

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL



DOCTORADO EN INGENIERÍA

# **“Optimización de la cadena de suministros forestal considerando criterios ambientales”**

Sandra R. Campanella

**FICH**

FACULTAD DE INGENIERIA  
Y CIENCIAS HIDRICAS

**INTEC**

INSTITUTO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO  
PARA LA INDUSTRIA QUIMICA

Tesis de Doctorado **2018**



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química

**“Optimización de la cadena de suministros forestal  
considerando criterios ambientales”**

**Sandra R. Campanella**

Tesis remitida al Comité Académico del Doctorado  
como parte de los requisitos para la obtención  
del grado de  
DOCTOR EN INGENIERIA  
Mención Ambiental  
de la  
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

**2018**

Secretaría de Posgrado, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Ciudad Universitaria, Paraje “El  
Pozo”,  
S3000, Santa Fe, Argentina



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química

**“Optimización de la cadena de suministros forestal  
considerando criterios ambientales”**

**Sandra R. Campanella**

**Lugar de Trabajo:**

INGAR-(CONICET-UTN)  
Instituto de Desarrollo y Diseño  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Universidad Nacional del Litoral

**Director:**

Jorge M. Montagna                      INGAR-UTN

**Co-director:**

Gabriela Corsano                      INGAR-UNL

**Jurado Evaluador:**

-Nicolás Scenna	Universidad Tecnológica Nacional
-Fernando Mele	Universidad Nacional de Tucumán
-Oscar Iribarren	INGAR
-Carlos Mendez	INTEC-UNL

**2018**

Doctorado en Ingeniería

## DECLARACION DEL AUTOR

Esta tesis ha sido remitida como parte de los requisitos para la obtención del grado académico de Doctor en Ingeniería - Mención Ambiental ante la Universidad Nacional del Litoral y será depositada en la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas para que esté a disposición de sus lectores bajo las condiciones estipuladas por el Reglamento de la mencionada Biblioteca. Citaciones breves de esta tesis son permitidas sin la necesidad de un permiso especial, en la suposición de que la fuente sea correctamente citada. Solicitudes de permiso para la citación extendida o para la reproducción parcial o total de este manuscrito serán concebidos por el portador legal del derecho de propiedad intelectual de la obra.

*El ambiente es un sistema complejo, abierto, con un sin fin de interacciones y elementos...*

*En él coexisten diferentes conflictos, que pueden generar otros conflictos, que desequilibran y atentan con la sustentabilidad del sistema.*

*Pero, a su vez, este sistema, cuenta con potencialidades que, muchas veces, por más insignificantes que parezcan, si son aprovechadas estratégicamente, pueden generar un camino hacia su sustentabilidad...*

*A Enrique, por mostrarme otra forma de ver las cosas.*

*A Alejandro, por atenuar parte de mis conflictos.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Instituto de Desarrollo y Diseño (INGAR) y sus miembros por brindarme la posibilidad de realizar mi tesis.

A mis directores, Gabriela y Marcelo, por acompañarme en todo el proceso.

A mis padres, Noemí y Ricardo, por ser, en gran parte, motivo de esta tesis.

A mi hermano, Martín, por su acompañamiento y aliento.

A mi abuela, María, por ser una inspiración.

A Daniela y Laura por haberme dado varias manos.

A Virginia, Iara, Paula, Ma. Elina, Naiara, Nicolás, Alexis, Pablo, Luis por estar.

## **I. Índice general**

1	Introducción .....	1
1.1	Introducción .....	2
1.2	Estructura de la tesis .....	9
1.3	Publicaciones .....	12
2	Optimización de la CS forestal considerando el uso de residuos y subproductos. .	15
2.1	Introducción .....	16
2.2	Descripción del problema .....	22
2.3	Modelo matemático .....	26
2.3.1	Obtención de materia prima .....	27
2.3.2	Unidades de producción .....	28
2.3.3	Subproductos .....	30
2.3.4	Requerimientos de energía térmica .....	31
2.3.5	Demandas .....	32
2.3.6	Función objetivo .....	33
2.4	Caso de estudio .....	36
2.5	Resultados y discusión .....	39
2.5.1	Caso 1: “Caso base” .....	39
2.5.2	Caso 2 .....	43
2.5.3	Caso 3 .....	45
2.5.4	Análisis de sensibilidad .....	48
2.6	Conclusiones .....	52
	Apéndice A. Parámetros del modelo del capítulo 2.....	64
3	Optimización de la CS forestal considerando las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).....	68
3.1	Introducción .....	69
3.2	Metodología .....	74
3.3	Modelo matemático .....	78

3.3.1	Calderas .....	79
3.3.2	Demandas .....	83
3.3.3	Función objetivo económica.....	83
3.3.4	Función objetivo ambiental: emisiones de GEI.....	84
3.3.5	Modelo multiobjetivo .....	86
3.4	Caso de estudio .....	89
3.5	Resultados.....	90
3.5.1	Alternativas en la generación de energía.....	91
3.5.2	Perspectiva económica vs ambiental en el diseño de la CS .....	97
3.6	Conclusiones.....	102
4	Consideraciones del entorno natural en el diseño y optimización de la CS, en el contexto de la metodología de Evaluación de Impacto Ambiental. ....	107
4.1	Introducción .....	108
4.1.1	Evaluación de impacto ambiental.....	120
4.2	Metodología.....	123
4.2.1	Metodología para el medio natural.....	126
4.3	Modelo matemático .....	134
4.3.1	Ecuaciones para el agua superficial.....	134
4.3.2	Ecuaciones relacionadas al paisaje.....	144
4.3.3	Función objetivo.....	145
4.4	Caso de estudio .....	145
4.5	Resultados.....	148
4.5.1	Caso base.....	148
4.5.2	Escenario 1 .....	153
4.5.3	Escenario 2 .....	153
4.5.4	Escenario 3 .....	156
4.5.5	Escenario 4 .....	158

4.5.6	Escenario 5 .....	160
4.5.7	Escenario 6 .....	161
4.6	Conclusiones .....	163
5	Consideraciones del entorno social en el diseño y optimización de la CS. ....	168
5.1	Introducción .....	169
5.2	Metodología .....	175
5.2.1	Modelo matemático .....	180
5.3	Caso de estudio .....	181
5.4	Resultados .....	182
5.4.1	Desempeño del <i>Isg</i> .....	182
5.4.2	Función económica vs función social.....	185
5.4.3	Indicador <i>Isg</i> vs empleos generados.....	208
5.5	Conclusiones .....	212
6	Consideraciones del entorno natural y social aplicados al diseño y optimización de la CS, en el contexto de la metodología de EIA.....	216
6.1	Introducción .....	217
6.2	Metodología y caso de estudio.....	217
6.3	Resultados.....	218
6.4	Conclusiones .....	223
7	Conclusiones .....	225
	Nomenclatura.....	230
	Anexo I. Decreto 1089, Santa Fe.....	239

## **II. Índice de figuras**

Figura 2.1. Relaciones consideradas entre los diferentes nodos de la CS forestal.....	25
Figura 2.2. Caso 1: Configuración óptima de la CS.....	42
Figura 2.3. Caso 1: distribución óptima de los subproductos de aserraderos a los diferentes sitios donde se utilizan.....	42
Figura 2.4. Caso 3: distribución óptima a plantas de pellets y etanol de los residuos generados en las plantaciones.....	47
Figura 3.1. Límites para el análisis de emisiones de GEI. ....	76
Figura 3.2. Destino de los troncos para los diferentes escenarios. ....	92
Figura 3.3. Producción en cada escenario. ....	93
Figura 3.4. Destino de los diferentes subproductos en cada escenario.....	94
Figura 3.5. <i>Bf</i> , <i>Emcald</i> y <i>Emtrans</i> de los diferentes escenarios.....	96
Figura 3.6. Superficie de Pareto considerando el objetivo económico y los objetivos de emisiones de GEI.....	98
Figura 3.7. Emisiones de caldera vs beneficio económico.....	100
Figura 3.8. Emisiones de transporte vs beneficio económico. ....	100
Figura 4.1 Dimensiones y algunos componentes del medio natural y social.....	121
Figura 4.2. Metodología general.....	124
Figura 4.3. Balance de materia en el curso de agua superficial.....	130
Figura 4.4. Configuración óptima del caso base. ....	150
Figura 5.1. Curva de Pareto modelo multiobjetivo. ....	187
Figura 5.2. Curva de Pareto <i>Iseg</i> .....	210
Figura 6.1. Configuración del escenario 7.....	220
Figura 6.2. <i>Bf</i> para los diferentes escenarios analizados. ....	223

### **III. Índice de tablas**

Tabla 2.1. Relaciones entre unidades productivas, materia prima y combustible.....	26
Tabla 2.2. Demandas máximas de productos en las regiones de consumo. ....	38
Tabla 2.3. Reporte económico de los diferentes casos. ....	43
Tabla 2.4. Satisfacción de la demanda, producción y uso de materia prima para los diferentes casos estudiados. ....	45
Tabla 2.5. Localización de las diferentes unidades de producción en los tres casos estudiados. ....	47
Tabla 2.6. Resultados de los diferentes escenarios estudiados en el análisis de sensibilidad. ....	50
Tabla 2.7. Ubicación de las plantas y tamaños adoptados en el análisis de sensibilidad para los diferentes escenarios. ....	51
Tabla 3.1. Demandas mínimas consideradas en el capítulo 3. ....	89
Tabla 3.2. Tamaños máximos de las unidades de producción.....	90
Tabla 3.3. Capacidades máximas para los diferentes tipos de calderas. ....	90
Tabla 3.4. Localización y tamaño de plantas y calderas. ....	95
Tabla 3.5. Valores del $Bf$ para los diferentes valores de $Emtrans$ y $Emcald$ .....	98
Tabla 3.6. Configuración de dos puntos de la superficie de Pareto.....	102
Tabla 4.1. Algunas medidas del grado de contaminación del agua.....	127
Tabla 4.2. Ejemplificación del IAS. ....	131
Tabla 4.3. Valores para la DQO según normativa con los intervalos modificados.....	142
Tabla 4.4. Valores de DQO y caudal de las plantas de producción .....	146
Tabla 4.5. Características de cada sitio.....	147
Tabla 4.6. Superficie ocupada por las plantas de producción. ....	147
Tabla 4.7. Escenarios bajo análisis.....	148

