **Benko, N., Rev, E., y Fonyo, Z., 2000.** “The use of nonlinear programming to optimal water allocation. *Chemical Engineering Communications*. 178, 67-101.
- **Brooke, A., Kendrick, D., Meeruas, A., y Raman, R., 2006.** *GAMS-Language guide*. Washington, D.C.: GAMS Development Corporation.
- **Brunner, P.H. y Rechberg H., 2004.** “Practical Handbook of material flow analysis”. CRC.
- **CONAGUA, 2009a.** Comisión Nacional del Agua. “Estadísticas del Agua 2008”. <http://www.conagua.gob.mx/OCB07/Temas/EstadisticasBALSAS-FINALago09.pdf>
- **CONAGUA, 2009b.** Comisión Nacional del Agua. “Atlas del Agua en México 2009”.
- **Dhole, V. R., Ramchandani, N., Tainsh, R. A., y Wasilewski, M., 1996.** “Make your process water pay for itself”. *Chemical Engineering*, 103-1, 100-103.
- **Doyle, S. J., y Smith, R., 1997.** “Targeting water reuse with multiple contaminants”. *Process Safety and Environmental Protection*, 75-B3, 181-189.
- **Dunn, R. F., y El-Halwagi, M. M., 2003.** “Process integration technology review: background and application in chemical process industry”. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 78-9, 1011-1021.
- **El-Baz, A. A., Ewida K. T., Shouman, M. A., El-Halwagi M .M., 2005a.** “Material flow analysis and integration of watersheds and drainage systems: I. Simulation and

- application to ammonium management in Bahr El-Baqar drainage system". *Clean Technology and Environmental Policy* 7-1: 51–61.
- **El-Baz, A. A., Ewida K. T., Shouman, M. A., El-Halwagi M. M., 2005b.** "Material flow analysis and integration of watersheds and drain systems: II. Integration and solution strategies with application to ammonium management in Bahr El-Baqar drain system". *Clean Technology and Environmental Policy* 7-1: 78–86
 - **El-Halwagi, M. M., 1997.** "Pollution prevention through process integration: Systematic design tools". Academic Press: San Diego.
 - **El-Halwagi, M. M., 2006.** "Process integration". Academic Press: New York.
 - **El-Halwagi, M. M., y Spriggs, H. D., 1998.** "Solve design puzzles with mass integration". *Chemical Engineering Progress*, 94-8, 25-44.
 - **El-Halwagi, M. M., Gabriel, F., y Harell, D., 2003.** "Rigorous graphical targeting for resource conservation via material recycle/reuse networks". *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 42-19, 4319-4328.
 - **Feng, X., Bai, J., y Zheng, X. S., 2007.** "On the use of graphical method to determine the targets of single-contaminant regeneration recycling water systems". *Chemical Engineering Science*, 62-8, 2127-2138.
 - **Foo, C. Y., 2009.** "State-of-the-art review of pinch analysis techniques for water network synthesis". *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48, 5125-5159.
 - **Gabriel, F. B., y El-Halwagi, M. M., 2005.** "Simultaneous synthesis of waste interception and material reuse networks: Problem reformulation for global optimization". *Environmental Progress*, 24-2, 171-180.
 - **Galan, B., y Grossmann, I. E., 1998.** "Optimal design of distributed wastewater treatment networks". *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 37-10, 4036-4048.
 - **Gomes, J. F. S., Queiroz, E. M., y Pessoa, F. L. P., 2007.** "Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant". *Journal of Cleaner Production*, 15-5, 474-485.
 - **Gunaratnam, M., Alva-Argaez, A., Kokossis, A., Kim, J. K., y Smith, R., 2005.** "Automated design of total water systems". *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44-3, 588-599.

- **Grossmann, I. E., y Lee, S., 2003.** “Generalized convex disjunctive programming: Nonlinear convex hull”. *Computational Optimization and Applications*, 26-1, 83-100.
- **Hallale, N., 2002.** “A new graphical targeting method for water minimization”. *Advances in Environmental Research*, 6-3, 377-390.
- **Hernandez-Suárez, R., Castellanos-Fernandez, J., y Zamora, J. M., 2004.** “Superstructure decomposition and parametric optimization approach for the synthesis of distributed wastewater treatment networks”. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 43-9, 2175-2191.
- **Karuppiah, R., y Grossmann, I. E., 2006.** “Global optimization for the synthesis of integrated water systems in chemical processes”. *Computers and Chemical Engineering*, 30-4, 650-673.
- **Kuo, W. C. J., y Smith, R., 1997.** “Effluent treatment system design”. *Chemical Engineering Science*, 52-23, 4273-4290.
- **Lampert C., Brunner P. H., 1999.** “Material accounting as a policy tool for nutrient management in the Danube Basin”. *Water Science and Technology*, 40-10, 43-49.
- **Lovelady, E. M., El-Baz, A. A., El-Monayeri, D., EL-Halwagi, M. M., 2009.** “Reverse problem formulation for integrated process discharges with wastewater and drainage systems: Managing phosphorus in lake Manzala”. *Journal of Industrial Ecology*, 13-6, 914-927.
- **Manan, Z. A., Tan, Y. L., y Foo D. C. Y., 2004.** “Targeting the minimum water rate using water cascade analysis technique”. *AIChE Journal*, 50-12, 3169-3183.
- **Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J. M., El-Halwagi, M. M., Jiménez-Gutiérrez, A., 2010.** “Global Optimization of Mass and Property Integration Networks with In-Plant Property Interceptors”. *Chemical Engineering Science*. 65-15, 4363-4377
- **Pillai, H. K., Bandyopadhyay, S., 2007.** “A rigorous targeting algorithm for resource allocation networks”. *Chemical Engineering Science*, 62, 6212-6221.
- **Polley, G. T., y Polley, H. L., 2000.** “Design better water networks”. *Chemical Engineering Progress*, 96-2, 47-52.
- **Ponce-Ortega, J. M., El-Halwagi, M. M., Jiménez-Gutiérrez, A., 2010.** “Global optimization of property-based recycle and reuse networks including environmental

constraints”. *Computers and Chemical Engineering*. 34-3: 318-330.

- **Ponce-Ortega, J. M., Hourtua, A. C., El-Halwagi, M. M., Jiménez-Gutiérrez, A., 2009a.** “A property-based optimization of direct recycle networks and wastewater treatment processes”. *AIChE Journal*. 55-9, 2329-2344.
- **Ponce-Ortega J. M., Serna-González M., y Jiménez-Gutiérrez A., 2009b.** “A disjunctive programming model for simultaneous synthesis and detailed design of cooling networks”. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 48-6: 2991-3003.
- **Putra, Z. A., y Amminudin, K. A., 2008.** “Two-step optimization approach for design a total water system”. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 47-16, 6045-6057.
- **Raman, R., y Grossmann I.E., 1994.** “Modeling and Computational Techniques for Logic Based Integer Programming”. *Computers and Chemical Engineering*. 18-7, 563-578
- **Savelski, M. J., y Bagajewicz, M. J., 2000.** “On the optimality conditions of water utilization systems in process plants with single contaminants”. *Chemical Engineering Science*, 55-21, 5035-5048.
- **Savelski, M. J., y Bagajewicz, M. J., 2001.** “Algorithmic procedure to design water utilization systems featuring a single contaminant in process plants”. *Chemical Engineering Science*, 56-5, 1897-1911.
- **Savelski, M., y Bagajewicz, M., 2003.** “On the necessary conditions of optimality of water utilization systems in process plants with multiple contaminants”. *Chemical Engineering Science*, 58-(23-24), 5349-5362.
- **Sorin, M., y Bedard, S., 1999.** “The global pinch point in water reuse networks”. *Process Safety and Environmental Protection*, 77-B5, 305-308.
- **Teles, J., Castro, P. M., y Novals, A. Q., 2008.** “LP-based solution strategies for the optimal design of industrial water networks with multiple contaminants”. *Chemical Engineering Science*, 63-2, 376-394.
- **UNESCO, 2009.** “World water resources at the beginning of the 21th century”. <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/shiklomanov/summary/html/summary.html#2>.
Water storage.

- **Vecchiotti, A., Lee, S., y Grossmann, I. E., 2003.** “Modeling of discrete/continuous problems: characterization and formulation of disjunctions and their relaxations”. *Computers and Chemical Engineering*. 27-3, 443-448.
- **Viswanathan, J., y Grossmann I.E., 1990.** “A Combined Penalty Function and Outer Approximation Method for MINLP Optimization”. *Computers and Chemical Engineering* 14, 769. 14-7, 769-782
- **Wang, Y. P., y Smith, R., 1994.** “Wastewater minimization”. *Chemical Engineering Science*, 49-7, 981-1006.

Apéndice A

Portada del artículo ya publicado.

Ind. Eng. Chem. Res. 2011, 50, 953–964

953

An MINLP Model for the Optimal Location of a New Industrial Plant with Simultaneous Consideration of Economic and Environmental Criteria

Luis Fernando Lira-Barragán,[†] José María Ponce-Ortega,^{*,†} Medardo Serna-González,[†] and Mahmoud M. El-Halwagi[‡]

Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58060, Chemical Engineering Department, Texas A&M University, College Station, Texas 77843, United States

This paper presents a new mixed-integer nonlinear programming model for the optimal allocation of a new industrial plant which impacts the water quality throughout a surrounding watershed. In addition to the economic aspects, the optimization approach also accounts for the environmental impact, such that the wastewater streams discharged to the environment have characteristics that ensure the sustainability of the surrounding watershed. The model was formulated to predict the behavior for the watershed impacted for the new polluted discharges through the material flow analysis technique. Therefore, all discharges and extractions are considered as well as the chemical reactions that take place in the watershed. The watershed model is combined with a disjunctive model for the optimal location of a new industrial plant and the selection of the type of treatment. The objective function is aimed at minimizing the total annual cost, which includes the wastewater treatment costs and the location-based cost of the new plant (including the transportation of raw materials, products, and services, as well as the land cost). The constraints on water quality are imposed at various locations throughout the watershed. A sensitivity analysis is carried out to generate the noninferior curve that shows the trade-off between cost and environmental impact. Furthermore, the model can be used to identify incentives needed for nonoptimal locations to become attractive enough to install the new plant. Two example problems were used to show the applicability of the proposed methodology and the effectiveness of solving the optimization formulation.

1. Introduction

Nowadays, for the location of a new industrial plant, usually only economic aspects are considered, without taking into account the environmental damage that industrial effluents produce over the final wastewater disposal.¹ Once the new plants are installed, the problems associated with the pollution that the new plants produce are identified, and then it is required to install new equipment to treat the industrial wastes to repair the damage and to satisfy the environmental regulations, which represents an additional cost that may yield uneconomical processes.

Several methodologies have been reported to address the problem of recycle/reuse for resource conservation inside industrial facilities (see, for example, Dunn and El-Halwagi,² El-Halwagi,^{3,4} and El-Halwagi and Spriggs⁵). These methodologies allow for yielding an efficient use of resources and reducing the waste streams discharged to the environment. These resource conservation methodologies can be classified as pinch techniques and techniques formulated as mathematical programming models.⁶ The pinch technologies use heuristic rules based on targeting followed by design conducting to sequential approaches. Foo⁷ presented a review for the pinch techniques for water network synthesis (see, for example, Wang and Smith,⁸ Dhole et al.,⁹ El-Halwagi and Spriggs,⁵ Polley and Polley,¹⁰ Hallale,¹¹ Manan et al.,¹² El-Halwagi et al.,¹³ and Feng et al.¹⁴). Other sets of methodologies based on algebraic techniques for resource conservation have been reported by Sorin and Bedard,¹⁵ Agrawal and Shenoy,¹⁶ and Gomes et al.¹⁷ Finally, mathematical

programming formulations have been reported to automate the synthesis of recycle and reuse networks inside the plant (see, for example, Savelski and Bagajewicz,^{18–20} Alva-Argaez et al.,^{21,22} Benko et al.,²³ Teles et al.,²⁴ Gabriel and El-Halwagi,²⁵ Kuo and Smith,²⁶ Doyle and Smith,²⁷ Galan and Grossmann,²⁸ Hernandez-Suarez et al.,²⁹ Gunaratnam et al.,³⁰ Karupiah and Grossmann,³¹ Putra and Amminudin,³² Ponce-Ortega et al.,^{33,34} and Nápoles-Rivera et al.³⁵). However, all previous formulations consider exclusively the processes that happen inside the industrial facilities, ignoring the processes that occur outside the plant. It is worth notice that the wastewaters discharged by the industrial plants are transported by the drainage systems to their final disposal, and these final disposals commonly are lakes or seas that are drastically impacted by the polluted discharges from the industrial plants.

On the other hand, watershed systems are the means by which the effluents are transported to their final disposal. In the watersheds, mixing and splitting processes naturally exist, which naturally change the properties of the streams, in addition to the natural degradation of the components due to chemical, biochemical, and physical transformations (Brunner and Reehberg³⁶). Watersheds involve a number of tributaries that feed into reaches, streams, or rivers that finally lead to catchment areas like lakes, seas, or oceans; in addition, watersheds impact and are impacted drastically by their surroundings. Baccini and Brunner³⁷ developed a material flow analysis (MFA) model for analyzing ecosystems with human activities where mass, energy, and information are being exchanged with the surroundings. Lampert and Brunner³⁸ proposed an MFA model to track nutrient discharges into the Danube river basin. El-Baz et al.¹ presented an MFA model to track the nitrogenous compounds in the Bahr El-Baqar drainage system, whereas El-Baz et al.³⁹ presented an MFA model to include a mass integration for the

* To whom correspondence should be addressed. E-mail: jmponce@umich.mx.