Tabla 4.8. Resumen económico para los diferentes escenarios.....	151
Tabla 4.9. Resultados para los diferentes escenarios.....	151
Tabla 4.10. Tamaño y distribución de las unidades de producción.....	152
Tabla 4.11. Valores del caso base.....	152
Tabla 4.12. Configuración de las unidades de producción del escenario 2.....	155
Tabla 4.13. Características del agua superficial para el escenario 2. ....	155
Tabla 4.14. Configuración de las unidades de producción del escenario 2.....	157
Tabla 4.15. Valores de $IAS_{l,DQO}$ e $IASG_{DQO}$ para el escenario 2 y 3.....	157
Tabla 4.16. Localización de las unidades de producción en el escenario 4. ....	159
Tabla 4.17. Valores de $IAS_{l,DQO}$ e $IASG_{DQO}$ para el escenario 4 y el caso base. ....	160
Tabla 4.18. Configuración de las unidades de producción en el escenario 5.....	161
Tabla 4.19. Valores de IAS e IASG para el escenario 5. ....	162
Tabla 4.20. Configuración de las unidades de producción en el escenario 6.....	163
Tabla 4.21. Valores de $IAS_{l,DQO}$ e $IASG_{DQO}$ para el escenario 6.....	163
Tabla 5.1. Glosario de términos. ....	176
Tabla 5.2. Características sociales de los diferentes sitios. ....	181
Tabla 5.3. Empleos directos generados por las unidades de producción. ....	181
Tabla 5.4. Resultados escenario 1. ....	183
Tabla 5.5. Resultados del escenario 2. ....	184
Tabla 5.6. Resultados del modelo multiobjetivo. ....	188
Tabla 5.7. Variación de la TDA media en cada solución. ....	189
Tabla 5.8. Variación en la producción en el modelo multiobjetivo. ....	190
Tabla 5.9. Resultados para el caso con valores de $\lambda_1$ modificados.....	206
Tabla 5.10. Resultados para el caso con los valores de $\omega_1$ modificados. ....	207
Tabla 5.11. Empleos generados en los diferentes puntos de análisis. ....	209

Tabla 5.12. Producción en los diferentes puntos del análisis de <i>Iseg</i> .....	211
Tabla 6.1. Resultados caso base vs escenario 7.....	219
Tabla 6.2. Tamaño y distribución de las unidades de producción en el escenario 7....	221
Tabla 6.3. Tamaño y distribución de las unidades de producción en el caso base.....	221
Tabla 6.4. Valores de IAS e IS para el escenario 7. ....	222
Tabla 6.5. Costos y ventas del caso base y el escenario 7.....	222

## **IV. Resumen**

En esta tesis se aborda el diseño óptimo de la industria forestal desde un enfoque de Cadena de Suministro (CS). Éste consiste en determinar qué tipo y tamaño de plantas instalar, en qué sitio localizarlas, el flujo existente entre los diferentes elementos que componen el sistema, la cantidad de cada producto a elaborar, entre otros. En general, hasta ahora, el diseño se ha realizado con criterios económicos, por ejemplo, maximizando beneficios, sin incluir otros aspectos como aquellos vinculados al ambiente donde operan los diferentes elementos de la CS.

En este sentido, esta tesis tiene como principal objetivo incluir la perspectiva ambiental en el diseño de la CS forestal con el fin de mejorar la sustentabilidad del sistema. En una primera instancia, se hace especial énfasis en el uso de residuos y subproductos generados a lo largo de los diferentes procesos de este tipo de industria, con el objetivo de aprovechar material que, en parte, se desperdicia actualmente. En una segunda instancia, en respuesta a la necesidad de generar herramientas y enfoques que permitan considerar cuestiones vinculadas al entorno de los sitios donde operan las unidades productivas de la CS, se presenta una metodología, basada en la Evaluación de Impacto Ambiental. Ésta permite tener en cuenta aspectos del medio natural y social en el diseño de la CS forestal, lo cual, en esta tesis, se realiza a partir de considerar cuestiones vinculadas con la normativa y la creación e implementación de indicadores.

Por lo mencionado previamente, se trata, entonces, de un problema de toma de decisiones, donde además de considerar aspectos vinculados a los elementos de la CS, también se tienen en cuenta aquellos vinculados a su entorno. Esto se aborda mediante la programación matemática, la cual permite optimizar un sistema considerando diferentes criterios. En este sentido, si bien el enfoque económico es fácilmente tenido en cuenta en este abordaje, hay que realizar un esfuerzo significativo para incluir los aspectos del medio natural y social en un formato compatible con un modelo matemático, principalmente porque presentan un alto grado de subjetividad en su valoración y complejidad en su análisis.

## **V. Abstract**

In this thesis, the optimal design of the forestry industry is addressed from a Supply Chain (SC) approach. This consists of determining the type and size of plants to be installed, the place where locate them, the flow between the different SC nodes, the amount of each product to be processed, among others. In general, until now, the economical criteria has been considered for designing a SC, for example, maximizing benefits, without including other aspects such as those related to the environment where the different elements of the SC operate.

In this sense, the main objective of this thesis is to include the environmental perspective into the design of the forest SC, in order to improve the sustainability of the system. In the first instance, a special emphasis is placed on the use of waste and by-products generated throughout the different processes in this type of industry, with the aim of taking advantage of material that, in part, is currently discarded. In a second instance, in response to generate tools and approaches that allow considering issues related to the environment of the sites where the productive units of the SC operate, a methodology based on the Environmental Impact Assessment is presented. This allows taking into account aspects of the natural and social environment in the design of the forest SC, which, in this thesis, is made considering issues related to regulations and the creation and implementation of indicators.

Due to the aforementioned reasons, the situation presented is a problem of decision making, where besides considering aspects linked to the elements of the SC, those related to their environment are also taken into account. This is addressed through mathematical programming, which allows optimizing a system considering different criteria. In this sense, although the economic performance is easily taken into account in this approach, it is necessary to make a significant effort to include aspects of the natural and social environment in a format compatible with a mathematical model, mainly because they present a high level of subjectivity in its assessment and complexity in its analysis.

# 1 Introducción

*“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad.”*

*Albert Einstein*

## 1.1 Introducción

La industria forestal se define como el sector de la actividad industrial que aborda a la biomasa forestal desde la plantación de árboles hasta su transformación en productos y/o energía. Involucra diversos y diferentes procesos que van desde la siembra, poda y tala de las plantaciones hasta la elaboración de tableros, materiales para la construcción, madera para muebles, producción de papel, entre otros.

En Argentina, este sector industrial exhibe una gran ventaja competitiva frente a otros países, ya que presenta una mayor productividad de las especies de pino y eucaliptus, principalmente en la región Noreste del país, con respecto a naciones con una gran tradición forestal como Chile, EEUU, Suecia, Canadá, entre otras. En el caso del pino, la productividad en Argentina en suelos considerados “buenos” es de  $33 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  mientras que en el caso de eucaliptus, para suelos de iguales características, la productividad es de  $43 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . En ambos casos se trata de guarismos substancialmente mayores a los del resto de países de referencia. A su vez, según cálculos oficiales de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, el país cuenta con 20 millones de hectáreas aptas para forestación por lo que, aún cuando el sector haya registrado ya un gran crecimiento, todavía se encuentra muy lejos de encontrar su techo dado que en la actualidad sólo existen, aproximadamente, 1,3 millones de hectáreas implantadas.

A pesar de contar con tierras aptas y las mejores tasas de crecimiento para producir madera, según la mesa de competitividad foresto-industrial conformada por diversos representantes a nivel nacional, provincial y local vinculados a esta industria, hoy Argentina importa papel y celulosa por alrededor de 925 millones de dólares, y cuenta con un déficit para todo el sector foresto-industrial de 766 millones de dólares. Se calcula que para 2.025 este déficit podría llegar a los 2.500 millones de dólares, de no

existir cambios en la política y estrategia con que se desenvuelve esta industria (Diario La Nación, 2.017).

Un aspecto que es actualmente desaprovechado en Argentina, vinculado a esta industria, son los residuos y subproductos que se generan en la misma. La industria forestal tiene la característica de producir grandes volúmenes de estos materiales durante el proceso de explotación y elaboración de la madera. Esta biomasa forestal puede ser aprovechada como materia prima para la elaboración de algunos productos o como combustible para la generación de energía. En este sentido, es importante destacar que presenta opciones interesantes para la producción de biocombustibles de segunda generación.

Contar con un uso adecuado para estos residuos y subproductos es necesario con el fin de disminuir el consumo de combustibles fósiles y el impacto ambiental que ellos producen en el suelo, el aire, el agua, los ecosistemas y la población en general al quedar depositados en la superficie. Actualmente en Argentina gran parte de estos materiales son desaprovechados por no contar con una gestión integral y por la inexistencia de análisis de posibles alternativas para su destino.

Por otro lado, otra potencialidad que presenta el sector industrial en el país, es su alto impacto multiplicador del empleo donde, por cada puesto de trabajo que genera, indirectamente se producen 1,4 en el resto de la economía (Sharry, 2.013).