[†] Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

[‡] Texas A&M University.

Apéndice B

Resumen del artículo enviado al *Computers and Chemical Engineering (CACE)*

Abstract

This paper presents a new mathematical programming model for the optimal synthesis of recycle and reuse networks considering simultaneously the integration of the water network system and the surrounding watershed to satisfy process and environmental constraints. The model considers the optimal location of the new industrial facility to integrate its wastewater discharge to the environment with the surrounding watershed through a disjunctive formulation. The pollutants discharged for the new plant are tracked simultaneously with the other discharges to the watershed (i.e., residential, sanitary, industrial and extractions), and the natural phenomena that affect the composition of the watershed (i.e., evaporation, filtration, etc), in addition to the chemical reactions that are carried out in the rivers. The objective function consists in minimizing the total annual cost that is constituted by the installation of the new plant cost (including the transportation for raw materials, products and services, as well as the land cost), the wastewater treatment costs (including the piping cost) and the fresh sources cost. Two example problems were used to show the applicability of the proposed methodology.

Apéndice C

A continuación se muestra el programa implementado en *GAMS* para el Ejemplo 1 del Capítulo 3.

```
$TITLE MFA de la Tesis de Eva Lovelady
```

```
$ontext
```

```
Número de Tributaries en Cada Reach
```

```
Reach Tributaries
```

```
1 5
2 3
3 4
4 6
5 5
6 4
7 3
8 3
9 2
10 2
11 3
12 3
13 2
14 2
15 2
```

```
CPNEW(1)=REACH(15)
```

```
CPNEW(2)=REACH(12)
```

```
CPNEW(3)=REACH(10)
```

```
CPNEW(4)=REACH(4)
```

```
$offtext
```

```
OPTION OPTCR=0.0010;
```

```
OPTION OPTCA=.010;
```

```
OPTION ITERLIM=10000000;
```

```
OPTION RESLIM= 10000000;
```

```
OPTION DECIMALS=5;
```

```
SETS
```

```
R  NUMBER OF REACHES /1*15/
T  MAXIMIUM NUMBER OF TRIBUTARIES IN ANY REACH /1*6/
P  NUMBER OF POSSIBLES PLANT LOCATIONS /1*4/
J  NUMBER OF INTERCEPTORS + 1 /1*4/;
```

```
SCALAR QPNEWUP MAXIMIUM VALUE TO QPNEW /15/;
```

```
SCALAR CPNEWUP MAXIMIUM VALUE TO CPNEW /50/;
```

```
SCALAR DELTAINT INCREMENT FOR CONVEX HULL OF INTERCEPTORS /0.01/;
```

```
BINARY VARIABLES Y(P),Z(J);
```

```
VARIABLE
```

```
COST TOTAL COST;
```

```
POSITIVE VARIABLES
```

```
*PARA R>=4
```

```
RQ(R) REACTION RATE,
```

```
CUR(R) CONCENTRATION OF USAGE DISCHARGE FROM THE Ith REACH;
```

```
POSITIVE VARIABLE
```

```
Q(R) FLOWRATE LEAVING THE Ith REACH;
```

```
Q.FX(8)=5.05;
```

```
POSITIVE VARIABLE
```

```
CQ(R) CONCENTRATION IN THE FLOWRATE LEAVING THE Ith REACH;
```

```
CQ.FX(8)=1.2;
```

```
POSITIVE VARIABLES QPNEW(P),CPNEW(P) DISCHARGE COMPOSITION OF THE NEW PLANT;
```

POSITIVE VARIABLES

YDISC COMPOSITION OF DISCHARGE,
FINT(J) FLOW TO EACH INTERCEPTOR;

PARAMETER HY HOURS OF OPERATION PER YEAR;
HY=8600;

PARAMETER YIN COMPOSITION IN THE OUT OF THE PLANT;
YIN=12.5;

PARAMETER GAMA(J) EFICIENCY FACTOR TO EACH INTERCEPTOR

/
1 0.95
2 0.84
3 0.76
4 0/;

PARAMETER YOUT(J) COMPOSITION IN THE OUT OF EACH INTERCEPTOR;
YOUT(J)=YIN*(1-GAMA(J));

PARAMETERS

CV(J) VARIABLE COST OF EACH INTERCEPTOR

/
1 0.235
2 0.193
3 0.168
4 0/

CF(J) FIXED COST OF EACH INTERCEPTOR

/
1 568000
2 446000
3 353000
4 0/

CLAND(P) LAND COST OF EACH POSSIBLE LOCATION

/
1 10000000
2 17000000
3 35000000
4 18000000/;

PARAMETER QPNEWDATA FLOWRATE OF THE NEW PLANT;
QPNEWDATA=2;

PARAMETER ALFA DRAINAGE RATE AND USAGE OF WATER;
ALFA=0.000066;

PARAMETER BETA1 DRAINAGE RATE AND USAGE OF WATER;
BETA1=0.000023;

PARAMETER BETA2 DRAINAGE RATE AND USAGE OF WATER;
BETA2=0.000011;

PARAMETER BETA3 DRAINAGE RATE AND USAGE OF WATER;
BETA3=0.000066;

PARAMETER K KINETIC CONSTANT;
K=0.9041909E-05;

PARAMETER Q0 INITIAL FLOW;
Q0=0.6;

PARAMETER CQ0 INITIAL CONCENTRATION;
CQ0=1;

PARAMETER CIN11 INTIAL CONCENTRATIONS;
CIN11=9.5;

PARAMETER CIN73 INTIAL CONCENTRATIONS;
CIN73=9.5;

PARAMETER CIN91 INTIAL CONCENTRATIONS;
CIN91=9.5;

PARAMETER TAO11 TIME IN THE Ith REACH;
TAO11=0.77;

PARAMETER TAO73 TIME IN THE Ith REACH;
TAO73=0.77;

PARAMETER TAO91 TIME IN THE Ith REACH;
TAO91=0.18;

TABLE SU(R,T) UNTREATED SEWAGE (SANITARY WASTE) DISCHARGED TO THE Jth TRIBUTARY

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8						
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0;

TABLE CSU(R,T) CONCENTRATION OF UNTREATED SEWAGE (SANITARY WASTE) DISCHARGED TO THE Jth TRIBUTARY

	1	2	3	4	5	6
1		12.5	12.5	12.5	12.5	0
2	12.5	12.5	12.5	0	0	0
3	12.5	12.5	12.5	12.5	0	0
4	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	0
6	12.5	12.5	12.5	12.5	0	0
7	12.5	12.5		0	0	0
8						
9		12.5	0	0	0	0
10	12.5	12.5	0	0	0	0
11	12.5	12.5	12.5	0	0	0
12	12.5	12.5	12.5	0	0	0
13		12.5	0	0	0	0
14			0	0	0	0
15			0	0	0	0;

TABLE ST(R,T) TREATED SEWAGE (SANITARY WASTE) DISCHARGE TO THE Jth TRIBUTARY

	1	2	3	4	5	6
1	1.09	0	0	0	0	0
2	3.47	0.11	0	0	0	0
3	0	0.87	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	1.44	0	0	0
8						
9	23.15	0.11	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0.231	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0;

TABLE CST(R,T) CONCENTRATION OF TREATED SEWAGE (SANITARY WASTE) DISCHARGED TO THE Jth TRIBUTARY

	1	2	3	4	5	6
1		9.5	9.5	9.5	9.5	0
2	9.5	9.5	9.5	0	0	0
3	9.5	9.5	9.5	9.5	0	0
4	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5
5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	0
6	9.5	9.5	9.5	9.5	0	0
7	9.5	9.5		0	0	0
8						
9		9.5	0	0	0	0
10	9.5	9.5	0	0	0	0
11	9.5	9.5	9.5	0	0	0

12	9.5	9.5	9.5	0	0	0
13		9.5	0	0	0	0
14			0	0	0	0
15			0	0	0	0;

TABLE I(R,T) INDUSTRIAL FLOW OF WASTEWATER DISCHARGED TO THE Jth TRIBUTARY

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8						
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0;

TABLE CI(R,T) INDUSTRIAL CONCENTRATION FLOW OF WASTEWATER DISCHARGED TO THE Jth TRIBUTARY

	1	2	3	4	5	6
1		10	10	10	10	0
2	0	10	10	0	0	0
3	10	10	10	10	0	0
4	10	10	10	10	10	10
5	10	10	10	10	10	0
6	10	10	10	10	0	0
7	10	10		0	0	0
8						
9		10	0	0	0	0
10	10	10	0	0	0	0
11	10	10	10	0	0	0
12	10	10	10	0	0	0
13		10	0	0	0	0
14			0	0	0	0
15			0	0	0	0;

PARAMETER PT(R,T) PRECIPITATION FLOW DISCHARGED TO THE Jth TRIBUTARY;
PT(R,T)=0;

PARAMETER CPT(R,T) CONCENTRATION OF PRECIPITATION FLOW DISCHARGED TO THE Jth TRIBUTARY;
CPT(R,T)=0;

TABLE AT(R,T) AREA OF THE Jth TRIBUTARY

	1	2	3	4	5	6
1	3650	10200	2300	950	9000	0
2	40000	1900	5700	0	0	0
3	700	31000	2300	2700	0	0
4	400	2600	18000	3500	1400	500
5	8000	2400	2100	750	900	0
6	4950	2700	13700	61800	0	0
7	8700	1000	5300	0	0	0
8						
9	7000	1900	0	0	0	0
10	9600	16000	0	0	0	0
11	1500	3000	31000	0	0	0
12	11500	2000	6000	0	0	0
13	17000	10100	0	0	0	0
14	17000	47000	0	0	0	0
15	47320	57500	0	0	0	0;

PARAMETER DT(R,T) AGRICULTURAL DRAINAGE DISCHARGED TO THE Jth TRIBUTARY;
DT(R,T)=ALFA*AT(R,T);

DISPLAY DT;

TABLE CDT(R,T) CONCENTRATION OF AGRICULTURAL DRAINAGE DISCHARGED TO THE Jth TRIBUTARY

	1	2	3	4	5	6
1		1.5	1.5	1.5	1.5	0
2	1.5		1.5	0	0	0
3	1.5	1.5		1.5	0	0
4	1.5	1.5	1.5		1.5	1.5
5	1.5	1.5	1.5	1.5		0
6	1.5	1.5	1.5	1.5	0	
7	1.5	1.5		0	0	0
8						
9		1.5	0	0	0	0
10	1.5	1.5	0	0	0	0
11	1.5	1.5	1.5	0	0	0
12	1.5	1.5	1.5	0	0	0
13		1.5	0	0	0	0
14		0	0	0	0	0
15		0	0	0	0	0

PARAMETER LT(R,T) NET LOSSES FROM THE Jth TRIBUTARY (E.G. SEEPAGE VAPORIZATION USE ETC.);
 LT(R,T)=0;

PARAMETER CLT(R,T) CONCENTRATION OF NET LOSSES FROM THE Jth TRIBUTARY (E.G. SEEPAGE VAPORIZATION USE ETC.);
 CLT(R,T)=0;

TABLE VT(R,T) VOLUME OF THE Jth TRIBUTARY

	1	2	3	4	5	6
1		22526	2141	280	28186	0
2	498678	3448	12644	0	0	0
3	1389	232234	2211	2316	0	0
4	996	2530	31982	3484	1766	755
5	20636	3211	3791	1021	788	0
6	4974	3256	41966	223748	0	0
7	11002	359	0	0	0	
8						
9		4320	0	0	0	0
10	13707	15557	0	0	0	0
11	1824	4674	60822	0	0	0
12	19492	2451	6372	0	0	0
13		14709	0	0	0	0
14		0	0	0	0	0
15		0	0	0	0	0

PARAMETER UT(R,T) USAGE DISCHARGE FROM THE Jth TRIBUTARY;
 UT(R,T)=BETA1*AT(R,T);
 *CORRECTIONS
 UT('7',T)=BETA2*AT('7',T);
 UT('9',T)=BETA2*AT('9',T);
 UT('10','1')=BETA2*AT('10','1');
 UT('10','2')=BETA3*AT('10','2');
 UT('11',T)=BETA2*AT('11',T);

DISPLAY UT;

PARAMETER CUT(R,T) CONCENTRATION OF USAGE DISCHARGE FROM THE Jth TRIBUTARY;

PARAMETERS

FT(R,T) TRIBUTARY DISCHARGE FROM THE Jth TRIBUTARY TO THE Ith REACH,
 CT(R,T) CONCENTRATION OF TRIBUTARY DISCHARGE FROM THE Jth TRIBUTARY TO THE Ith REACH;

*EXCEPS 8's

FT(R,T)\$((ORD(R) NE 8)=SU(R,T)+ST(R,T)+I(R,T)+PT(R,T)+DT(R,T)-LT(R,T)-UT(R,T);

*EXCEPS 1,1;7,3;8's;9,1;13,1;14,1;14,2;15,1;15,2

CT(R,T)\$(((ORD(R) NE 1) OR (ORD(T) NE 1)) AND ((ORD(R) NE 7) OR (ORD(T) NE 3))
 AND (ORD(R) NE 8) AND ((ORD(R) NE 9) OR (ORD(T) NE 1)) AND ((ORD(R) NE 13) OR (ORD(T) NE 1))
 AND ((ORD(R) NE 14) OR (ORD(T) NE 1)) AND ((ORD(R) NE 14) OR (ORD(T) NE 2)) AND ((ORD(R) NE 15) OR (ORD(T) NE 1)) AND
 ((ORD(R) NE 15) OR (ORD(T) NE 2)))=
 (SU(R,T)*CSU(R,T)+ST(R,T)*CST(R,T)+I(R,T)*CI(R,T)+PT(R,T)*CPT(R,T)+DT(R,T)*CDT(R,T)-
 LT(R,T)*CLT(R,T))/(FT(R,T)+UT(R,T)+K*VT(R,T)+1E-5);