Por todo lo anterior, la industria forestal exhibe diversas y alentadoras oportunidades que incluyen aspectos ambientales, sociales y económicos. Esto no pasa sólo por la posibilidad que crezca la superficie forestada, sino por avanzar en un aprovechamiento más integral de todos los recursos forestales en la elaboración de otros materiales y en la generación de energía.

En este contexto, para mejorar la productividad de la cadena forestal, desde la ciencia y tecnología, se requiere hacer un examen detallado de los procesos productivos que forman parte de todos sus eslabones y segmentos de manera integral y coordinada (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2.013). Esto implica la integración de diferentes industrias, actores sociales y entornos naturales. En muchos casos, éstos compiten por los recursos y en otros aspectos se complementan, permitiendo el uso de la biomasa forestal en sus diversas variantes: residuos de poda y raleo, plantaciones, subproductos de la elaboración de madera, entre otros.

Para lograr un aprovechamiento integral de todos los elementos que componen la industria forestal es necesario implementar perspectivas que permitan incluir a todos ellos. El enfoque de Cadena de Suministros (CS) es una opción que admite considerar los diferentes aspectos mencionados previamente y hacer un análisis sistémico de esta industria, sus alternativas y perspectivas vinculadas a la situación económica y ambiental que afecta a la misma.

La CS puede ser definida como una red integral de unidades de producción y transporte para el abastecimiento, manufactura, almacenamiento y distribución de productos y materiales (Chopra y Meindl, 2.012; García y You, 2.015). Esta red involucra diferentes actores como ser: consumidores, productores de materia prima, transportistas, distribuidores, empresarios, diferentes industrias, entre otros. La misma incluye distintos niveles y actividades: abastecimiento, producción, almacenamiento y distribución. El primero de ellos involucra a los proveedores de materia prima o de bienes y servicios para la producción. En el segundo nivel se convierte la materia prima en productos terminados para luego almacenarlos y/o enviarlos a los consumidores, estos últimos representan el nivel de distribución.

Uno de los objetivos críticos en el diseño de una CS forestal es lograr la integración óptima de sus actores y operaciones, como una estrategia para obtener un buen desempeño de la industria en el mercado, mejorando el rendimiento y funcionamiento del sistema desde la perspectiva que se requiera estudiar.

El diseño de la CS consiste en determinar su estructura: el sitio donde instalar las unidades productivas, las diferentes conexiones entre los niveles que la componen, el tipo y cantidad de producto a producir, los lugares de dónde obtener la materia prima, entre otros. En este contexto, existen diferentes criterios desde los cuales puede ser abordado, implicando distintos tipos de beneficios para las empresas involucradas, para el entorno social y/o para el natural afectado por el sistema. La perspectiva a considerar en el diseño es crucial, dado que esto determina los efectos, tanto positivos como negativos, que se tienen en cuenta a la hora de tomar las decisiones. Está claro que, si se quiere lograr un diseño sustentable de la CS, es importante considerar tanto los intereses de la empresa como los del entorno natural y social que se ven afectados.

Actualmente, en los estudios vinculados a CS forestal, prevalece el punto de vista económico, considerando el beneficio de la empresa en el diseño del sistema (Chen y otros, 2014). Tener en cuenta esta perspectiva tiene ventajas. Por un lado, este objetivo se ajusta al interés de muchos de los que participan en la CS que, como resultado, ven incrementados sus ingresos y disminuidas sus pérdidas monetarias. Por otro lado, desde el punto de vista de los autores que realizan diferentes estudios, es una variable simple de cuantificar, ya que se circunscribe a contabilizar los ingresos y los costos con el fin de obtener la ganancia del sistema.

Sin embargo, las decisiones que se toman desde este punto de vista, no tienen en cuenta los efectos que se producen sobre la calidad de vida y el bienestar de los seres vivos que

se ven afectados por las actividades de las industrias. En este sentido, diversos autores afirman la necesidad de incluir otras perspectivas, además de la económica, en el diseño de la CS (Popovic y otros, 2.018; Hong y otros, 2.018), que permitan lograr un diseño sustentable de los sistemas productivos, con el fin de preservar el ambiente y sus componentes.

Para lograr un diseño sustentable se deben considerar las necesidades de los diferentes actores involucrados y afectados por el sistema bajo estudio, por lo tanto implica tener en cuenta a los inversores y empresarios, pero también a los gobiernos, a los habitantes de las localidades, al paisaje donde se instalan las fábricas, a los ríos, a la fauna y flora donde se desechan los efluentes, entre otros. En este contexto, pocos trabajos vinculados a la CS forestal han incluido estas consideraciones y, en la mayoría de los casos, son muy genéricos, pues no tienen en cuenta las características específicas del entorno que presentan diferencias sensibles (Searcy y otros, 2.016).

Tener en cuenta los componentes del ambiente, tanto del medio social como del natural, es fundamental para lograr un diseño sustentable de la CS. Por ejemplo, no es lo mismo instalar una unidad productiva en una zona de valor turístico que en una zona industrial; tampoco es igual generar empleos en un sitio con una población elevada que en una donde los habitantes son pocos y están desempleados.

De acuerdo a la problemática descrita previamente, en esta tesis interesa estudiar, desde un enfoque de CS, cómo afecta al diseño de la CS forestal el hecho de considerar las condiciones del entorno natural y social. Tener en cuenta estos aspectos lleva inevitablemente a los tomadores de decisiones a incluir subjetividad en el análisis, ya que el ambiente es un sistema complejo en el cual existen y coexisten diversos

elementos y variables, las cuáles no pueden ser estudiadas completamente si no es a través de la experiencia y percepción de los evaluadores.

Como se menciona anteriormente, para alcanzar un funcionamiento adecuado de la CS forestal es necesario tomar diversas decisiones: dónde y qué producir, qué recursos utilizar, a dónde destinar los residuos y subproductos y qué elaborar a partir de ellos, a qué sitios enviar los productos elaborados, entre otros. Todas estas decisiones impactan en diferente medida a la performance del conjunto, afectan al beneficio económico del sistema, al entorno social y al entorno natural. Por lo tanto la perspectiva que se considere en el diseño del sistema va a afectar a las otras, lo cual puede generar un conflicto de intereses entre los actores y elementos involucrados de manera directa o indirecta.

En este tipo de problemas, una herramienta adecuada que permite evaluar el resultado de las distintas decisiones considerando las diferentes perspectivas, son los modelos de programación matemática. En ellos confluyen las matemáticas y las ciencias de la computación, y su propósito es representar y evaluar de forma efectiva distintas opciones sobre la situación que se estudia, con objeto de permitir que los tomadores de decisiones exploren una amplia variedad de posibles alternativas, abordando diferentes perspectivas en el diseño del sistema. Mediante la optimización de una medida de performance, se alcanza un rendimiento y funcionamiento eficiente del mismo.

La optimización del diseño de la CS forestal presenta dificultades a la hora de trabajar con otras perspectivas que no sean la económica. Por un lado, hay que considerar simultáneamente diferentes criterios: económicos, del medio natural y social; lo cual implica un enfoque multiobjetivo para lograr un equilibrio entre estos aspectos, los cuales muchas veces son difíciles de conciliar. Por otro lado, traducir los criterios

vinculados al medio natural y social en expresiones generales que puedan incluirse en los programas matemáticos no es una tarea fácil, ya que, a diferencia del criterio económico, su cuantificación no es directa. En este sentido, los criterios económicos son fácilmente mensurables, pero los ambientales tienen otras variaciones. En primer lugar es necesario disponer o generar indicadores apropiados. En segundo lugar, en muchos casos hay que tener en cuenta aspectos subjetivos en la evaluación. Por ejemplo: el beneficio de la producción de una industria se puede determinar fácilmente por la diferencia entre las ganancias que se obtengan de la venta de los productos elaborados menos los costos de inversión, materia prima, operación, entre otros, que se ocasionen durante la producción. Ahora bien, esta producción va a tener sus efectos en la población cercana a ella, ya sea porque genera fuentes de trabajo o porque afecta su calidad de vida, y también va a tener incidencia sobre los cursos de agua, el suelo, el aire, los ecosistemas que la rodean, entre otros. Estas afectaciones no se traducen fácilmente a una medida cuantificable ya que implican diversos criterios en su análisis. Esta situación vuelve complejo el objetivo de incluir este tipo de connotaciones en un modelo matemático.

En función de lo mencionado previamente, el objetivo general de esta tesis es:

“Generar un enfoque para abordar el problema de la toma de decisiones para el diseño, a nivel estratégico, de la CS forestal considerando tanto aspectos económicos, como cuestiones vinculadas al entorno natural y social de los sitios donde operan las unidades productivas involucradas en el sistema bajo estudio.”

Los objetivos específicos incluyen lo siguiente:

- Desarrollar modelos de optimización matemática que permitan tomar decisiones sobre la configuración de la CS forestal, considerando diferentes alternativas en el uso de los troncos, residuos y subproductos generados en el sistema.
- Estudiar las emisiones de gases de efecto invernadero que genera la CS forestal bajo estudio y las implicancias que tiene considerar este indicador en el diseño de la misma.
- Generar una metodología que permita tener en cuenta las condiciones del entorno en el diseño de la CS, considerando la subjetividad en el análisis, y que sea posible de incluir en modelos de optimización matemática.
- Desarrollar indicadores vinculados al entorno social y natural del sitio donde operan las unidades productivas de la CS, que puedan ser utilizados como una herramienta en la toma de decisiones para la optimización de la misma.
- Aplicar los modelos desarrollados al caso de la industria forestal, y evaluar el impacto de considerar aspectos económicos, sociales y naturales en el diseño de la CS forestal.

## **1.2 Estructura de la tesis**

A lo largo del desarrollo de los diferentes capítulos de la presente tesis se introduce en detalle el estado del arte de cada tema y, luego, se presentan enfoques y herramientas para dar solución a los aspectos mencionados en esta introducción, vinculados con la integración de las perspectivas para el diseño de la CS forestal desde diferentes enfoques: económico, del entorno natural y social.

El primer problema que aborda la tesis (capítulo 2) consiste en el diseño de la CS forestal desde un punto de vista económico, haciendo hincapié en el destino de los

residuos y subproductos generados en la poda y cosecha de las plantaciones, y en la producción de madera, con el fin de evitar su desperdicio y tornar más eficiente la CS forestal. Entre las opciones para aprovechar los residuos, se analizan como alternativas la producción de combustibles y energía a partir de biomasa forestal. De esta forma se busca lograr una mayor sustentabilidad en el sistema considerando el uso y reúso de estos materiales, y disminuyendo el impacto ambiental que generan al no ser utilizados.

Como una primera aproximación de la tesis al aspecto ambiental, en el tercer capítulo se contabilizan las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de la CS forestal y se analiza de qué manera afecta al diseño del sistema. Se propone aplicar este indicador con el objetivo de incluir sustentabilidad en el sistema, dado que es de fácil y directa aplicación. En este punto, se estudia la optimización del diseño de la CS desde un punto de vista económico y ambiental, y se analizan las implicancias de considerar esta última perspectiva. Por otro lado se examinan las ventajas y desventajas de este instrumento como herramienta para introducir sustentabilidad en el diseño de la CS forestal.

Para solucionar el déficit existente en la consideración de las perspectivas ambiental y social en el diseño de la CS, en los capítulos 4, 5 y 6 se presentan distintos enfoques, herramientas y metodologías que permitan incluir estos aspectos, teniendo en cuenta tanto la normativa, el punto de vista subjetivo de quien realiza la evaluación y los elementos particulares del entorno donde se pretenden instalar las unidades de producción del sistema.

Por un lado se genera un enfoque que, a partir de la metodología de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) utilizada comúnmente en el campo de ingeniería ambiental, permita considerar los componentes del entorno en el diseño de la CS forestal y sea factible de aplicar en el marco de programas de optimización matemática. En este

enfoque se tiene en cuenta la normativa existente y la subjetividad del conocimiento empírico de los evaluadores (capítulo 4). Se aborda uno de los problemas principales que es disponer de indicadores apropiados para el medio natural y social y, luego, que éstos sean factibles de incorporar en un formato adecuado a un modelo matemático de optimización.

En particular, para el entorno natural se presentan dos indicadores (capítulo 4), uno para el componente agua superficial y otro para el componente paisaje. El primero de ellos busca preservar la calidad del agua a través de considerar diferentes medidas del grado de contaminación: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendedos Totales (SST), entre otras. Mientras que el segundo tiene como objetivo disminuir el impacto visual que genera la infraestructura de las unidades productivas, teniendo en cuenta el tipo de zona donde se instalan: rural, urbana, entre otras. Estos dos indicadores han sido elegidos porque permiten considerar simultáneamente aspectos legales y subjetivos y, también, estructurar y ponderar criterios de evaluación de distinto tipo. Sobre esta base, otro tipo de indicadores pueden ser agregados al enfoque propuesto.

Por otro lado, el indicador propuesto para el medio social (capítulo 5) considera cuestiones vinculadas a la dinámica de la población del sitio donde se decide instalar las unidades productivas, buscando beneficiar aquellas más pequeñas, con el fin de favorecer la descentralización de los núcleos urbanos, y favorecer a las poblaciones que presentan mayor desempleo.

El enfoque de EIA propuesto se implementa en los diferentes capítulos mediante modelos de programación matemática multiobjetivo.

Los contenidos desarrollados en esta tesis representan un aporte para incluir sustentabilidad en la toma de decisiones estratégicas de la CS y permiten alcanzar un diseño eficiente e integral de la industria forestal. Este trabajo, por lo tanto, da respuesta a la necesidad de generar enfoques y herramientas que consideren el entorno en el diseño de CS, con el fin de preservar el ambiente y sus componentes.

### **1.3 Publicaciones**

El contenido de esta tesis se ha difundido a través de trabajos presentados en congresos y reuniones científicas y otros presentados para su publicación en revistas del área:

- Campanella S., Montagna J.M., Corsano G., 2014. "Criterios ambientales integrales para el diseño óptimo de una cadena de suministros". III Reunión Interdisciplinaria de Tecnología y Procesos Químicos. Córdoba. Argentina.
- Campanella S., Montagna J.M., Corsano G., 2014. "Diseño óptimo de cadena de suministros considerando criterios ambientales". 43° Jornadas Argentinas de Informática JAIIO. CABA. Argentina.
- Campanella S., Corsano G., Montagna J.M., 2015. "Optimal design of forest supply chain considering efficient residues and byproducts reuse". VIII Congreso de Ingeniería Química. CABA. Argentina.
- Campanella S., Corsano G., Montagna J.M., 2015. "Sustainability in the forest supply chain considering the efficient use of residues and byproducts". IX Conferencia Científica Internacional de Medio Ambiente. Universidad Central de Las Villas. Cuba.
- Campanella S., Corsano G., Montagna, J.M., 2016. "Diseño sustentable de la cadena de suministro forestal considerando aspectos económicos y ambientales.

The Fifth International Symposium on Environmental Biotechnology and Engineering. Buenos Aires. Argentina.

- Campanella S., Corsano G., Montagna, J.M., 2018. "A modeling framework for the optimal forest supply chain design considering residues and byproducts reuse". *Sustainable Production and Consumption*, 16, 13-24.
- Meyer R., Campanella S., Corsano G., Montagna, J.M., 2018. "Optimal design of a forestry supply chain considering economic and social aspects". *Journal of Cleaner Production*. En revisión.

### Bibliografía

Chen L., Olhager J., Tang O., 2014. Manufacturing facility location and sustainability: A literature review and research agenda. *Int J Prod Econ*, 149, 154-63.

Chopra S., Meindl P., 2012. *Supply chain management: strategy, planning, and operation*. 5<sup>th</sup> edition Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson.

Diario La Nación, 2017. <https://www.lanacion.com.ar/2081008-industria-forestal-una-cadena-que-quiere-recuperar-el-tiempo-perdido>. Fecha de consulta: abril de 2018.

Fundación IREAL, 2011. *Una Argentina competitiva, productiva e industrial. Cadena foresto industrial*. Documento de trabajo, Edición N° 95.

García D., You F., 2015. Supply chain design and optimization: challenges and opportunities. *Computers and Chemical Engineering*, 81, 153-170.

Hong J., Zhang Y., Ding M., 2018. Sustainable supply chain management practices, supply chain dynamic capabilities, and enterprise performance. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3.508-3.519.

Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2013. *Argentina Innovadora 2020*. Plan Nacional de Ciencia y Tecnología.

Popovic T., Barbosa-Póvoa A., Kraslawski A., Carvalho A., 2018. Quantitative indicators for social sustainability assessment of supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 180, 748-768.

Searcy C., Dixon S.M., Patrick Neumann W., 2016. The use of work environment performance indicators in corporate social responsibility reporting. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2.907-21.

Sharry S., 2013. Producción y Procesamiento de Recursos Forestales. Documento de referencia para el plan estratégico Argentina 2.020.

## **2 Optimización de la CS forestal considerando el uso de residuos y subproductos.**

*“El sol, con todos esos planetas girando a su alrededor y dependiendo de él, aún puede hacer madurar un racimo de uvas, como si no tuviese nada que hacer en el universo.”*

*Galileo Galilei*

## 2.1 Introducción

La industria forestal se caracteriza por involucrar diversos actores que se relacionan entre sí, con el fin de obtener diferentes productos. Estas relaciones implican diferentes etapas de producción, procesos y productos, cubriendo una variedad de aspectos como cosecha, transporte, generación de energía, madera, papel, producción de tableros, entre otros, los cuáles deben ser diseñados e integrados de manera eficiente.

Una forma de diseñar y analizar este tipo de industria es desde la perspectiva de la Cadena de Suministros (CS), debido a que, de esta manera, se puede contemplar de manera integral y eficiente la gran cantidad de elementos y actores involucrados.

La industria forestal desempeña un papel importante en el desarrollo social y económico de muchos países. En particular, esta CS tiene oportunidades interesantes para la producción de biocombustibles de segunda generación, para la integración de procesos, en el aprovechamiento de subproductos y residuos como materia prima para diferentes productos finales, y en la posibilidad de conexiones e intercambios entre los actores involucrados. En este contexto, el sector forestal mundial se está volviendo más complejo, interconectado e intersectorial (Hurmekosky y Hetemäki, 2.013). Todos estos elementos justifican un análisis detallado de las alternativas disponibles, los compromisos involucrados y los resultados esperados (Heinimö et al., 2.011).

Un aspecto que caracteriza a la industria forestal es la gran cantidad de residuos y subproductos generados en la transformación mecánica de la madera, desde la recolección hasta la obtención de los productos finales. Estos residuos no han recibido mucha atención hasta ahora, a pesar de tener aplicaciones interesantes. Varias razones, como volúmenes involucrados, instalaciones requeridas, distancias y costos logísticos, han afectado su empleo eficiente. Por otro lado, estos materiales pueden usarse para la

producción de biocombustibles, con la ventaja que no compiten con los alimentos, como lo hacen otras materias primas, como el maíz y la soja.

Es importante aclarar la diferencia entre los residuos y los subproductos en el contexto de esta tesis. El primero hace referencia al material que se produce inevitablemente en la zona de plantaciones como resultado de la poda y la tala, y, actualmente, no posee valor económico. Los subproductos, en cambio, si bien tampoco se puede impedir su generación, tienen un valor económico y son producidos a partir de la transformación mecánica de los troncos en madera. Estos materiales son un tema clave en este tipo de industria debido a que la cantidad y variedad generadas constituyen un gran porcentaje de la materia prima. Afortunadamente, pueden ser útiles como insumo para otros productos.