$CT('1','1')=CIN11*(EXP(-K*TAO11));$
 $CT('7','3')=CIN73*(EXP(-K*TAO73));$
 $CT('9','1')=CIN91*(EXP(-K*TAO91));$

$CUT(R,T)=CT(R,T);$

PARAMETERS

*EN EL APENDICE B DE EVA TOMAN LA "H" COMO LA "I", OJO CON ESE DETALLE

$H(R)$ TOTAL DISCHARGE TO (EG INDUSTRIAL DISCHARGE + SANITARY DISCHARGE ETC) THE REACH,
 $CH(R)$ CONCENTRATION OF TOTAL DISCHARGE TO (EG INDUSTRIAL DISCHARGE + SANITARY DISCHARGE ETC) THE REACH;

$H(R)=0;$
 $CH(R)=10;$

PARAMETER $PR(R)$ PRECIPITATION FLOW DISCHARGED TO THE Ith REACH;
 $PR(R)=0;$

PARAMETER $CPR(R)$ CONCENTRATION OF PRECIPITATION FLOW DISCHARGED TO THE Ith REACH;
 $CPR(R)=1;$

PARAMETERS

$DR(R)$ NON-TRIBUTARY DIRECT DISCHARGE TO THE Ith REACH

/

1	0.0133
2	0.0497
3	0.0133
4	0.01862
5	0
6	0.07
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0.39
12	0
13	0.465
14	0
15	0/

$CDR(R)$ CONCENTRATION OF NON-TRIBUTARY DIRECT DISCHARGE TO THE Ith REACH

/

1	1.5
2	1.5
3	1.5
4	1.5
5	0
6	1.5
7	1.5
8	0
9	0
10	0
11	1.5
12	0
13	1.5
14	0
15	1.5/

$DAG(R)$ NON-AGRICULTURAL DIRECT DISCHARGE TO THE Ith REACH

/

1	0
2	0
3	0
4	0
5	0.0093
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0

11 0
 12 0.597
 13 0
 14 0.05576
 15 0/

CDAG(R) CONCENTRATION OF NON-AGRICULTURAL DIRECT DISCHARGE TO THE Ith REACH

/

1 0
 2 0
 3 0
 4 0
 5 1.5
 6 0
 7 0
 8 0
 9 1.5
 10 1.5
 11 0
 12 1.5
 13 0
 14 1.5
 15 0/

DSA(R) NON-SANITARY DIRECT DISCHARGE TO THE Ith REACH

/

1 0
 2 0
 3 0
 4 0
 5 0.23
 6 0
 7 0
 8 0
 9 0.138
 10 0.463
 11 0
 12 0.231
 13 0
 14 0.23
 15 0/

CDSA(R) CONCENTRATION OF NON-SANITARY DIRECT DISCHARGE TO THE Ith REACH

/

1 0
 2 0
 3 0
 4 0
 5 12.5
 6 0
 7 0
 8 0
 9 9.5
 10 9.5
 11 0
 12 9.5
 13 0
 14 9.5
 15 0/;

PARAMETER

LR(R) NET LOSSES FROM THE Ith REACH (E.G. SEEPAGE VAPORIZATION USE ETC.);

LR(R)=0;

PARAMETER

CLR(R) CONCENTRATION OF NET LOSSES FROM THE Ith REACH (E.G. SEEPAGE VAPORIZATION USE ETC.);

CLR(R)=0;

PARAMETER UR(R) USAGE DISCHARGE FROM THE Ith REACH

/

1 0
 2 0
 3 0
 4 0
 5 0
 6 0
 7 0
 8 0
 9 0
 10 0
 11 0
 12 0
 13 0
 14 2.06
 15 0/;

PARAMETER

VR(R) VOLUMEN OF Rth REACH

/

1 49418
 2 198403
 3 265488
 4 268351
 5 255062
 6 381294
 7 313406
 8 0
 9 875088
 10 1338120
 11 905301
 12 1137931
 13 1792928
 14 2520704
 15 547338/;

PARAMETER

YMAX MAXIMUM CONCENTRATION FOR THE FINAL DISPOSAL;

CT('13','1')=0.22;
 CT('14','1')=0.95;
 CT('14','2')=0.5;
 CT('15','1')=0.95;
 CT('15','2')=0.95;

*Y.FX('1')=1;
 *FINT.FX('4')=2;
 *COST.LO=100;
 *YDISC.FX=5.6;
 *CPNEW.FX=18.72969;
 *QPNEW.FX('1')=2;
 *CPNEW.FX('1')=5.6;

EQUATIONS

RRR(R) REACTION RATE IN THE Rth REACH,
 ECUR(R) EQUATION OF CONCENTRATION OF USAGE FROM THE Ith REACH,
 FBR1 FLOWRATE BALANCE FOR THE REACH 1,
 FBR4 FLOWRATE BALANCE FOR THE REACH 4,
 FBR10 FLOWRATE BALANCE FOR THE REACH 10,
 FBR11 FLOWRATE BALANCE FOR THE REACH 11,
 FBR12 FLOWRATE BALANCE FOR THE REACH 12,
 FBR15 FLOWRATE BALANCE FOR THE REACH 14,
 FBR(R) FLOWRATE BALANCE FOR THE REACHES,
 PBR1 POLLUTANT BALANCE FOR THE REACH 1,
 PBR4 POLLUTANT BALANCE FOR THE REACH 4,
 PBR10 POLLUTANT BALANCE FOR THE REACH 10,
 PBR11 POLLUTANT BALANCE FOR THE REACH 11,
 PBR12 POLLUTANT BALANCE FOR THE REACH 12,
 PBR15 POLLUTANT BALANCE FOR THE REACH 14,
 PBR(R) POLLUTANT BALANCE FOR REACHES,
 C1 CONSTRAINT 1,

CHL1 CONVEX HULL REFORMULATION FOR LOCATION 1,
 CHL2(P) CONVEX HULL REFORMULATION FOR LOCATION 2,
 CHL3(P) CONVEX HULL REFORMULATION FOR LOCATION 3,
 CV1 CHANGE OF VARIABLE 1,
 CV2 CHANGE OF VARIABLE 2,
 FBI FLOWRATE BALANCE FOR THE INTERCEPTION,
 BI BALANCE FOR THE INTERCEPTION,
 CHI1(J) CONVEX HULL REFORMULATION FOR INTERCEPTION 1,
 CHI2(J) CONVEX HULL REFORMULATION FOR INTERCEPTION 2,
 * FIJALOC FIJA LOCALIZACION,
 * SUSTCONS1 CONSTRAINT FOR REACH 6
 * SUSTCONS2 CONSTRAINT FOR REACH 11
 OBJ OBJECTIVE FUNCTION;

RRR(R)..

$$RQ(R)=E=K*CQ(R);$$

ECUR(R)..

$$CUR(R)=E=CQ(R);$$

FBR1..

$$Q('1')=E=Q0+PR('1')+DR('1')+DAG('1')+DSA('1')+H('1')-LR('1')-UR('1')+SUM(T,FT('1',T));$$

FBR4..

$$Q('4')=E=Q('3')+PR('4')+DR('4')+DAG('4')+DSA('4')+H('4')-LR('4')-UR('4')+SUM(T,FT('4',T))+QPNEW('4');$$

FBR10..

$$Q('10')=E=Q('9')+PR('10')+DR('10')+DAG('10')+DSA('10')+H('10')-LR('10')-UR('10')+SUM(T,FT('10',T))+QPNEW('3');$$

FBR11..

$$Q('11')=E=Q('7')+Q('10')+PR('11')+DR('11')+DAG('11')+DSA('11')+H('11')-LR('11')-UR('11')+SUM(T,FT('11',T));$$

FBR12..

$$Q('12')=E=Q('11')+PR('12')+DR('12')+DAG('12')+DSA('12')+H('12')-LR('12')-UR('12')+SUM(T,FT('12',T))+QPNEW('2');$$

FBR15..

$$Q('15')=E=Q('14')+PR('15')+DR('15')+DAG('15')+DSA('15')+H('15')-LR('15')-UR('15')+SUM(T,FT('15',T))+QPNEW('1');$$

*EXCEPS 1;4;8;11

FBR(R)\$((ORD(R) NE 1) AND (ORD(R) NE 4) AND (ORD(R) NE 8) AND (ORD(R) NE 10) AND (ORD(R) NE 11) AND (ORD(R) NE 12) AND (ORD(R) NE 15)).

$$Q(R)=E=Q(R-1)+PR(R)+DR(R)+DAG(R)+DSA(R)+H(R)-LR(R)-UR(R)+SUM(T,FT(R,T));$$

PBR1..

$$Q('1')*CQ('1')=E=Q0*CQ0+PR('1')*CPR('1')+DR('1')*CDR('1')+DAG('1')*CDAG('1')+DSA('1')*CDSA('1')+H('1')*CH('1')-LR('1')*CLR('1')-UR('1')*CUR('1')+SUM(T,(FT('1',T)*CT('1',T)))-RQ('1')*VR('1');$$

PBR4..

$$Q('4')*CQ('4')=E=Q('3')*CQ('3')+PR('4')*CPR('4')+DR('4')*CDR('4')+DAG('4')*CDAG('4')+DSA('4')*CDSA('4')+H('4')*CH('4')-LR('4')*CLR('4')-UR('4')*CUR('4')+FT('4',1)*CT('4',1)+FT('4',2)*CT('4',2)+FT('4',3)*CT('4',3)+FT('4',4)*CT('4',4)-RQ('4')*VR('4')+QPNEW('4')*CPNEW('4');$$

PBR10..

$$Q('10')*CQ('10')=E=Q('9')*CQ('9')+PR('10')*CPR('10')+DR('10')*CDR('10')+DAG('10')*CDAG('10')+DSA('10')*CDSA('10')+H('10')*CH('10')-LR('10')*CLR('10')-UR('10')*CUR('10')+SUM(T,(FT('10',T)*CT('10',T)))-RQ('10')*VR('10')+QPNEW('3')*CPNEW('3');$$

PBR11..

$$Q('11')*CQ('11')=E=Q('7')*CQ('7')+Q('10')*CQ('10')+PR('11')*CPR('11')+DR('11')*CDR('11')+DAG('11')*CDAG('11')+DSA('11')*CDSA('11')+H('11')*CH('11')-LR('11')*CLR('11')-UR('11')*CUR('11')+SUM(T,(FT('11',T)*CT('11',T)))-RQ('11')*VR('11');$$

PBR12..

$$Q('12')*CQ('12')=E=Q('11')*CQ('11')+PR('12')*CPR('12')+DR('12')*CDR('12')+DAG('12')*CDAG('12')+DSA('12')*CDSA('12')+H('12')*CH('12')-LR('12')*CLR('12')-UR('12')*CUR('12')+SUM(T,(FT('12',T)*CT('12',T)))-RQ('12')*VR('12')+QPNEW('2')*CPNEW('2');$$

PBR15..

$Q('15')*CQ('15')=E=Q('14')*CQ('14')+PR('15')*CPR('15')+DR('15')*CDR('15')+DAG('15')*CDAG('15')+DSA('15')*CDSA('15')+H('15')*CH('15')-LR('15')*CLR('15')-UR('15')*CUR('15')+SUM(T,(FT('15',T)*CT('15',T)))-RQ('15')*VR('15')+QPNEW('1')*CPNEW('1');$

*EXCEPS 1;4;8;11

PBR(R)\$((ORD(R) NE 1) AND (ORD(R) NE 4) AND (ORD(R) NE 8) AND (ORD(R) NE 10)AND (ORD(R) NE 11)AND (ORD(R) NE 12)AND (ORD(R) NE 15))..

$Q(R)*CQ(R)=E=Q(R-1)*CQ(R-1)+PR(R)*CPR(R)+DR(R)*CDR(R)+DAG(R)*CDAG(R)+DSA(R)*CDSA(R)+H(R)*CH(R)-LR(R)*CLR(R)-UR(R)*CUR(R)+SUM(T,(FT(R,T)*CT(R,T)))-RQ(R)*VR(R);$

C1..

$CQ('15')=L=YMAX;$

CHL1..

$SUM(P,Y(P))=E=1;$

CHL2(P)..

$QPNEW(P)=L=QPNEWUP*Y(P);$

CHL3(P)..

$CPNEW(P)=L=CPNEWUP*Y(P);$

CV1..

$SUM(P,QPNEW(P))=E=QPNEWDATA;$

CV2..

$SUM(P,CPNEW(P))=E=YDISC;$

FBI..

$QPNEWDATA=E=SUM(J,FINT(J));$

BI..

$SUM(J,FINT(J)*YOUT(J))=E=QPNEWDATA*YDISC;$

CHII(J)..

$FINT(J)=G=DELTAINT*Z(J);$

CHI2(J)..

$FINT(J)=L=QPNEWDATA*Z(J);$

*FIJALOC..

* $QPNEW('4')=E=QPNEWDATA;$

*SUSTCONS1..

* $CQ('6')=L=1.5;$

*SUSTCONS2..

* $CQ('11')=L=3;$

OBJ..