Como se menciona previamente, los residuos forestales y los subproductos pueden utilizarse como materia prima para la producción de biocombustibles de segunda generación. Los biocombustibles derivan de recursos biológicos renovables, como plantas y materia animal. Pueden ser sólidos (como pellets o residuos y subproductos utilizados como combustibles, sin transformación alguna) o líquidos (como el etanol). Diferentes artículos han analizado propuestas para la producción de biocombustibles utilizando recursos forestales. Por ejemplo, Pirraglia y otros (2.013) desarrollan un modelo técnico-económico para la producción de pellets de madera, considerando parámetros críticos de producción y evaluando la sensibilidad a los cambios en algunos aspectos claves, como el costo de capital, los costos de entrega de biomasa, el trabajo y el consumo de energía de una instalación. Uasuf y Becker (2.011) proponen diversos escenarios para estudiar los costos de producción de pellets y consumo de energía utilizando subproductos de aserraderos en el nordeste argentino. Petterson y otros (2.015) proponen un modelo de optimización geográfica para determinar la ubicación de

las diferentes unidades de producción de biocombustibles a partir de biomasa forestal en Suecia.

Aunque actualmente los combustibles líquidos convencionales dominan el mercado, se espera que la penetración de los biocombustibles líquidos de segunda generación tenga lugar en el año 2.020 en circunstancias favorables, no sólo por razones económicas y de disponibilidad, sino también por las condiciones ambientales que implican (Demirbas y otros, 2.011). Varios trabajos han examinado la producción de biocombustibles líquidos utilizando recursos forestales. Whalley y otros (2.017) presentan un modelo de CS de biomasa para estimar los costos de entrega, recolección y astillado de los residuos de la explotación maderera, y el transporte de los chips de biomasa a una biorrefinería para la producción de biocombustibles líquidos. Sarkar y otros (2.011) desarrollan un modelo técnico-económico detallado basado en tecnologías probadas actualmente disponibles para producir gas de síntesis de alta calidad a partir de la biomasa forestal. Mirkouei y otros (2.016) analizan el uso de refinerías móviles en combinación con refinerías no móviles, a gran escala, para facilitar la producción de biocombustibles cerca de la fuente de generación de residuos forestales.

El diseño de las CS forestales es crucial para integrar diferentes actores y actividades. Este enfoque implica un arduo trabajo, teniendo en cuenta la variedad de usos posibles de muchos materiales y las diversas industrias involucradas, con sus diferentes compromisos. La configuración de la CS presenta un marco de análisis para diseñar y planificar operaciones óptimas, y la programación matemática es una herramienta útil para lograr estos objetivos. El uso de modelos matemáticos permite a los tomadores de decisiones tener una perspectiva integrada sobre los diseños sostenibles de la CS (Mishra y otros 2.017).

D'Amours y otros (2.009) presentan una revisión bibliográfica sobre los principales problemas de planificación en la industria forestal y destacan que se ha realizado muy poco para vincular la CS forestal (por ejemplo, gestión de tierras, siembra, cosecha, entre otros) con CS industriales (pulpa y papel, madera aserrada y madera de remanufactura, energía, entre otras). Afirman que la integración de varias CS sigue siendo un desafío importante para la industria y que se deben desarrollar nuevos modelos para apoyar esta integración. En esta dirección, Rönnqvist y otros (2.015) abordan diversos problemas abiertos en la industria forestal. En particular, para la planificación de la CS, establecen que, aunque se pueden establecer planes para los diferentes componentes de la misma, se debe realizar el esfuerzo principal para coordinarlos entre todas las unidades involucradas. Por ejemplo, Carlsson y otros (2.009) revisan los modelos de planificación de la CS en la industria de la celulosa y el papel. En este caso, la CS considera diferentes actividades, con largos plazos de entrega (desde la siembra de las semillas de los árboles que se utilizan para producir la celulosa, hasta que el consumidor final utiliza el producto), involucrando varios pasos operados por diversas compañías y organizaciones.

Por otro lado, se han propuesto algunos enfoques para la optimización de la CS forestal incluyendo el uso de residuos forestales y la producción de biocombustibles a partir de ellos. Mobini y otros (2.013) presentan un modelo para la CS de producción de pellets, analizando diferentes materias primas para su elaboración. Los autores se focalizan en este producto específico de la industria forestal. Kong y otros (2.012) analizan un mercado integrado donde se toman en cuenta todas las materias primas, incluidos los residuos y subproductos de los aserraderos, y el destino posible de cada uno de ellos considerando aserraderos, plantas de producción de papel y hornos incineradores. Cambero y otros (2.015) presentan un modelo matemático para la producción de calor,

electricidad, pellets y biocombustible por pirólisis, a partir de residuos de cosecha forestal disponibles y subproductos de aserraderos, el cual es aplicado a un caso de estudio en Canadá. Troncoso y Garrido (2.005) formulan un modelo de programación matemática mixto entero lineal (MILP) para resolver la ubicación de las unidades de producción y la distribución de la carga para la producción forestal. Dansereau y otros (2.014) proponen un modelo de optimización con el fin de brindar un marco de análisis para la instalación e implementación de biorrefinerías a base de biomasa forestal. Según los autores, esta herramienta puede ayudar a los responsables de la toma de decisiones a identificar diferentes políticas de CS para una variedad de condiciones de mercado. Troncoso y otros (2.015) se ocupan del problema de planificación de CS, que incluye diferentes horizontes de tiempo y enfatizan la integración entre las unidades de producción.

De lo anterior se observa que existen antecedentes de otros autores que han trabajado sobre la CS forestal, enfatizando la necesidad de considerar a diversos actores involucrados y las diferentes alternativas para el uso de residuos y subproductos. Los artículos anteriores integran algunas unidades de producción y, en ocasiones, se considera el uso de residuos y/o subproductos. Sin embargo, en relación a la bibliografía analizada, hay pocos trabajos publicados que distingan entre residuos y subproductos de la industria forestal y muy pocos analizan el diseño integrado, incluyendo la producción de productos tradicionales y biocombustibles, en el contexto de la optimización de la CS forestal. Muchos trabajos se centran en una cantidad reducida de plantas de producción y pierden de vista la fuerte integración entre ellas, lo cual es importante en muchos casos, pero fundamental en el caso de la industria forestal.

Con el fin de dar una respuesta a esta situación, en este capítulo se presenta un modelo matemático para el diseño óptimo de la CS forestal. Este modelo considera diferentes

tipos de unidades productivas: aserraderos, plantas de tableros, pellets y etanol, sin ninguna condición especial que impida la inclusión de otro tipo de producción. Existe la posibilidad de que éstas se agrupen en un mismo sitio con el fin de integrar su funcionamiento. Estos posibles sitios integrados se introducen con el fin de reducir las distancias entre las diferentes unidades de producción y las plantaciones de materia prima, lo que favorece el uso de residuos y subproductos entre las unidades.

Los diferentes procesos productivos de la industria forestal están fuertemente relacionados ya que las materias primas tienen diversos usos. Desde su procesamiento, se obtienen una variedad de residuos y subproductos que, al mismo tiempo, se pueden usar para fabricar diferentes productos. La proximidad entre las instalaciones alienta estos enfoques de integración, fuertemente relacionados, por ejemplo, con los costos de transporte.

Por otro lado, el enfoque utilizado en el modelo matemático considera en detalle el procesamiento de residuos y subproductos. Muchas veces, estos elementos se descartan, priorizando los principales componentes del sistema de producción. Pero en este enfoque, todos los recursos se integran para mejorar el aprovechamiento de la materia prima y generar una producción sostenible. La cantidad producida de los diferentes productos, la materia prima utilizada para la elaboración de cada uno de estos, la generación de energía, el destino de residuos y subproductos, la localización de las diferentes unidades de producción, entre otros, son algunas de las alternativas que permite evaluar el modelo propuesto. De esta forma, se puede utilizar como una herramienta para analizar y diseñar la CS forestal desde una perspectiva estratégica donde un elemento clave es la utilización adecuada de residuos y subproductos, que abundan en estas industrias.

Este enfoque es aplicado a una CS basada en parámetros técnicos y geográficos de Argentina, pero fácilmente se puede adaptar a otras ubicaciones geográficas.

## **2.2 Descripción del problema**

El objetivo de esta sección es describir el contexto del problema, que luego será considerado en el modelo matemático en la sección siguiente.

En la actualidad en Argentina hay 1,2 millones de hectáreas de bosques cultivados (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, MINCyT, 2.013), pero existen muchas posibilidades y potencialidades que permitirían aumentar esta cantidad: suelos adecuados, altas tasas de crecimiento de las plantaciones, bajos costos de producción, entre otros, que tornan a la industria forestal atractiva y prometedora. Según el MINCyT, más del 70% de la biomasa forestal cultivada no tiene uso, y la mayoría de los subproductos del aserradero y los residuos de las plantaciones se queman, deteriorando la calidad del suelo, emitiendo gases a la atmósfera y desaprovechando una rentabilidad económica producto de su reutilización o venta. Por lo tanto, estudiar los diferentes usos de la biomasa forestal y el empleo de residuos y subproductos para agregar valor a la CS forestal representa un desafío para los sectores académicos e industriales.

La CS forestal considerada en el modelo matemático, consta de tres niveles: áreas de plantaciones, unidades de producción y regiones de consumo. Las áreas de plantaciones son los sitios que proporcionan la materia prima fundamental para el funcionamiento de este tipo de industria. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2.006), de los árboles talados en estas áreas, un 38% permanece en el bosque como residuos de poda y tala (ramas, tocones, serrín y follaje).

De este total se supone que un porcentaje debe permanecer en los bosques para preservar la estructura y la calidad del suelo (se asume un 40%, mientras que el 60% restante se puede utilizar para diferentes destinos).

En esta tesis se consideran cuatro tipos de instalaciones de producción: aserraderos, plantas de tableros, pellets y etanol, aunque no existe impedimento para incorporar otras. Existen diversos flujos entre los diferentes niveles considerados de la CS: diferentes tipos de productos, y residuos y subproductos utilizados como materia prima para otros productos o como combustible para producir la energía térmica necesaria para algunos procesos. Los troncos para la producción de aserraderos y los requeridos como materia prima para las plantas de tableros se obtienen de las plantaciones, mientras que los residuos de estas áreas se pueden usar para la producción de etanol y pellets. La adquisición de los troncos tiene un costo, al igual que el transporte desde las plantaciones hasta las plantas de producción.

Los aserraderos generan diferentes subproductos a lo largo del proceso de obtención de madera, representando el 55% de los troncos procesados. De los troncos que llegan a los aserraderos, el 8% se convierte en corteza, el 18,5% en chips, el 13% en chips leña, el 12% en aserrín y el 3,5% se pierden en el proceso. Estos subproductos pueden utilizarse como materia prima para la producción de tableros, pellets y etanol, o como combustible para la caldera en el mismo aserradero. Otra posibilidad es venderlos a terceros.

Dos tipos de maderas se producen en los aserraderos: uno de mejor calidad, con un requerimiento específico del contenido de humedad, que se utiliza para la construcción y la producción de muebles, y el otro, sin requerimientos de humedad que, generalmente, se seca a la intemperie, destinado, por ejemplo, para la producción de

pallets. Los tableros de madera, se producen mediante la aglomeración de partículas lignocelulósicas, mientras que la producción de etanol se realiza a través de la fermentación previa hidrólisis. Estos productos se envían a regiones de consumidores, las mismas cuentan con demandas máximas específicas.

Para la producción de madera y etanol se requiere energía térmica, la cual se puede generar a partir de la combustión de pellets en calderas. En el caso de los aserraderos, las posibles fuentes de combustible son los pellets y los subproductos. Para las instalaciones de etanol, las fuentes potenciales de energía son pellets y combustibles líquidos adquiridos de proveedores externos. En ambos casos, los pellets y subproductos no tienen costo de adquisición, dado que se asume que las diferentes unidades productivas consideradas en la CS pertenecen a un mismo grupo de inversores. Si la adquisición de estos materiales representara algún costo económico fácilmente podría ser introducido en el modelo matemático.

Las industrias involucradas en la CS forestal pueden intercambiar materiales y combustibles, reduciendo la generación de desperdicios y tornando más eficiente el funcionamiento de la red. Obviamente, la distancia entre los diferentes actores de la CS es un factor clave para definir su localización y alentar su integración. En este sentido se contemplan varias alternativas de ubicación de las plantas: áreas cercanas a las plantaciones, próximas a las regiones de consumidores y puntos intermedios. Las unidades de producción se pueden localizar en sitios diferentes o en el mismo lugar conformando un “cluster”, alternativa que influye en el resultado económico de la CS. Las unidades cerca de las plantaciones reducen los costos de transporte de los troncos utilizados como materia prima, lo cual favorece la instalación de plantas de menor tamaño pero afecta la escala de producción. Si las industrias están ubicadas cerca de las áreas de consumo, el costo de transporte de la materia prima aumenta, la escala de

producción se ve afectada en función de las demandas específicas de cada área, pero la entrega de productos es más eficiente. Los clústeres intermedios, donde las producciones de varias plantas están integradas, pueden aumentar el rendimiento, aprovechando la escala de producción, pero los costos de transporte se ven muy afectados en función de las distancias desde las plantaciones y hasta las áreas de consumo. Además, la ubicación de los aserraderos es una variable de decisión que afecta fuertemente el diseño general de la CS, ya que generan éstos subproductos utilizados como materia prima para otros productos y como fuente de energía. Pero, por otro lado, el consumo de troncos disminuye la disponibilidad de materia prima para la producción de tableros, siendo éste un producto con un alto valor agregado. La Figura 2.1 muestra las posibles relaciones entre los elementos de la CS, mientras que en la Tabla 2.1 los mismos son resumidos para una mejor comprensión.

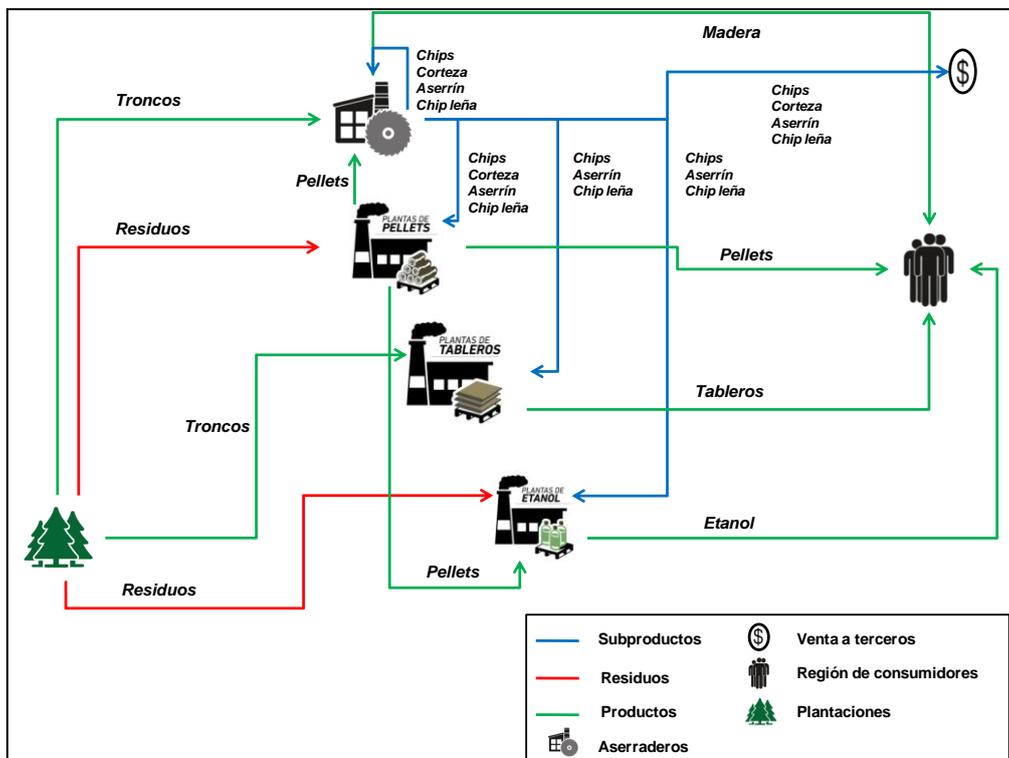


Figura 2.1. Relaciones consideradas entre los diferentes nodos de la CS forestal.

Unidad productiva	Tipo de materia prima	Fuente de materia prima	Combustible	Producto	Subproducto
<i>Aserradero</i>	Troncos	Plantaciones	Subproductos, pellets	Madera	Chips, chip leña, corteza, aserrín.
<i>Planta de tableros</i>	Troncos, chips, chip leña, aserrín.	Plantaciones, aserraderos.	-	Tableros de partículas	-
<i>Planta de pellets</i>	Residuos de cosecha, chips, chip leña, corteza, aserrín.	Plantaciones, aserraderos.	-	Pellets	-
<i>Planta de etanol</i>	Residuos de cosecha, chips, chip leña, aserrín.	Plantaciones, aserraderos.	Pellets, combustibles líquidos.	Etanol	-

Tabla 2.1. Relaciones entre unidades productivas, materia prima y combustible.

### 2.3 Modelo matemático

En esta sección se presenta el modelo matemático para el diseño de la CS forestal considerada. Siendo  $r$  el tipo de materia prima ( $r_1$ =tronco de diámetro 1,  $r_2$ =tronco de diámetro 2),  $l$  los diferentes sitios de plantaciones, producción y clientes (en la sección siguiente se especifica cada uno de ellos),  $p$  los productos finales de las diferentes unidades de producción ( $p_1$ =madera del tipo 1,  $p_2$ =madera del tipo 2,  $p_3$ = tableros,  $p_4$ =pellets,  $p_5$ =etanol),  $q$  los subproductos ( $q_1$ =chip,  $q_2$ =chip leña,  $q_3$ =corteza,  $q_4$ =aserrín) y  $f$  los diferentes tipos de unidades de producción ( $f_1$ =aserraderos,  $f_2$ =tableros,  $f_3$ =pellets,  $f_4$ =etanol), a continuación se describen las diferentes restricciones del modelo, correspondientes a balances de masa, producción, y transporte, entre otras. Es importante aclarar que los elementos presentados anteriormente son

específicos de esta tesis, pero el modelo se puede generalizar y escalar para considerar otro tipo de plantas, productos, ubicaciones, etc. Los símbolos utilizados para los sets, parámetros y variables son descriptos en la sección de Nomenclatura.