$COST=E=SUM(P,CLAND(P)*Y(P))+0.1*(SUM(J,CF(J)*Z(J)))+HY*3600*(SUM(J,CV(J)*FINT(J)));$

MODEL MFA /ALL/;

OPTIONS MINLP=DICOPT;

OPTION NLP=CONOPT;

*\$ONTEXT

$RQ.L(R)=2E-5;$

* $RQ.LO(R)=0;$ $RQ.UP(R)=6E-5;$

$CUR.L(R)=2;$

* $CUR.LO(R)=1;$ $CUR.UP(R)=7;$

$Q.L(R)=15;$ $Q.UP(R)=65;$

$CQ.L(R)=2;$ $CQ.UP(R)=10;$

$QPNEW.L(P)=QPNEWDATA;$ $QPNEW.UP(P)=QPNEWDATA+.5;$

$CPNEW.L(P)=5;$ $CPNEW.UP(P)=YIN;$

* $CPNEW(P)$

* $YDISC.L=6;$

$YDISC.UP=YIN;$

$FINT.L(J)=1;$

* $FINT.LO(J)=0;$ $FINT.UP(J)=QPNEWDATA;$

* $Y.L('1')=0;$ $Y.L('2')=0;$ $Y.L('3')=0;$ $Y.L('4')=1;$

```
*Y.FX('1')=1;
*Y.FX('2')=1;
*YDISC.FX=45.796;
*$OFFTEXT
*QPNEWDATA=0;
Y.FX('4')=1;
YMAX=1.503;
SOLVE MFA USING MINLP MINIMIZING COST;
*Y.FX('4')=1;
*YMAX=1.18;
*SOLVE MFA USING MINLP MINIMIZING COST;
*Y.FX('1')=1;
*YMAX=1.25;
*SOLVE MFA USING MINLP MINIMIZING COST;
*SYSTEM      WITHOUT PLANT      WITH PLANT
*PHOSPHOROUS  1.17  1.25,1.3,1.4  1.503

PARAMETERS COSTLAND,COSTTREAT,COSTFIX,COSTVAR;
COSTLAND=SUM(P,CLAND(P)*Y.L(P));
COSTTREAT=0.1*(SUM(J,CF(J)*Z.L(J))+HY*3600*(SUM(J,CV(J)*FINT.L(J)));
COSTFIX=0.1*(SUM(J,CF(J)*Z.L(J)));
COSTVAR=HY*3600*(SUM(J,CV(J)*FINT.L(J)));

DISPLAY FT;
DISPLAY CT;
DISPLAY QPNEW.L,YDISC.L,CQ.L;
DISPLAY COSTLAND;
DISPLAY COSTTREAT,COSTFIX,COSTVAR;
DISPLAY COST.L;
```

Apéndice D

A continuación se muestra el programa implementado en *GAMS* para el Ejemplo 2 del Capítulo 4.

```

$title Localización y Diseño de Planta
*OPTION OPTCR=0.0010;
*OPTION OPTCA=.010;
OPTION ITERLIM=100000000;
OPTION RESLIM= 100000000;
OPTION MIP = CPLEX;
OPTION LP = CPLEX;
OPTION NLP = MINOS;
OPTION MINLP =DICOPT;
OPTION SYSOUT=ON;
OPTION DECIMALS=5;
$ONEMPTY;
*****CONJUNTOS DEL DISEÑO*****
SETS
  I  NUMBER OF PROCESS SOURCES          /1*11/
  J  NUMBER OF PROCESS SINKS            /1*7/
  K  NUMBER OF FRESH SOURCES           /1*4/
  C  COMPONENTS                         /NIT,AZU,ARS/
  YINT(C) COMPONENTS INTERCEPTED      /NIT,AZU,ARS/
  YNINT(C) COMPONENTS NOT INTERCETED    //
  INT  INTERCEPTORS FOR THE TREATMENT OF NIT /REC1,REC2,REC3,REC4,REC5,REC6/
  YSINKMAX(C) COMPONENTS CONSTRAINED BY THE SINKS MAXIMUM /NIT,AZU,ARS/
  YSINKMIN(C) COMPONENTS CONSTRAINED BY THE SINKS MINIMUM /NIT,AZU,ARS/
  YSINK(C)  PROPERTY CONSTRAINED IN THE PROCESS SINKS /NIT,AZU,ARS/
  YENVMAX(C) COMPONENTS CONSTRAINED BY THE ENVIRONEMNT /NIT,AZU,ARS/
  YENVMIN(C) COMPONENTS CONSTRAINED BY THE ENVIRONMENT /NIT,AZU,ARS/
  YWASTE(C) COMPONENTS CONSTRAINED BY THE ENVIRONMENT /NIT,AZU,ARS/

*****CONJUNTOS DEL MFA*****
SETS
  R  Número de Reaches                  /1*23/
  T  Número Máximo de Efluentes en Cualquier Reach /1*10/
  P  Número de Posibles Localizaciones de la Planta /1*20/
  N(R) Reaches Especiales                /2,4,6,8,23/

*****VARIABLES Y ALGUNOS DATOS DEL MFA*****
SCALAR QPNEWUP  Valor Máximo de QPNEW /5/;
SCALAR CPNEWUP  Valor Máximo de CPNEW /100/;
SCALAR DELTAINT Incremento para el Convex-Hull de Interceptores /0.001/;

POSITIVE VARIABLES
RQ(C,R)  REACTION RATE
CUR(C,R)  CONCENTRATION OF USAGE DISCHARGE FROM THE Ith REACH
Q(R)     FLOWRATE LEAVING THE Ith REACH
CQ(C,R)  CONCENTRATION IN THE FLOWRATE LEAVING THE Ith REACH
QPNEW(P)  DISCHARGE OF THE NEW PLANT
CPNEW(C,P)  COMPOSITION OF THE NEW PLANT
FT(R,T)  Descarga del Efluente "T" al Reach "R",
CT(C,R,T)  Concentración de la Descarga del Efluente "T" al Reach "R";

VARIABLE RS  Restricción al Mar;

PARAMETER ALFA  Coeficiente de Descargas Agrícolas;
ALFA=0.000148;
PARAMETER BETA  Coeficiente de Uso Agrícola;
BETA=0.000296;
PARAMETER KR(C)  Constante Cinética;
KR('NIT')=1.492E-6*2.17; KR('AZU')=1.492E-6; KR('ARS')=9.041E-6/20;
PARAMETER Q10  Flujo Inicial del Reach 1;
Q10=1.1;
PARAMETER CQ10(C)  Concentración Inicial del Reach 1  VALORES

```

```

/NIT 7.5
AZU 1.2
ARS 0.035/;
PARAMETER Q90      Flujo Inicial del Reach 9;
      Q90=137.74;
PARAMETER CQ90(C)  Concentración Inicial del Reach 9      VALORES
/NIT 10.6
AZU 2.4
ARS 0.4/;
PARAMETER Q110     Flujo Inicial del Reach 11;
      Q110=3.2;
PARAMETER CQ110(C) Concentración Inicial del Reach 11      VALORES
/NIT 5.89
AZU 3.45
ARS 0.05/;
*****AL MODIFICAR COORIENTES Y TRATAMIENTO SE MODIFICARÁN LOS VALORES
PARAMETER HY      OPERATIONAL TIME OF THE PLANT HR BY YEAR /8000/;
PARAMETER WSOURCE(I) SOURCES FLOWRATES 2.87
/1 0.363
2 0.241
3 0.046
4 0.447
5 0.196
6 0.204
7 0.281
8 0.329
9 0.282
10 0.266
11 0.215/;
PARAMETER GSINK(J) SINKS FLOWRATES 2.32
/1 0.348
2 0.428
3 0.406
4 0.312
5 0.336
6 0.294
7 0.196/;
TABLE YINSOURCE(I,C) IN SOURCE CONCENTRATIONS
*****Checar
      NIT  AZU  ARS
1  64.6  22.4  0.11
2  38    21.6  0.24
3  55.3  10    0.22
4  30    32.5  0.3
5  49.8  16.5  0.31
6  12    28.7  0.15
7  74.2  36.6  0.14
8  57.8  42    0.3
9  46    18.2  0.09
10 32.1  25.1  0.1
11 66.4  17.8  0.13;
TABLE YINSINKMAX(J,YSINKMAX) IN SINKS CONSTRAINTS MAXIMUM
*****Checar
      NIT  AZU  ARS
1  11  5  0.013
2  9.4 6.3 0.061
3  13.3 3.5 0.010
4  8.2 4.5 0.023
5  6.5 2.1 0.009
6  14.2 3.2 0.017
7  9.6 1.3 0.012;
TABLE YINSINKMIN(J,YSINKMIN) IN SINKS CONSTRAINTS MINIMUM
*****Checar
      NIT
1  0;
TABLE YINFRESH(K,C) IN FRESH SOURCE CONCENTRATIONS
*****Checar
      NIT  AZU  ARS
1  0  0  0
2  1  0.5  0.002

```

```

3  2  0.7  0.005
4  2.5  1  0.007;
PARAMETER CONSENVMAX(YENVMAX) MAXIMUM ENVIRONMENTAL CONSTRAINT
*****Checar
/NIT  50
AZU  35
ARS  0.5;
PARAMETER CONSENVMIN(YENVMIN) MINIMUM ENVIRONMENTAL CONSTRAINT
*****Checar
/NIT  0/;
TABLE GAMA(C,INT) EFFICIENCY FOR COMPOSITION INTERCEPTION INT
      REC1 REC2 REC3 REC4 REC5 REC6
NIT  0.95 0.69 0.59 0.73 0.61 0
AZU  0.72 0.92 0.74 0.80 0.57 0
ARS  0.58 0.64 0.90 0.52 0.70 0;

PARAMETER YOUTPIN(I,C,INT) OUT PIN PROPERTY FOR STREAM I;
YOUTPIN(I,YNINT,INT)=YINSOURCE(I,YNINT);
YOUTPIN(I,YINT,INT)=(1-GAMA(YINT,INT))*YINSOURCE(I,YINT);
DISPLAY YOUTPIN;

PARAMETER CLAND(P) Costo de Instalación de Cada Alternativa
/1  8E6
2  8.5E6
3  9E6
4  10.5E6
5  9.5E6
6  9E6
7  15.5E6
8  14.5E6
9  17.75E6
10 22E6
11 18E6
12 17.5E6
13 24E6
14 28E6
15 23.5E6
16 17E6
17 20E6
18 19E6
19 16E6
20 17E6/;

PARAMETER FIXC(INT) FIXED COST FOR INTERCEPTORS INT
*****Checar
/REC1 307000
REC2 353000
REC3 458000
REC4 270000
REC5 320000
REC6 0/;
PARAMETER VARC(INT) VARIABLE COST FOR INTERCEPTORS INT
*****Checar
/REC1 0.007
REC2 0.013
REC3 0.027
REC4 0.018
REC5 0.010
REC6 0/;
PARAMETER CFRESH(K) COST FOR THE FRESH SOURCE R
/1  0.094
2  0.085
3  0.072
4  0.065/;
PARAMETER PIPTRC PIPELINE COST FOR THE TREATMENT;
PIPTRC=0.0025;
PARAMETER PIPWAC PIPELINE COST FOR THE WASTE;
PIPWAC=0.001;
PARAMETER PIPEQC PIPELINE COST FOR THE EQUIPMENTS;
PIPEQC=0.006;

```

PARAMETER PIPFRC PIPELINE COST FOR THE EQUIPMENTS FROM FRESH SOURCES;

PIPFRC=0.004;

*****TERMINA DATOS DEL DISEÑO*****

*****INICIA MAS DATOS DEL MFA*****

TABLE SU(R,T) Descargas sin Tratamiento al Efluente "T" del Reach "R"(Desperdicios Sanitarios)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.85	1.2	1.6	1.7	0	0	0	0	0	0
2	2.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	4.3	2.1	3.3	1.2	0.7	1.9	2.8	7.2	1.8	2.1
4	3.7	4.3	3.7	4.2	4.3	0	0	0	0	0
5	2	0	1.3	0	0	0	0	0	0	0
6	1.9	2.2	0.4	0.3	0	0	0	0	0	0
7	3.8	0.5	0.8	0	0.3	0	0	0	0	0
8	0.75	0.34	0.81	0.94	0	0	0	0	0	0
9	0.6	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0
10	4	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1.1	0	0.6	0.4	0	0.5	0	0.9	0	0
12	4.5	3.9	2.4	0	0	0	0	1.3	0	0
13	3.2	1.3	0	0.72	0	0	0	0	0	0
14	0.7	0.6	0.4	1	0.3	0.2	0	0	0	0
15	1.3	0.7	0.6	0.5	0	0	0	0	0	0
16	2.5	1.3	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0.7	0.3	1.1	0.8	0.2	0.8	0	0	0	0
18	1	3.5	2	1	0	0	0	0	0	0
19	2.1	3.4	0.7	0	0	0	0	0	0	0
20	1.3	0.8	1.5	0	0	0	0	0	0	0
21	1.3	1.1	0.6	0.9	0	0	0	0	0	0
22	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0
23	1.3	1.7	1.6	2.1	0.9	0.7	1	0.5	2.5	0;

*Checar si es un valor Adecuado

PARAMETER CSU(C,R,T) Concentración de las Descargas sin Tratamiento al Efluente "T" del Reach "R"(Desperdicios Sanitarios);

CSU('NIT',R,T)=24.5; CSU('AZU',R,T)=13; CSU('ARS',R,T)=5;

TABLE ST(R,T) Descargas con Tratamiento al Efluente "T" del Reach "R"(Desperdicios Sanitarios)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.35	0.1	0	0.2	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	2.2	0	0	1.8	0	0	0	0
4	0	1.3	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0.4	0	0	0.7	0	0	0	0.2	0	0
12	2.2	0.7	0	1.2	0	0	0	0	0	0
13	0	3.3	0	1.3	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0.2	0.4	0.1	0.3	0	0	0	0.3	0.1	0;

*Checar si es un valor Adecuado

PARAMETER CST(C,R,T) Concentración de las Descargas con Tratamiento al Efluente "T" del Reach "R"(Desperdicios Sanitarios);

CST('NIT',R,T)=10.5; CST('AZU',R,T)=5; CST('ARS',R,T)=.03;

TABLE IND(R,T) Flujo Industrial de Aguas Residuales al Efluente "T" del Reach "R"

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	2.9	0	0	0	0	0	0	0	0

5	4.5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0.8	0	0.6	0	0	0	0	0	0
7	2.9		0.75	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0			
9	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	
11	2.1	1.3	3.4	0	4.2	1.3	1.8	2.2	0
12	0.3	0.9	0.2	0.3	0.7	0.5	0.6	0.2	0
13	0.9		0.8		0	0	0	0	0
14	0	0	0	0					
15	0	0	0	0	0	0			
16	0	0	0	0	0	0	0	0	
17	0	0	0	0.4	0				
18	3.6	3	2	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0		
20	0	0	0	0	0	0	0	0	
21	0	0	0.8	0	0	0	0		
22	0	0	0	0	0	0	0	0	
23	0.4	0.7	0.2	0.2	0.4	0.3	1.2	0;	

*Checar si es un valor Adecuado

PARAMETER CIND(C,R,T) Concentración de las Flujo Industrial de Aguas Residuales al Efluente "T" del Reach "R";
 CIND('NIT',R,T)=25; CIND('AZU',R,T)=10; CIND('ARS',R,T)=0.06;

TABLE PT(R,T) Flujo de Precipitación Descargado al Efluente "T" del Reach "R"

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	7.4	7.38	7.38	7.4	0	0	0	0	0	0
2	14.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	4.18	5.4	4.18	5.18	5.18	4.18	5.2	5.2	5.3	5.18
4	8.91	8.91	8.91	8.91	8.91	0	0	0	0	0
5	7.4	7.4	7.4	0	0	0	0	0	0	0
6	7.4	7.4	7.4	7.4	0	0	0	0	0	0
7	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	0	0	0	0	0
8	9.25	9.25	9.25	9.25	0	0	0	0	0	0
9	15	5	0	0	0	0	0	0	0	0
10	20	15	0	0	0	0	0	0	0	0
11	10	10	10	10	10	10	10	10	0	0
12	20	20	10	10	10	10	10	10	0	0
13	21.89	21.89	21.89	21.89	0	0	0	0	0	0
14	18.24	18.24	18.24	18.24	18.24	18.24	0	0	0	0
15	21.89	21.89	21.89	21.89	0	0	0	0	0	0
16	21.89	21.89	0	0	0	0	0	0	0	0
17	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	0	0	0	0
18	5.54	5.54	5.54	5.54	0	0	0	0	0	0
19	12.33	12.33	12.33	0	0	0	0	0	0	0
20	12.33	12.33	12.33	0	0	0	0	0	0	0
21	9.24	9.24	9.24	9.24	0	0	0	0	0	0
22	18.49	18.49	0	0	0	0	0	0	0	0
23	4.93	4.93	4.93	4.93	4.93	4.93	4.93	4.93	4.93	0;

PARAMETER CPT(C,R,T) Concentración del Flujo de Precipitación Descargado al Efluente "T" del Reach "R";
 CPT(C,R,T)=0;

TABLE AT(R,T) Área de Riego del Efluente "T" del Reach "R"

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	200	150	250	400	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3500	6100	4200	5300	2700	2900	8300	7600	5400	4000
4	4200	3500	6700	2100	3609	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0			
6	0	0	0	0	0	0				
7	0	0	0	0	0					
8	0	0	0	0	0	0				
9	0	0	0	0	0	0	0	0		
10	0	0	0	0	0	0	0	0		
11	0	0								
12							19195	0	0	
13	0	0	0	0	0	0				
14	0	0	0	0						
15	0	0	0	0	0	0				

16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	1216.17	1216.17	1216.17	1216.17	1216.17	1216.17	1216.17	0	0	0
18	2000	800	2100	570	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23							4983	0;		

PARAMETER DT(R,T) Drenaje Agrícola Descargado al Efluente "T" del Reach "R";
 DT(R,T)=ALFA*AT(R,T);

*Checar si es un valor Adecuado

PARAMETER CDT(C,R,T) Concentración del Drenaje Agrícola Descargado al Efluente "T" del Reach "R";
 CDT('NIT',R,T)=12.8; CDT('AZU',R,T)=5.6; CDT('ARS',R,T)=0.055;

TABLE LEE(R,T) Pérdidas de Eevaporación del Efluente "T" del Reach "R"

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	6.85	6.85	6.85	6.85	0	0	0	0	0	0
2	13.72	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42
4	8.21	8.21	8.21	8.21	8.21	0	0	0	0	0
5	6.84	6.84	6.84	0	0	0	0	0	0	0
6	6.84	6.84	6.84	6.84	0	0	0	0	0	0
7	8.21	8.21	8.22	8.22	8.22	0	0	0	0	0
8	8.55	8.56	8.56	8.56	0	0	0	0	0	0
9	5	2.54	0	0	0	0	0	0	0	0
10	8	6.54	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	0
12	13.5	13.5	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	0
13	18.39	18.39	18.39	18.39	0	0	0	0	0	0
14	15.32	15.32	15.32	15.32	15.32	15.32	15.32	0	0	0
15	18.39	18.39	18.39	18.39	0	0	0	0	0	0
16	18.39	18.39	0	0	0	0	0	0	0	0
17	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	0	0	0	0
18	5.13	5.13	5.13	5.13	0	0	0	0	0	0
19	11.41	11.41	11.41	0	0	0	0	0	0	0
20	11.41	11.41	11.41	0	0	0	0	0	0	0
21	8.55	8.55	8.55	8.55	0	0	0	0	0	0
22	17.11	17.11	0	0	0	0	0	0	0	0
23	4.56	4.56	4.56	4.56	4.56	4.56	4.56	4.56	4.56	0;

PARAMETER CLEE(C,R,T) Concentración de las Pérdidas de Eevaporación del Efluente "T" del Reach "R";
 CLEE(C,R,T)=0;

TABLE LEF(R,T) Pérdidas Totales de Filtración del Efluente "T" del Reach "R"

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.38	0.38	0.38	0.38	0	0	0	0	0	0
2	0.86	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
4	0.41	0.38	0.38	0.38	0.38	0	0	0	0	0
5	0.38	0.38	0.38	0	0	0	0	0	0	0
6	0.38	0.38	0.38	0.38	0	0	0	0	0	0
7	0.46	0.47	0.47	0.46	0.46	0	0	0	0	0
8	0.48	0.48	0.48	0.48	0	0	0	0	0	0
9	0.5	0.37	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.49	0.48	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0
12	0.78	0.78	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0
13	0.25	0.25	0.25	0.25	0	0	0	0	0	0
14	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0	0	0	0
15	0.13	0.13	0.13	0.13	0	0	0	0	0	0
16	0.25	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0	0	0	0
18	0.03	0.03	0.03	0.03	0	0	0	0	0	0
19	0.13	0.13	0.13	0	0	0	0	0	0	0
20	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0
21	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0
22	0.15	0.15	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0;

POSITIVE VARIABLE

CLEF(C,R,T) Concentración de las Pérdidas de Filtración del Efluente "T" del Reach "R";

TABLE LEU(R,T) Pérdidas de Uso del Efluente "T" del Reach "R"

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.1	1.15	1.5	1.75	0	0	0	0	0	0
2	2.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	4.1	1.9	5.3	1.15	0.9	3.4	2.8	6.9	1.6	2
4	3.3	5.3	5.85	3.9	4.05	0	0	0	0	0
5	3.5	4.2	1	0	0	0	0	0	0	0
6	2	3	0.3	0.6	0	0	0	0	0	0
7	4.7	0.2	0.6	0.81	0.44	0	0	0	0	0
8	0.63	0.37	0.77	1.07	0	0	0	0	0	0
9	0.35	0.15	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.7	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0
11	3.3	1.4	3.8	0	4.5	1.9	1.6	2.7	0	0
12	3.3	2.0	2.3	1.1	0.2	0	0.2	0.8	0	0
13	2.22	4.7	0.65	1.65	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0						
15	1.1	0.5	0.5	0.3	0	0	0	0	0	0
16	1	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0.7	0.3	0.3	0.4		0.5	0	0	0	0
18	3.6	3.5	1.5	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0			
20	1.1	0.6	1.4	0	0	0	0	0	0	0
21	1	1	0.5	0.4	0	0	0	0	0	0
22	1		0	0	0	0	0	0	0	0
23							1.3	0;		

POSITIVE VARIABLE

CLEU(C,R,T) Concentración de las Pérdidas de Uso del Efluente "T" del Reach "R";

PARAMETER LT(R,T) Pérdidas Totales del Efluente "T" del Reach "R" (P.ej. Filtración Evaporación Uso Etc.);

$$LT(R,T)=LEE(R,T)+LEF(R,T)+LEU(R,T);$$

POSITIVE VARIABLE

CLT(C,R,T) Concentración de las Pérdidas Totales del Efluente "T" del Reach "R" (P.ej. Filtración Evaporación Uso Etc.);

PARAMETER UT(R,T) Uso Agrícola Extraído del Efluente "T" del Reach "R";

$$UT(R,T)=BETA*AT(R,T);$$

POSITIVE VARIABLE

CUT(C,R,T) Concentración del Uso Agrícola Extraído del Efluente "T" del Reach "R";

TABLE VT(R,T) Volumen del Efluente "T" del Reach "R"

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2200	1800	3120	6750	0	0	0	0	0	0
2	820	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	35000	12200	4700	18000	4100	6300	13000	12700	9200	8000
4	4900	12100	8700	5350	4210	0	0	0	0	0
5	1250	730	2300	0	0	0	0	0	0	0
6	4150	3600	7900	6700	0	0	0	0	0	0
7	83950	32400	7200	3120	3080	0	0	0	0	0
8	5530	4720	3110	3650	0	0	0	0	0	0
9	12900	8320	0	0	0	0	0	0	0	0
10	2720	3150	0	0	0	0	0	0	0	0
11	23700	16800	14250	4900	6800	3400	5920	7400	0	0
12	340200	278500	82000	93000	66300	24030	31550	54900	0	0
13	197400	14900	16300	8500	0	0	0	0	0	0
14	28700	39200	44000	17400	8600	27200	0	0	0	0
15	63500	54900	79800	43000	0	0	0	0	0	0
16	339000	286300	0	0	0	0	0	0	0	0
17	39100	64300	13500	6200	8000	8800	0	0	0	0
18	63000	78200	35400	10400	0	0	0	0	0	0
19	43500	16500	7500	0	0	0	0	0	0	0
20	14200	17300	11200	0	0	0	0	0	0	0
21	28600	19600	11000	18700	0	0	0	0	0	0
22	38100	44200	0	0	0	0	0	0	0	0

23 49200 57300 73100 81200 24200 16500 28400 38600 110100 0;

PARAMETER

*EN EL APENDICE B DE EVA TOMAN LA "H" COMO LA "I", OJO CON ESE DETALLE

H(R) Descargas Totales al Reach "R" (P.ej. Descarga Industrial + Sanitaria Etc)

/ 1 0
 2 0.71
 3 4.5
 4 0
 5 2.1
 6 0
 7 0
 8 0
 9 0
 10 0
 11 0.1
 12 0.2
 13 0
 14 0
 15 0
 16 0
 17 0.2
 18 65
 19 0
 20 0
 21 0.2
 22 16
 23 4.2/;

*Checar si es un valor Adecuado

PARAMETER CH(C,R) Concentración de las Descargas Totales al Reach "R" (P.ej. Descarga Industrial + Sanitaria Etc);
 CH('NIT',R)=21.8; CH('AZU',R)=8.5; CH('ARS',R)=0.07;

PARAMETER PR(R) Flujo de Precipitación Descargado al Reach "R"

/ 1 63.39
 2 79.18
 3 44.8
 4 49.43
 5 61.78
 6 64.38
 7 29.59
 8 36.99
 9 150
 10 145
 11 130
 12 100
 13 131.37
 14 109.47
 15 121.37
 16 155.16
 17 165.16
 18 51.79
 19 36.99
 20 36.99
 21 36.99
 22 36.99
 23 29.59/;

PARAMETER CPR(C,R) Concentración del Flujo de Precipitación Descargado al Reach "R";
 CPR(C,R)=0;

PARAMETER DR(R) Descarga Directa no debida a Efluentes al Reach "R"

/ 1 2.4
 2 0.6
 3 7.2
 4 0
 5 0
 6 0
 7 0

8 0
 9 0
 10 0.3
 11 0.4
 12 0
 13 0
 14 0
 15 0
 16 0
 17 0.9
 18 7
 19 0
 20 0
 21 0.3
 22 0
 23 2.3/;

*Checar si es un valor Adecuado

PARAMETER CDR(C,R) Concentración de la Descarga Directa no debida a Efluentes al Reach "R";
 CDR('NIT',R)=18.5; CDR('AZU',R)=9.5; CDR('ARS',R)=.075;