### 2.3.1 Obtención de materia prima

La Ec. (2.1) establece que los troncos del tipo  $r$  obtenidos de un determinado sitio  $l$  destinados a una unidad de producción  $f$  ubicada en  $l'$  para elaborar el producto  $p$  ( $Qh_{l'l'rfp}$ ) no puede exceder la capacidad máxima de abastecimiento de ese sitio  $l$  y del tipo de materia prima  $r$  ( $Maxrm_{lr}$ ). En esta tesis  $l$  y  $l'$  representan el mismo conjunto de sitios, y al incluir ambos se representa el flujo de materiales entre dos puntos. Se asume que la materia prima proviene de la misma especie de árbol que predomina en la región de estudio, variando únicamente su diámetro. Por lo tanto  $r$  corresponde a los diferentes tamaños de diámetros considerados.

$$\sum_{\substack{l',fp \\ f \in C(f) \\ (p,f) \in V(p,f)}} Qh_{l'l'rfp} \leq Maxrm_{lr} \quad \forall l,r \quad (2.1)$$

$C(f)$  es el conjunto de las plantas  $f$  que pueden utilizar troncos como materia prima, en este caso los aserraderos y las plantas de tableros.  $V(p,f)$  define los productos  $p$  producidos en las unidades de producción del tipo  $f$ .  $V(p,f)$  considera que la madera del tipo  $p_1$  y  $p_2$  son producidas en aserraderos  $f_1$ , y los tableros  $p_3$ , pellets  $p_4$  y etanol  $p_5$  son elaborados en las plantas  $f_2, f_3$  y  $f_4$ , respectivamente.

Los residuos que son generados en los sitios de materia prima son proporcionales, de acuerdo a un factor  $fres$ , a la cantidad de troncos consumidos. La cantidad total de

residuos de poda enviados desde la plantación  $l$  a las plantas  $f$  de etanol y de pellets,  $Qres_{ll'fp}$ , no pueden exceder la cantidad disponible.

$$\sum_{\substack{l'fp \\ f \in C(f) \\ (p,f) \in V(p,f)}} Qh_{ll'fp} fres \geq \sum_{\substack{l'fp \\ f \in D(f) \\ (p,f) \in V(p,f)}} Qres_{ll'fp} \quad \forall l \quad (2.2)$$

donde  $D(f)$  representa las plantas  $f$  que pueden utilizar residuos como materia prima (como se mencionó anteriormente, en este caso las plantas de pellets y etanol).

### 2.3.2 Unidades de producción

El modelo determinará, en caso de ser conveniente, qué tipo y dimensión de planta se instalará en cada posible ubicación  $l$ . En la formulación de este problema se asume que los tamaños de las plantas son discretos. Existen, por lo tanto, para cada unidad de producción  $f$ , diferentes tamaños  $t$  los cuáles pueden ser seleccionados de un conjunto de capacidades disponibles  $T_f$ . Por lo tanto las capacidades para los aserraderos, plantas de etanol, pellets y tableros son determinados usando tamaños discretos, los cuales están relacionados con la dimensión del equipamiento principal en cada planta. Los datos relativos a cada planta (costo, productividad, etc.) tienen en cuenta la economía de escala de las mismas.

Los troncos, los subproductos y los residuos pueden ser utilizados como materia prima. En cada caso se dispone de un factor de conversión adecuado que representa la productividad del proceso. En el caso de los troncos de dimensión  $r$ , son convertidos a productos finales  $p$  mediante un factor de conversión  $conv_{pr}$ . Los subproductos  $q$  provenientes de los aserraderos pueden ser utilizados como materia prima para la

elaboración de productos  $p$  (tableros, pellets y/o etanol) mediante el factor de conversión  $ybypp_{qp}$ . Los residuos se pueden utilizar como materia prima para la elaboración de productos  $p$  (pellets y/o etanol) de acuerdo a un factor de conversión  $yres_p$ .

Entonces, la producción total de cada producto  $p$  en cada unidad de producción  $f$  de dimensión  $t$  en la ubicación  $l$  ( $Prod_{l'lf}$ ) depende de la materia prima destinada a la misma: troncos ( $Qh_{l'l'rf}$ ), residuos ( $Qres_{l'l'rf}$ ) y/o subproductos ( $Byprm_{l'l'qf}$ ) que llega a la planta  $f$  en el sitio  $l$  desde el sitio  $l'$ , cuando corresponde, multiplicado por sus respectivos factores de conversión (Ec 2.3).

$$\sum_{t \in T_f} Prod_{l'lf} = \sum_{\substack{l'r \\ f \in C(f)}} conv_{pr} Qh_{l'l'rf} + \sum_{\substack{l'q \\ (q,p) \in R(q,p)}} ybypp_{qp} Byprm_{l'l'qf} + \sum_{\substack{l' \\ f \in D(f)}} yres_p Qres_{l'l'rf} \quad \forall l, (p, f) \in V(p, f) \quad (2.3)$$

Donde  $R(q,p)$  establece los subproductos  $q$  que pueden ser utilizados por cada producto  $p$  como materia prima. En esta tesis,  $R(q,p)$  considera que ambos tipos de chips,  $q_1$  y  $q_2$ , y el aserrín  $q_4$  son posibles materias primas para los productos  $p_3$ ,  $p_4$  y  $p_5$ , mientras que la corteza  $q_3$  sólo puede ser utilizada para el producto  $p_4$ .

La variable binaria  $w_{l'f}$  se define con el objetivo de seleccionar la capacidad  $t$  de la unidad de producción  $f$  que se encuentra localizada en  $l$ :

$$w_{l'f} = \begin{cases} 1 & \text{si la planta } f \text{ con capacidad } t \text{ es instalada en el sitio } l \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Si la planta  $f$  con tamaño  $t$  es instalada, entonces la producción no puede exceder una capacidad máxima determinada,  $Plmax_{lf}$ :

$$\sum_{(p,f) \in \overset{p}{V}(p,f)} Prod_{lfp} \leq Plmax_{jf} w_{lfp} \quad \forall l, f, t \in T_f \quad (2.4)$$

A lo sumo un tamaño  $t$  puede ser seleccionado para cada tipo de unidad de producción  $f$  en el sitio  $l$ :

$$\sum_{t \in T_f} w_{lfp} \leq 1 \quad \forall l, f \quad (2.5)$$

### 2.3.3 Subproductos

La cantidad total de troncos utilizados para la producción de madera es multiplicada por un factor de conversión ( $convbyp_q$ ) para obtener la cantidad de subproductos  $q$  generada en el sitio  $l$  ( $Byp_{lq}$ ). La Ec. (2.6) define la cantidad generada de cada tipo de subproducto.

$$Byp_{lq} = convbyp_q \sum_{l'r} Qh_{l'rf_1} \quad \forall l, q \quad (2.6)$$

La cantidad total de los diferentes subproductos se puede utilizar como materia prima, como se mencionó anteriormente ( $Byprm_{ll'qfp}$ ), como combustible para las calderas de biomasa en el sitio  $l$  ( $Byp_{boil_{lq}}$ ) y/o vendido a terceros en el aserradero ubicado en el sitio  $l$  ( $Byp_{sle_{lq}}$ ). De acuerdo con la Ec. (2.7), estas cantidades no pueden exceder la producción de  $q$  en el aserradero del sitio  $l$ :

$$Byp_{lq} \geq \sum_{\substack{l'fp \\ (p,f) \in V(p,f) \\ (q,p) \in R(q,p)}} Byprm_{ll'qfp} + Bypboil_{lq} + Bypsle_{lq} \quad \forall l, q \quad (2.7)$$

### 2.3.4 Requerimientos de energía térmica

En este capítulo se considera la generación de energía para la producción de maderas y etanol de manera simplificada; en el capítulo siguiente se realiza un análisis con mayor detalle de las alternativas disponibles.

La diferencia entre los dos tipos de madera ( $p_1, p_2$ ) considerados en el modelo reside en que  $p_1$  requiere secado por energía térmica y cepillado, mientras que  $p_2$ , al ser de una menor calidad, puede ser secada a la intemperie. Se asume, en este modelo, que una proporción  $fl$  de madera del tipo  $p_2$  se seca a través del calor generado en las calderas tomando ventaja de las condiciones técnicas de los aserraderos. La energía térmica en los aserraderos del sitio  $l$  se obtiene en las calderas alimentadas con los subproductos  $q$  generados en dicho sitio: chips, chip leña, corteza y aserrín ( $Bypboil_{lq}$ ), y los pellets enviados desde los sitios  $l'$  ( $pellboil_{l'l}$ ). Por lo tanto, la cantidad de los diferentes combustibles  $q$  y pellets, multiplicados por sus respectivas capacidades caloríficas  $cc_q$  y  $ccp$ , deben satisfacer el total de energía requerida para secar la madera:

$$ed \sum_{\substack{l \\ l \in I_f}} \left( Prod_{lf_1p_1} + Prod_{lf_1p_2} fl \right) \leq \sum_q cc_q Bypboil_{lq} + ccp \sum_{l'} pellboil_{l'l} \quad \forall l \quad (2.8)$$

donde  $ed$  es un parámetro que representa la cantidad de energía necesaria por unidad de madera secada.

La energía requerida en cada planta de etanol es proporcional a la producción, y se genera a partir de dos posibles fuentes: pellets enviados desde los distintos sitios  $l'$  ( $Qpe_{l'}$ ) o combustibles líquidos adquiridos en el sitio  $l$  ( $lf_i$ ) con capacidad calorífica  $ccf$ :

$$ef \sum_{\substack{t \\ t \in T_f}} P_{lf_4, p_5} = ccp \sum_{l'} Qpe_{l'} + lf_i ccf \quad \forall l \quad (2.9)$$

donde  $ef$  es un parámetro que representa la energía necesaria por unidad de volumen de etanol.