PARAMETER LRE(R) Pérdidas de Evaporación del Reach "R"

/ 1 41.07
 2 54.76
 3 14.26
 4 27.4
 5 47.94
 6 41.1
 7 27.38
 8 34.23
 9 145
 10 138
 11 140
 12 85
 13 110.34
 14 91.96
 15 110.34
 16 147.12
 17 147.12
 18 47.92
 19 34.23
 20 34.23
 21 34.23
 22 34.23
 23 27.38/;

PARAMETER CLRE(C,R) Concentración de las Pérdidas de Evaporación del Reach "R";
 CLRE(C,R)=0;

PARAMETER LRF(R) Pérdidas de Filtración del Reach "R"

/ 1 2.32
 2 3.01
 3 0.77
 4 1.94
 5 2.73
 6 2.35
 7 1.54
 8 1.94
 9 3
 10 2.9
 11 3
 12 0.03
 13 2.84
 14 3.39
 15 3.35
 16 3.35
 17 3.39
 18 3.75
 19 3.48
 20 3.57

21 3.47
 22 3.57
 23 3.42/;

POSITIVE VARIABLE

CLRF(C,R) Concentración de las Pérdidas de Filtración del Reach "R";

PARAMETER LR(R) Pérdidas Totales del Reach "R" (P.ej. Filtración Evaporación Uso Etc.);

LR(R)=LRE(R)+LRF(R);

POSITIVE VARIABLE

CLR(C,R) Concentración de las Pérdidas Totales del Reach "R" (P.ej. Filtración Evaporación Uso Etc.);

PARAMETER UR(R) Uso Extraído del Reach "R"

/ 1 2.7
 2 1.3
 3 7.1
 4 0
 5 2.7
 6 0.3
 7 0
 8 0
 9 0
 10 0.9
 11 2.4
 12 2.7
 13 0
 14 3.2
 15 0.3
 16 0
 17 2.4
 18 80
 19 5.2
 20 0.5
 21 1.3
 22 22
 23 21.3/;

PARAMETER

VR(R) Volumen del Reach "R"

/ 1 120000
 2 103420
 3 115710
 4 135400
 5 152000
 6 155300
 7 284350
 8 313320
 9 527400
 10 613700
 11 595000
 12 740850
 13 775600
 14 830100
 15 1290800
 16 1774300
 17 2720700
 18 7.2E9
 19 4530000
 20 5130000
 21 5080000
 22 1.61E8
 23 3370000/;

PARAMETER YMAX(C,N);

*****TERMINA DATOS DEL MFA*****

*****INICIA VARIABLES DEL DISEÑO*****

BINARY VARIABLES

Y(P) ALLOCATION

Z(I,INT) TREATMENT 1;

POSITIVE VARIABLES

FFRESH(K) FESH WATER FLOWRATE
 F(K,J) FRESH FROM R TO J
 W(I,INT) SEGREGATED FLOWRATE TO INTERCEPTORS INT
 YINSINK(J,C) CONCENTRATION AT THE INLET TO SINK J
 G(I,J,INT) FLOWRATE FROM THE PIN TO THE SINKS
 GWASTE(I,INT) FLOWRATE FROM PIN TO THE WASTE
 YDISC(C) CONCENTRATION IN THE WASTE STREAM;

VARIABLES

TAC TOTAL ANNUAL COST
 WASTE TOTAL WASTE;

EQUATIONS

*****ECUACIONES DEL DISEÑO*****

OBJ OBJECTIVE FUNTION PROCESS CONSTRAINTS
 SEGFRESH(K) SEGREGATION FOR THE FRESH SOURCES
 SEGSOURCEINT(I) SEGREGATION FOR INTERCEPTORS INT
 SPLITPIN(I,INT) SPLITTING FOR THE PIN
 MASSBALSINK(J) MASS BALANCE AT THE MIXER PRIOR TO ANY SINK
 PROPBALSINK(J,YSINK) COMPONENT BALANCE AT THE MIXER PRIOR TO ANY SINK
 MASBALWASTE OVERALL MASS BALANCE FOR THE WASTE
 PROPBALWASTE(YWASTE) COMPONENT BALANCE FOR THE WASTE
 MAXSINKCONST(J,YSINKMAX) MAXIMUM SINKS CONSTRAINTS
 MINSINKCONST(J,YSINKMIN) MINIMUM SINKS CONSTRAINTS
 MAXENVCONST(YENVMAX) MAXIMUM ENVIRONMENT CONSTRAINTS
 MINENVCONST(YENVMIN) MINIMUM ENVIRONMENT CONSTRAINTS
 TIL1(I,INT) TREATMENT 1 INFERIOR LIMIT
 TML1(I,INT) TREATMENT 1 MAXIMIUM LIMIT

*****ECUACIONES DEL MFA Y LOCALIZACIÓN*****

VRR(C,R) Velocidad de Reacción en el Reach "R",
 ICUE(C,R,T) Igualdad de la Concentración del Uso del Efluente "RT",
 ICFE(C,R,T) Igualdad de la Concentración de la Filtración del Efluente "RT",
 ICUA(C,R,T) Igualdad de la Concentración del Uso Agrícola del Efluente "RT",
 PTE(C,R,T) Pérdidas Totales del Efluente "RT"
 BTE52 Balance Total para el Efluente "5-2",
 BTE61 Balance Total para el Efluente "6-1",
 BTE72 Balance Total para el Efluente "7-2",
 BTE101 Balance Total para el Efluente "10-1",
 BTE111 Balance Total para el Efluente "11-1",
 BTE121 Balance Total para el Efluente "12-1",
 BTE122 Balance Total para el Efluente "12-2",
 BTE161 Balance Total para el Efluente "16-1",
 BTE234 Balance Total para el Efluente "23-4",
 BTE(R,T) Balance Total para el Efluente "RT",
 BCE52(C) Balance de Contaminante para el Efluente "5-2",
 BCE61(C) Balance de Contaminante para el Efluente "6-1",
 BCE72(C) Balance de Contaminante para el Efluente "7-2",
 BCE101(C) Balance de Contaminante para el Efluente "10-1",
 BCE111(C) Balance de Contaminante para el Efluente "11-1",
 BCE121(C) Balance de Contaminante para el Efluente "12-1",
 BCE122(C) Balance de Contaminante para el Efluente "12-2",
 BCE161(C) Balance de Contaminante para el Efluente "16-1",
 BCE234(C) Balance de Contaminante para el Efluente "23-4",
 BCE(C,R,T) Balance de Contaminante para el Efluente "RT",
 ECUR(C,R) Ecuación de Concentración del Uso del Reach "R",
 ECFR(C,R) Ecuación de Concentración de la Filtración del Reach "R",
 BPT(C,R) Balance de Pérdidas Totales,
 BFR1 Balance de Flujo para el Reach 1,
 BFR2 Balance de Flujo para el Reach 2,
 BFR4 Balance de Flujo para el Reach 4,
 BFR7 Balance de Flujo para el Reach 7,
 BFR9 Balance de Flujo para el Reach 9,
 BFR10 Balance de Flujo para el Reach 10,
 BFR11 Balance de Flujo para el Reach 11,
 BFR12 Balance de Flujo para el Reach 12,
 BFR13 Balance de Flujo para el Reach 13,
 BFR15 Balance de Flujo para el Reach 15,
 BFR18 Balance de Flujo para el Reach 18,

BFR22	Balance de Flujo para el Reach 22,
BFR23	Balance de Flujo para el Reach 23,
BFR(R)	Balance de Flujo para el Reach "R",
BCR1(C)	Balance de Contaminante para el Reach 1,
BCR2(C)	Balance de Contaminante para el Reach 2,
BCR4(C)	Balance de Contaminante para el Reach 4,
BCR7(C)	Balance de Contaminante para el Reach 7,
BCR9(C)	Balance de Contaminante para el Reach 9,
BCR10(C)	Balance de Contaminante para el Reach 10,
BCR11(C)	Balance de Contaminante para el Reach 11,
BCR12(C)	Balance de Contaminante para el Reach 12,
BCR13(C)	Balance de Contaminante para el Reach 13,
BCR15(C)	Balance de Contaminante para el Reach 15,
BCR18(C)	Balance de Contaminante para el Reach 18,
BCR22(C)	Balance de Contaminante para el Reach 22,
BCR23(C)	Balance de Contaminante para el Reach 23,
BCR(C,R)	Balance de Contaminante para el Reach "R",
R1(C,N)	Restricción,
CHVAR1	Cambio de Variable 1,
CHVAR2(C)	Cambio de Variable 2,
RCHL1	Reformulación Convex Hull para la Localización ec. 1,
RCHL2(P)	Reformulación Convex Hull para la Localización ec. 2,
RCHL3(C,P)	Reformulación Convex Hull para la Localización ec. 3
* FIJALOC	PA FIJAR LA LOCALIZACION
CVR	Cambio de Variable solo de Reacomodo;

 *****MODELO*****

*****ECUACIONES DEL DISEÑO*****

OBJ.. $TAC = E = \text{SUM}(P, CLAND(P) * Y(P)) + 3600 * HY * \text{SUM}(K, CFRESH(K) * FFRESH(K)) +$
 $3600 * HY * PIPTRC * \text{SUM}((I, INT), W(I, INT)) + 3600 * HY * PIPWAC * \text{SUM}((I, INT), GWASTE(I, INT)) +$
 $3600 * HY * PIPEQC * \text{SUM}((I, J, INT), G(I, J, INT)) + 3600 * HY * PIPFRC * \text{SUM}((K, J), F(K, J)) +$
 $3600 * HY * \text{SUM}(I, \text{SUM}(INT, (VARC(INT) * W(I, INT)))) +$
 $0.1 * \text{SUM}(I, \text{SUM}(INT, (FIXC(INT) * Z(I, INT))));$

SEGFRESH(K).. $FFRESH(K) = E = \text{SUM}(J, F(K, J));$
 SEGSSOURCEINT(I).. $WSOURCE(I) = E = \text{SUM}(INT, W(I, INT));$
 SPLITPIN(I, INT).. $W(I, INT) = E = \text{SUM}(J, G(I, J, INT)) + GWASTE(I, INT);$
 MASSBALSINK(J).. $GSINK(J) = E = \text{SUM}((I, INT), G(I, J, INT)) + \text{SUM}(K, F(K, J));$
 PROPBALSINK(J, YSINK)..
 $YINSINK(J, YSINK) * GSINK(J) = E = \text{SUM}((I, INT), G(I, J, INT) * YOUTPIN(I, YSINK, INT)) + \text{SUM}(K, F(K, J) * YINFRESH(K, YSINK));$
 MASBALWASTE.. $\text{SUM}((I, INT), GWASTE(I, INT)) = E = WASTE;$
 PROPBALWASTE(YWASTE).. $\text{SUM}((I, INT), GWASTE(I, INT) * YOUTPIN(I, YWASTE, INT)) = E = WASTE * YDISC(YWASTE);$
 MAXSINKCONST(J, YSINKMAX).. $YINSINK(J, YSINKMAX) = L = YINSINKMAX(J, YSINKMAX);$
 MINSINKCONST(J, YSINKMIN).. $YINSINK(J, YSINKMIN) = G = YINSINKMIN(J, YSINKMIN);$
 MAXENVCONST(YENVMAX).. $YDISC(YENVMAX) = L = CONSENVMAX(YENVMAX);$
 MINENVCONST(YENVMIN).. $YDISC(YENVMIN) = G = CONSENVMIN(YENVMIN);$

TML1(I, INT).. $W(I, INT) = L = WSOURCE(I) * Z(I, INT);$

TIL1(I, INT).. $W(I, INT) = G = DELTAINT * Z(I, INT);$

*****ECUACIONES DEL MFA Y LOCALIZACIÓN*****

VRR(C, R)..
 $RQ(C, R) = E = KR(C) * CQ(C, R);$

ICUE(C, R, T)..
 $CLEU(C, R, T) = E = CT(C, R, T);$

ICFE(C, R, T)..
 $CLEF(C, R, T) = E = CT(C, R, T);$

ICUA(C, R, T)..
 $CUT(C, R, T) = E = CT(C, R, T);$

PTE(C, R, T)..
 $LT(R, T) * CLT(C, R, T) = E = LEE(R, T) * CLEE(C, R, T) + LEF(R, T) * CLEF(C, R, T) + LEU(R, T) * CLEU(C, R, T);$

BTE52..
 $FT('5', '2') = E = SU('5', '2') + ST('5', '2') + IND('5', '2') + PT('5', '2') + DT('5', '2') - LT('5', '2') - UT('5', '2') + QPNEW('3');$

BTE61..

$$FT('6','1')=E=SU('6','1')+ST('6','1')+IND('6','1')+PT('6','1')+DT('6','1')-LT('6','1')-UT('6','1')+QPNEW('4');$$

BTE72..

$$FT('7','2')=E=SU('7','2')+ST('7','2')+IND('7','2')+PT('7','2')+DT('7','2')-LT('7','2')-UT('7','2')+QPNEW('6');$$

BTE101..

$$FT('10','1')=E=SU('10','1')+ST('10','1')+IND('10','1')+PT('10','1')+DT('10','1')-LT('10','1')-UT('10','1')+QPNEW('8');$$

BTE111..

$$FT('11','1')=E=SU('11','1')+ST('11','1')+IND('11','1')+PT('11','1')+DT('11','1')-LT('11','1')-UT('11','1')+QPNEW('10');$$

BTE121..

$$FT('12','1')=E=SU('12','1')+ST('12','1')+IND('12','1')+PT('12','1')+DT('12','1')-LT('12','1')-UT('12','1')+QPNEW('12');$$

BTE122..

$$FT('12','2')=E=SU('12','2')+ST('12','2')+IND('12','2')+PT('12','2')+DT('12','2')-LT('12','2')-UT('12','2')+QPNEW('13');$$

BTE161..

$$FT('16','1')=E=SU('16','1')+ST('16','1')+IND('16','1')+PT('16','1')+DT('16','1')-LT('16','1')-UT('16','1')+QPNEW('16');$$

BTE234..

$$FT('23','4')=E=SU('23','4')+ST('23','4')+IND('23','4')+PT('23','4')+DT('23','4')-LT('23','4')-UT('23','4')+QPNEW('20');$$

*EXCEPS 5,2;6,1;7,2;10,1;11,1;12,1;12,2;16,1;23,4;

BTE(R,T)\$((ORD(R) NE (5) OR ORD(T) NE (2)) AND (ORD(R) NE (6) OR ORD(T) NE (1)) AND (ORD(R) NE (7) OR ORD(T) NE (2)) AND (ORD(R) NE (10) OR ORD(T) NE (1)) AND (ORD(R) NE (11) OR ORD(T) NE (1)) AND (ORD(R) NE (12) OR ORD(T) NE (1)) AND (ORD(R) NE (12) OR ORD(T) NE (2)) AND (ORD(R) NE (16) OR ORD(T) NE (1)) AND (ORD(R) NE (23) OR ORD(T) NE (4))).

$$FT(R,T)=E=SU(R,T)+ST(R,T)+IND(R,T)+PT(R,T)+DT(R,T)-LT(R,T)-UT(R,T);$$

BCE52(C)..

$$FT('5','2')*CT(C,'5','2')=E=SU('5','2')*CSU(C,'5','2')+ST('5','2')*CST(C,'5','2')+IND('5','2')*CIND(C,'5','2')+PT('5','2')*CPT(C,'5','2')+DT('5','2')*CDT(C,'5','2')-$$

$$(LEF('5','2')*CLEF(C,'5','2')+LEU('5','2')*CLEU(C,'5','2')+UT('5','2')*CUT(C,'5','2')+KR(C)*CT(C,'5','2')*VT('5','2'))+QPNEW('3')*CPNEW(C,'3');$$

BCE61(C)..

$$FT('6','1')*CT(C,'6','1')=E=SU('6','1')*CSU(C,'6','1')+ST('6','1')*CST(C,'6','1')+IND('6','1')*CIND(C,'6','1')+PT('6','1')*CPT(C,'6','1')+DT('6','1')*CDT(C,'6','1')-$$

$$(LEF('6','1')*CLEF(C,'6','1')+LEU('6','1')*CLEU(C,'6','1')+UT('6','1')*CUT(C,'6','1')+KR(C)*CT(C,'6','1')*VT('6','1'))+QPNEW('4')*CPNEW(C,'4');$$

BCE72(C)..

$$FT('7','2')*CT(C,'7','2')=E=SU('7','2')*CSU(C,'7','2')+ST('7','2')*CST(C,'7','2')+IND('7','2')*CIND(C,'7','2')+PT('7','2')*CPT(C,'7','2')+DT('7','2')*CDT(C,'7','2')-$$

$$(LEF('7','2')*CLEF(C,'7','2')+LEU('7','2')*CLEU(C,'7','2')+UT('7','2')*CUT(C,'7','2')+KR(C)*CT(C,'7','2')*VT('7','2'))+QPNEW('6')*CPNEW(C,'6');$$

BCE101(C)..

$$FT('10','1')*CT(C,'10','1')=E=SU('10','1')*CSU(C,'10','1')+ST('10','1')*CST(C,'10','1')+IND('10','1')*CIND(C,'10','1')+PT('10','1')*CPT(C,'10','1')+DT('10','1')*CDT(C,'10','1')-$$

$$(LEF('10','1')*CLEF(C,'10','1')+LEU('10','1')*CLEU(C,'10','1')+UT('10','1')*CUT(C,'10','1')+KR(C)*CT(C,'10','1')*VT('10','1'))+QPNEW('8')*CPNEW(C,'8');$$

BCE111(C)..

$$FT('11','1')*CT(C,'11','1')=E=SU('11','1')*CSU(C,'11','1')+ST('11','1')*CST(C,'11','1')+IND('11','1')*CIND(C,'11','1')+PT('11','1')*CPT(C,'11','1')+DT('11','1')*CDT(C,'11','1')-$$

$$(LEF('11','1')*CLEF(C,'11','1')+LEU('11','1')*CLEU(C,'11','1')+UT('11','1')*CUT(C,'11','1')+KR(C)*CT(C,'11','1')*VT('11','1'))+QPNEW('10')*CPNEW(C,'10');$$

BCE121(C)..

FT('12','1')*CT(C,'12','1')=E=SU('12','1')*CSU(C,'12','1')+ST('12','1')*CST(C,'12','1')+IND('12','1')*CIND(C,'12','1')+PT('12','1')*CPT(C,'12','1')+DT('12','1')*CDT(C,'12','1')-

(LEF('12','1')*CLEF(C,'12','1')+LEU('12','1')*CLEU(C,'12','1')+UT('12','1')*CUT(C,'12','1')+KR(C)*CT(C,'12','1')*VT('12','1')+QPNEW('12')*C PNEW(C,'12');

BCE122(C)..

FT('12','2')*CT(C,'12','2')=E=SU('12','2')*CSU(C,'12','2')+ST('12','2')*CST(C,'12','2')+IND('12','2')*CIND(C,'12','2')+PT('12','2')*CPT(C,'12','2')+DT('12','2')*CDT(C,'12','2')-

(LEF('12','2')*CLEF(C,'12','2')+LEU('12','2')*CLEU(C,'12','2')+UT('12','2')*CUT(C,'12','2')+KR(C)*CT(C,'12','2')*VT('12','2')+QPNEW('13')*C PNEW(C,'13');

BCE161(C)..

FT('16','1')*CT(C,'16','1')=E=SU('16','1')*CSU(C,'16','1')+ST('16','1')*CST(C,'16','1')+IND('16','1')*CIND(C,'16','1')+PT('16','1')*CPT(C,'16','1')+DT('16','1')*CDT(C,'16','1')-

(LEF('16','1')*CLEF(C,'16','1')+LEU('16','1')*CLEU(C,'16','1')+UT('16','1')*CUT(C,'16','1')+KR(C)*CT(C,'16','1')*VT('16','1')+QPNEW('16')*C PNEW(C,'16');

BCE234(C)..

FT('23','4')*CT(C,'23','4')=E=SU('23','4')*CSU(C,'23','4')+ST('23','4')*CST(C,'23','4')+IND('23','4')*CIND(C,'23','4')+PT('23','4')*CPT(C,'23','4')+DT('23','4')*CDT(C,'23','4')-

(LEF('23','4')*CLEF(C,'23','4')+LEU('23','4')*CLEU(C,'23','4')+UT('23','4')*CUT(C,'23','4')+KR(C)*CT(C,'23','4')*VT('23','4')+QPNEW('20')*C PNEW(C,'20');

*EXCEPS 5,2;6,1;7,2;10,1;11,1;12,1;12,2;16,1;23,4;

BCE(C,R,T)\$((ORD(R) NE (5) OR ORD(T) NE (2)) AND (ORD(R) NE (6) OR ORD(T) NE (1)) AND (ORD(R) NE (7) OR ORD(T) NE (2)) AND (ORD(R) NE (10) OR ORD(T) NE (1)) AND (ORD(R) NE (11) OR ORD(T) NE (1)) AND (ORD(R) NE (12) OR ORD(T) NE (1)) AND (ORD(R) NE (12) OR ORD(T) NE (2)) AND (ORD(R) NE (16) OR ORD(T) NE (1)) AND (ORD(R) NE (23) OR ORD(T) NE (4)))..

FT(R,T)*CT(C,R,T)=E=SU(R,T)*CSU(C,R,T)+ST(R,T)*CST(C,R,T)+IND(R,T)*CIND(C,R,T)+PT(R,T)*CPT(C,R,T)+DT(R,T)*CDT(C,R,T)-(LEE(R,T)*CLEE(C,R,T)+LEF(R,T)*CLEF(C,R,T)+LEU(R,T)*CLEU(C,R,T)+UT(R,T)*CUT(C,R,T)+KR(C)*CT(C,R,T)*VT(R,T));

ECUR(C,R)..

CUR(C,R)=E=CQ(C,R);

ECFR(C,R)..

CLRF(C,R)=E=CQ(C,R);

BPT(C,R)..

LR(R)*CLR(C,R)=E=LRE(R)*CLRE(C,R)+LRF(R)*CLRF(C,R);

BFR1..

Q('1')=E=Q10+PR('1')+DR('1')+H('1')-LR('1')-UR('1')+SUM(T,FT('1',T));

BFR2..

Q('2')=E=Q('1')+PR('2')+DR('2')+H('2')-LR('2')-UR('2')+SUM(T,FT('2',T))+QPNEW('1');

BFR4..

Q('4')=E=Q('3')+PR('4')+DR('4')+H('4')-LR('4')-UR('4')+SUM(T,FT('4',T))+QPNEW('2');

BFR7..

Q('7')=E=Q('6')+PR('7')+DR('7')+H('7')-LR('7')-UR('7')+SUM(T,FT('7',T))+QPNEW('5');

BFR9..

Q('9')=E=Q90+PR('9')+DR('9')+H('9')-LR('9')-UR('9')+SUM(T,FT('9',T));

BFR10..

Q('10')=E=Q('9')+PR('10')+DR('10')+H('10')-LR('10')-UR('10')+SUM(T,FT('10',T))+QPNEW('7');

BFR11..

Q('11')=E=Q110+PR('11')+DR('11')+H('11')-LR('11')-UR('11')+SUM(T,FT('11',T))+QPNEW('9');

BFR12..

$$Q('12')=E=Q('11')+PR('12')+DR('12')+H('12')-LR('12')-UR('12')+SUM(T,FT('12',T))+QPNEW('11');$$

BFR13..

$$Q('13')=E=Q('12')+PR('13')+DR('13')+H('13')-LR('13')-UR('13')+SUM(T,FT('13',T))+QPNEW('14');$$

BFR15..

$$Q('15')=E=Q('14')+Q('10')+PR('15')+DR('15')+H('15')-LR('15')-UR('15')+SUM(T,FT('15',T))+QPNEW('15');$$

BFR18..

$$Q('18')=E=Q('17')+Q('8')+PR('18')+DR('18')+H('18')-LR('18')-UR('18')+SUM(T,FT('18',T))+QPNEW('17');$$

BFR22..

$$Q('22')=E=Q('21')+PR('22')+DR('22')+H('22')-LR('22')-UR('22')+SUM(T,FT('22',T))+QPNEW('18');$$

BFR23..

$$Q('23')=E=Q('22')+PR('23')+DR('23')+H('23')-LR('23')-UR('23')+SUM(T,FT('23',T))+QPNEW('19');$$

*EXCEPS 1;2;4;7;9;10;11;12;13;15;18;22;23

BFR(R)\$(ORD(R) NE 1) AND (ORD(R) NE 2) AND (ORD(R) NE 4) AND (ORD(R) NE 7) AND (ORD(R) NE 9) AND (ORD(R) NE 10) AND (ORD(R) NE 11) AND (ORD(R) NE 12) AND (ORD(R) NE 13) AND (ORD(R) NE 15) AND (ORD(R) NE 18) AND (ORD(R) NE 22) AND (ORD(R) NE 23)).

$$Q(R)=E=Q(R-1)+PR(R)+DR(R)+H(R)-LR(R)-UR(R)+SUM(T,FT(R,T));$$

BCR1(C)..

$$Q('1')*CQ(C,'1')=E=Q10*CQ10(C)+PR('1')*CPR(C,'1')+DR('1')*CDR(C,'1')+H('1')*CH(C,'1')-LR('1')*CLR(C,'1')-UR('1')*CUR(C,'1')+SUM(T,(FT('1',T)*CT(C,'1',T)))-RQ(C,'1')*VR('1');$$

BCR2(C)..

$$Q('2')*CQ(C,'2')=E=Q('1')*CQ(C,'1')+PR('2')*CPR(C,'2')+DR('2')*CDR(C,'2')+H('2')*CH(C,'2')-LR('2')*CLR(C,'2')-UR('2')*CUR(C,'2')+SUM(T,(FT('2',T)*CT(C,'2',T)))-RQ(C,'2')*VR('2')+QPNEW('1')*CPNEW(C,'1');$$

BCR4(C)..

$$Q('4')*CQ(C,'4')=E=Q('3')*CQ(C,'3')+PR('4')*CPR(C,'4')+DR('4')*CDR(C,'4')+H('4')*CH(C,'4')-LR('4')*CLR(C,'4')-UR('4')*CUR(C,'4')+SUM(T,(FT('4',T)*CT(C,'4',T)))-RQ(C,'4')*VR('4')+QPNEW('2')*CPNEW(C,'2');$$

BCR7(C)..

$$Q('7')*CQ(C,'7')=E=Q('6')*CQ(C,'6')+PR('7')*CPR(C,'7')+DR('7')*CDR(C,'7')+H('7')*CH(C,'7')-LR('7')*CLR(C,'7')-UR('7')*CUR(C,'7')+SUM(T,(FT('7',T)*CT(C,'7',T)))-RQ(C,'7')*VR('7')+QPNEW('5')*CPNEW(C,'5');$$

BCR9(C)..

$$Q('9')*CQ(C,'9')=E=Q90*CQ90(C)+PR('9')*CPR(C,'9')+DR('9')*CDR(C,'9')+H('9')*CH(C,'9')-LR('9')*CLR(C,'9')-UR('9')*CUR(C,'9')+SUM(T,(FT('9',T)*CT(C,'9',T)))-RQ(C,'9')*VR('9');$$

BCR10(C)..

$$Q('10')*CQ(C,'10')=E=Q('9')*CQ(C,'9')+PR('10')*CPR(C,'10')+DR('10')*CDR(C,'10')+H('10')*CH(C,'10')-LR('10')*CLR(C,'10')-UR('10')*CUR(C,'10')+SUM(T,(FT('10',T)*CT(C,'10',T)))-RQ(C,'10')*VR('10')+QPNEW('7')*CPNEW(C,'7');$$

BCR11(C)..

$$Q('11')*CQ(C,'11')=E=Q110*CQ110(C)+PR('11')*CPR(C,'11')+DR('11')*CDR(C,'11')+H('11')*CH(C,'11')-LR('11')*CLR(C,'11')-UR('11')*CUR(C,'11')+SUM(T,(FT('11',T)*CT(C,'11',T)))-RQ(C,'11')*VR('11')+QPNEW('9')*CPNEW(C,'9');$$

BCR12(C)..

$$Q('12')*CQ(C,'12')=E=Q('11')*CQ(C,'11')+PR('12')*CPR(C,'12')+DR('12')*CDR(C,'12')+H('12')*CH(C,'12')-LR('12')*CLR(C,'12')-UR('12')*CUR(C,'12')+SUM(T,(FT('12',T)*CT(C,'12',T)))-RQ(C,'12')*VR('12')+QPNEW('11')*CPNEW(C,'11');$$

BCR13(C)..

$$Q('13')*CQ(C,'13')=E=Q('12')*CQ(C,'12')+PR('13')*CPR(C,'13')+DR('13')*CDR(C,'13')+H('13')*CH(C,'13')-LR('13')*CLR(C,'13')-UR('13')*CUR(C,'13')+SUM(T,(FT('13',T)*CT(C,'13',T)))-RQ(C,'13')*VR('13')+QPNEW('14')*CPNEW(C,'14');$$

BCR15(C)..

$$Q('15')*CQ(C,'15')=E=Q('14')*CQ(C,'14')+Q('10')*CQ(C,'10')+PR('15')*CPR(C,'15')+DR('15')*CDR(C,'15')+H('15')*CH(C,'15')-LR('15')*CLR(C,'15')-UR('15')*CUR(C,'15')+SUM(T,(FT('15',T)*CT(C,'15',T)))-RQ(C,'15')*VR('15')+QPNEW('15')*CPNEW(C,'15');$$

BCR18(C)..

$$Q('18')*CQ(C,'18')=E=Q('17')*CQ(C,'17')+Q('8')*CQ(C,'8')+PR('18')*CPR(C,'18')+DR('18')*CDR(C,'18')+H('18')*CH(C,'18')-LR('18')*CLR(C,'18')-UR('18')*CUR(C,'18')+SUM(T,(FT('18',T)*CT(C,'18',T)))-RQ(C,'18')*VR('18')+QPNEW('17')*CPNEW(C,'17');$$

BCR22(C)..

Q('22')*CQ(C,'22')=E=Q('21')*CQ(C,'21')+PR('22')*CPR(C,'22')+DR('22')*CDR(C,'22')+H('22')*CH(C,'22')-LR('22')*CLR(C,'22')-UR('22')*CUR(C,'22')+SUM(T,(FT('22',T)*CT(C,'22',T)))-RQ(C,'22')*VR('22')+QPNEW('18')*CPNEW(C,'18');

BCR23(C)..

Q('23')*CQ(C,'23')=E=Q('22')*CQ(C,'22')+PR('23')*CPR(C,'23')+DR('23')*CDR(C,'23')+H('23')*CH(C,'23')-LR('23')*CLR(C,'23')-UR('23')*CUR(C,'23')+SUM(T,(FT('23',T)*CT(C,'23',T)))-RQ(C,'23')*VR('23')+QPNEW('19')*CPNEW(C,'19');

*EXCEPS 1;2;4;7;9;10;11;12;13;15;18;22;23

BCR(C,R)\$((ORD(R) NE 1) AND (ORD(R) NE 2) AND (ORD(R) NE 4) AND (ORD(R) NE 7) AND (ORD(R) NE 9) AND (ORD(R) NE 10) AND (ORD(R) NE 11) AND (ORD(R) NE 12) AND (ORD(R) NE 13) AND (ORD(R) NE 15) AND (ORD(R) NE 18) AND (ORD(R) NE 22) AND (ORD(R) NE 23)).

Q(R)*CQ(C,R)=E=Q(R-1)*CQ(C,R-1)+PR(R)*CPR(C,R)+DR(R)*CDR(C,R)+H(R)*CH(C,R)-LR(R)*CLR(C,R)-UR(R)*CUR(C,R)+SUM(T,(FT(R,T)*CT(C,R,T)))-RQ(C,R)*VR(R);

R1(C,N)..

CQ(C,N)=L=YMAX(C,N);

CHVAR1..

WASTE=E=SUM(P,QPNEW(P));

CHVAR2(C)..

YDISC(C)=E=SUM(P,CPNEW(C,P));

RCHL1..

SUM(P,Y(P))=E=1;

RCHL2(P)..

QPNEW(P)=L=QPNEWUP*Y(P);

RCHL3(C,P)..

CPNEW(C,P)=L=CPNEWUP*Y(P);

*FIJALOC..

* QPNEW('18')=E=WASTE;

CVR..

RS=E=0;

INicializacion

\$ONTEXT

FFRESH.L(K)=.4;

F.L(K,J)=.3;

F.UP(K,J)=5;

W.L(I,INT)=.1;

G.L(I,J,INT)=.2;

GWASTE.L(I,INT)=.1;

WASTE.L=2.5;

YDISC.L(YWASTE)=2;

Q.L(R)=300;

CQ.L('NIT',R)=8; CQ.L('AZU',R)=2; CQ.L('ARS',R)=0.2;

FT.L(R,T)=10;

CT.L('NIT',R,T)=10; CT.L('AZU',R,T)=4; CT.L('ARS',R,T)=0.05;

*YINSINK.LO(J,YSINKMIN)=YINSINKMIN(J,YSINKMIN);

YINSINK.UP(J,YSINKMAX)=YINSINKMAX(J,YSINKMAX);

Y.L(P)=0;

Z.L(I,INT)=1;

\$OFFTEXT

MODEL

MFA

/VRR,ICUE,ICFE,ICUA,PTE,BTE52,BTE61,BTE72,BTE101,BTE111,BTE121,BTE122,BTE161,BTE234,BTE,BCE52,BCE61,BCE72,BCE101,BCE111,BCE121,BCE122,BCE161,BCE234,BCE,ECUR,ECFR,BPT,BFR1,BFR2,BFR4,BFR7,BFR9,BFR10,BFR11,BFR12,BFR13,BFR15,BFR18,BFR22,BFR23,BFR,BCR1,BCR2,BCR4,BCR7,BCR9,BCR10,BCR11,BCR12,BCR13,BCR15,BCR18,BCR22,BCR23,BCR,CVR/;

MODEL

PLANTA

/SEGFRESH,SEGSOURCEINT,SPLITPIN,MASSBALSINK,PROPBALSINK,MASBALWASTE,PROPBALWASTE,MAXSINKCONST,MIN SINKCONST,MAXENVCONST,MINENVCONST/;

MODEL LYD /ALL/;

LYD.OPTFILE=1;

*LIMITS

*\$ONTEXT

*RQ.UP('FOS',R)=3E-4;

```

*RQ.UP('PHE',R)=5E-5;
*CUR.UP('FOS',R)=8;
*CUR.UP('PHE',R)=0.03;
*Q.UP(R)=570;
*CQ.UP(C,R)=9;
*FT.UP(R,T)=20;
*CT.UP(C,R,T)=5;
QPNEW.UP(P)=SUM(I,WSOURCE(I));
CPNEW.UP(YENVMAX,P)=CONSENVMAX(YENVMAX);
FFRESH.UP(K)=SUM(J,GSINK(J));
F.UP(K,J)=GSINK(J);
W.UP(I,INT)=WSOURCE(I);
YINSINK.UP(J,YSINKMAX)=YINSINKMAX(J,YSINKMAX);
G.UP(I,J,INT)=GSINK(J);
GWASTE.UP(I,INT)=WSOURCE(I);
WASTE.UP=SUM(I,WSOURCE(I));
YDISC.UP(YENVMAX)=CONSENVMAX(YENVMAX);
*$OFFTEXT
*$ONTEXT
SOLVE MFA USING NLP MINIMIZING RS;
DISPLAY Q.L,CQ.L;
DISPLAY FT.L,CT.L;
*RQ.LO(C,R)=RQ.L(C,R);
*CUR.LO(C,R)=CUR.L(C,R);
Q.LO(R)=Q.L(R);
*CQ.LO(C,R)=CQ.L(C,R);
WASTE.LO=1E-3;
SOLVE PLANTA USING NLP MINIMIZING WASTE;
WASTE.LO=WASTE.L;
*WASTE.L=1.5;
$ONTEXT
Y.L(P)=1;
Z.L(I,INT)=1;
RQ.L('FOS',R)=1.5E-5;
RQ.L('PHE',R)=4E-6;
CUR.L('FOS',R)=1.5;
CUR.L('PHE',R)=0.006;
Q.L(R)=10;
CQ.L(C,R)=CUR.L(C,R);
QPNEW.L(P)=SUM(I,WSOURCE(I))-SUM(J,GSINK(J));
CPNEW.L('FOS',P)=40; CPNEW.L('PHE',P)=0.06;
FFRESH.L(K)=0.3;
F.L(K,J)=0.1;
W.L(I,INT)=0;
WASTE.L=SUM(I,WSOURCE(I))-SUM(J,GSINK(J));
YINSINK.LO(J,YSINKMIN)=YINSINKMIN(J,YSINKMIN);
YDISC.LO(YENVMIN)=CONSENVMIN(YENVMIN);
*Q.LO(R)=Q10;
$OFFTEXT
*WASTE.FX=1.5;
YMAX(C,N)=1E3;
SOLVE LYD USING MINLP MINIMIZING TAC;
YMAX('NIT',2)=2; YMAX('AZU',2)=1; YMAX('ARS',2)=0.016;
YMAX('NIT',4)=3.4; YMAX('AZU',4)=1.7; YMAX('ARS',4)=0.026;
YMAX('NIT',6)=3.11; YMAX('AZU',6)=1.45; YMAX('ARS',6)=0.023;
YMAX('NIT',8)=3.42; YMAX('AZU',8)=1.64; YMAX('ARS',8)=0.03;
YMAX('NIT',23)=1.48; YMAX('AZU',23)=0.88; YMAX('ARS',23)=0.038;
SOLVE LYD USING MINLP MINIMIZING TAC;
*SYSTEM WITHOUT PLANT WITH PLANT
*NITROGEN 1.17 1.7358
*SULPHUR 0.00506 0.00624
*ARSENIC
*$ONTEXT
PARAMETERS
CTOT TOTAL COST
CLAN LAND COST
CFRES COST FOR FRESH SOURCES
CTUB COST FOR PIPELINES
CTREAT TREATMENT COST
CTUBTR COST OF TREATMENT PIPELINES

```

```
CTUBEQ COST OF EQUIPMENTS PIPELINES
CTUBWA COST OF WASTE PIPELINES
CTUBFR COST OF FRESH PIPELINES
CVAR VARIABLE COST
CFIX FIXXED COST;
CTOT=TAC.L;
CLAN=SUM(P,CLAND(P)*Y.L(P));
CFRES=3600*HY*SUM(K,CFRESH(K)*FFRESH.L(K));
CTUB=3600*HY*PIPTRC*SUM((I,INT),W.L(I,INT))+3600*HY*PIPWAC*SUM((I,INT),GWASTE.L(I,INT))+3600*HY*PIPEQC*SUM((I,J,INT),G.L(I,J,INT))+3600*HY*PIPFRC*SUM((K,J),F.L(K,J));
CTUBTR=3600*HY*PIPTRC*SUM((I,INT),W.L(I,INT));
CTUBEQ=3600*HY*PIPEQC*SUM((I,J,INT),G.L(I,J,INT));
CTUBWA=3600*HY*PIPWAC*SUM((I,INT),GWASTE.L(I,INT));
CTUBFR=3600*HY*PIPFRC*SUM((K,J),F.L(K,J));
CTREAT=3600*HY*SUM(I,SUM(INT,(VARC(INT)*W.L(I,INT))))+0.1*SUM(I,SUM(INT,(FIXC(INT)*Z.L(I,INT))));
CVAR=3600*HY*SUM(I,SUM(INT,(VARC(INT)*W.L(I,INT))));
CFIX=0.1*SUM(I,SUM(INT,(FIXC(INT)*Z.L(I,INT))));
DISPLAY CTOT,CLAN,CFRES,CTUB,CTREAT,CTOT,CVAR,CFIX,CTREAT,CTUBTR,CTUBEQ,CTUBWA,CTUBFR,CTUB;
DISPLAY FFRESH.L,F.L,W.L,YINSINK.L,G.L,GWASTE.L,WASTE.L,YDISC.L;
DISPLAY YOUTPIN;
DISPLAY Q.L,CQ.L;
DISPLAY FT.L,CT.L;
*$OFFTEXT
```