### 2.3.5 Demandas

En cada uno de los sitios  $l$  donde se encuentran los clientes, existe una demanda máxima  $Dlmax_{lp}$  de cada producto  $p$ . La Ec. (2.10) determina que para cada producto  $p$ , las cantidades que provienen de las distintas unidades de producción  $f$  en  $l'$  dirigidas a los sitios  $l$  donde se encuentran los clientes ( $Qp_{l'lpf}$ ), no puede exceder la demanda máxima existente:

$$\sum_{\substack{lf \\ (p,f) \in V(p,f)}} Qp_{l'lpf} \leq Dlmax_{lp} \quad \forall l, p \quad (2.10)$$

De la misma manera, la cantidad del producto  $p$  enviado a los sitios de clientes no puede ser mayor a lo producido por las unidades de producción:

$$\sum_{\substack{t \\ t \in T_f}} Prod_{lfp} \geq \sum_{l'} Qp_{l'lpf} \quad \forall l, (p, f) \in V(p, f) \quad (2.11)$$

En este punto es necesario aclarar que la Ec. (2.11) no se aplica para el caso de los pellets. Esto se debe a que este producto, a diferencia de los otros, tiene dos posibles destinos: puede ser enviado a los clientes o utilizado como combustible en las calderas de biomasa. Por ello se agrega la Ec. (2.12) que establece que la cantidad producida de pellets en las plantas ( $Prod_{lf_3p_4}$ ) debe ser mayor o igual a la cantidad de pellets que se destinan a los clientes ( $Qp_{ll'f_3p_4}$ ) y a las calderas ( $Qpe_{ll'}$ ,  $pellboil_{ll'}$ ).

$$\sum_{t \in T_f} Prod_{lf_3p_4} \geq \sum_{l'} Qpe_{ll'} + \sum_{l'} pellboil_{ll'} + \sum_{t \in T_f} Qp_{ll'p_4f_3} \quad \forall l \quad (2.12)$$

### 2.3.6 Función objetivo

La función objetivo consiste en maximizar el beneficio económico anual ( $Bf$ ), el cual se obtiene de la siguiente manera:

$$Bf = I - MPc - Tc - Ic - Ec - Pc \quad (2.13)$$

Donde el primer término corresponde a los ingresos y los restantes a los diferentes costos. A continuación se detalla cada uno de ellos.

#### 2.3.6.1 Ventas

Los ingresos,  $I$ , incluyen las ventas de productos y subproductos. Como se presenta en la Ec. (2.14), se calculan multiplicando por su precio de venta:  $Sle_p$  para el producto  $p$  y  $Bypprice_q$  para el subproducto  $q$ .

$$I = \sum_{\substack{l, pf \\ (p,f) \in \bar{V}(p,f)}} Qp_{l, pf} Sle_p + \sum_{lq} Bypsle_{lq} Bypprice_q \quad (2.14)$$

### 2.3.6.2 Costos

Los costos de materia prima ( $MPc$ ) corresponden a los troncos adquiridos para la fabricación de los diferentes productos, de acuerdo al costo de la materia prima  $r$  en el sitio  $l$  ( $Crm_{rl}$ ):

$$MPc = \sum_{\substack{l, rfp \\ (p,f) \in \bar{V}(p,f) \\ f \in C(f)}} Crm_{rl} Qh_{l, rfp} \quad (2.15)$$

Las otras materias primas, los subproductos y residuos, se considera que no tiene costo.

El costo de transporte ( $Tc$ ) incluye el transporte de los troncos a las unidades de producción ( $Qh_{l, rfp}$ ), así como los productos enviados hacia los clientes ( $Ql_{l, pf}$ ), subproductos ( $Byprm_{l, qfp}$ ) y residuos ( $Qres_{l, f}$ ) que se transportan entre los diferentes nodos de la CS, además del envío de los pellets para la generación de energía ( $pellboil_{l1}$ ). Estas cantidades son multiplicadas por la distancia recorrida ( $dl_{l1}$ ) y el costo de transporte ( $Ctres$ ,  $Ctrm$  y  $Ctp_p$ : costo de transporte de residuos, materia prima y productos, respectivamente) que depende del material que se transporta.

$$\begin{aligned}
Tc = & Ctrm \sum_{\substack{l'rfp \\ (p,f) \in V(p,f) \\ f \in C(f)}} Qh_{l'rfp} dl_{l'} + Ctres \sum_{\substack{l' \\ f \in D(f)}} Qres_{l',f} dl_{l'} + \\
& Ctres \sum_{\substack{l'qfp \\ (p,f) \in V(p,f) \\ (q,p) \in R(q,p)}} Byprm_{l'qfp} dl_{l'} + \sum_{\substack{l'lpf \\ (p,f) \in V(p,f)}} Ctp_p Qp_{l'lpf} dl_{l'} + \\
& Ctp_{p_4} \sum_{l'} (Qpe_{l'} + pellboil_{l'}) dl_{l'}
\end{aligned} \tag{2.16}$$

El costo de instalación ( $Ic$ ) depende de la capacidad de las unidades productivas y tiene en cuenta los gastos realizados para montar las plantas de tipo  $f$  y dimensión  $t$  en el sitio  $l$ . Está dado por la Ec. (2.17):

$$Ic = \sum_{\substack{l'f \\ t \in T_f}} CCF_{ft} \alpha_f (Plmax_{ft})^{\beta_f} w_{l'f} \tag{2.17}$$

Donde  $CCF_{ft}$  representa el factor de capital en un horizonte de tiempo, que incluye amortización y mantenimiento, mientras que  $\alpha_f$  y  $\beta_f$  son coeficientes de costo adecuados al tipo de planta.

La variable  $Ec$ , que representa el costo de obtención de fuel para la generación de energía, se calcula multiplicando la cantidad necesaria de fuel en el sitio  $l$  ( $lf_i$ ) por su costo ( $cfuel$ ):

$$Ec = cfuel \sum_l lf_l \tag{2.18}$$

El costo de producción ( $Pc$ ) tiene en cuenta los costos de operación y es proporcional a la cantidad producida en cada planta. Depende de un factor  $Cprod_{ptf}$  que representa el costo de producción para el producto  $p$  en la planta  $f$  con capacidad  $t$ :

$$Pc = \sum_{\substack{lpf \\ t \in T_f \\ (p,f) \in V(p,f)}} Prod_{ltp} Cprod_{ptf} \quad (2.19)$$

## 2.4 Caso de estudio

El modelo propuesto se aplica en el diseño de una CS forestal en la región norte y centro de la Argentina. La primera de ellas se caracteriza por tener grandes cantidades de áreas forestadas con especies comerciales, mientras que los principales consumidores se encuentran en la región centro (IREAL, 2011). Los parámetros utilizados en el modelo y algunas suposiciones son propias de la industria forestal argentina, pero pueden ser fácilmente modificadas para aplicarlas a otra región geográfica u otro contexto. Es preciso destacar que, como una ventaja fundamental del modelo, el número de elementos involucrados puede modificarse sin cambiar la estructura de la formulación. Es posible, por lo tanto, agregar más tipos de materia prima, nuevos sitios o ubicaciones, otros productos, etc. De igual modo, con mucha facilidad se pueden variar los datos: disponibilidades, costos, demandas, etc. En lo que sigue se realiza una presentación que busca mostrar la capacidad del modelo para evaluar el diseño de la CS forestal, pero se trata, solamente, de un caso de estudio. Con facilidad se pueden analizar otros escenarios y ejemplos.

El caso de estudio considera 19 sitios, en algunos de ellos están las plantaciones y en otros se encuentran los clientes. Esta diferencia se advierte a partir de la disponibilidad de troncos en el sitio (si es nula significa que no es un sitio de materia prima), y en la demanda existente en esa ubicación (si es nula no existen clientes en ese lugar). Tanto en el caso de las fuentes de materia prima como en los puntos de consumo de productos, se asume que la oferta y la demanda están agregadas. Esto implica, dado el nivel de detalle del modelo, que se suman todos los valores correspondientes a los productores locales y los clientes de cada ciudad. En particular en este caso 11-17 y 111 representan a las plantaciones y 112-115 a los consumidores. Los sitios donde se pueden instalar las unidades productivas incluyen los mencionados anteriormente y a los sitios intermedios (118-110, 116-119), donde no hay disponibilidad de materia prima ni consumo.

Para cada tipo de planta, se considera un conjunto de tres capacidades: t1 (mayor capacidad), t2, y t3 (menor capacidad). Los rendimientos y las tasas de conversión de materia prima a producto se asumen iguales para todos los sitios. Los factores de generación de los subproductos y residuos pueden obtenerse de la sección “Descripción del problema” del presente capítulo, donde las proporciones en porcentaje fueron presentadas.

La Tabla 2.2 muestra las demandas máximas de madera, tableros, pellets y etanol para cada sitio considerado; estos valores fueron supuestos con el fin de mostrar el funcionamiento del modelo.

Sitio	Madera [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]		Tableros [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]	Pellets [T año <sup>-1</sup> ] <sup>1</sup>	Etanol [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]
	Tipo 1	Tipo 2			
<i>112</i>	9.000	15.000	90.000	85.000	90.000
<i>113</i>	20.000	60.000	200.000	150.000	100.000
<i>114</i>	38.000	65.000	380.000	180.000	320.000
<i>115</i>	75.000	9.000	550.000	75.000	550.000

Tabla 2.2. Demandas máximas de productos en las regiones de consumo.

El transporte se realiza mediante camiones y el costo varía de acuerdo al material transportado: 0,045 \$ (T km)<sup>-1</sup> para los troncos, 0,118 \$ (T km)<sup>-1</sup> para los residuos y subproductos, 0,055 \$ (m<sup>3</sup> km)<sup>-1</sup> para la madera y los tableros, 0,11 \$ (T km)<sup>-1</sup> para pellets, and 0,126 \$ (m<sup>3</sup> km)<sup>-1</sup> para etanol.

Los costos y precios de ventas fueron determinados considerando valores de la industria forestal Argentina (INTA, 2.013; Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2.012; IREAL, 2.011), excepto aquellos vinculados al etanol que fueron obtenidos de la literatura. Se asume que el costo de adquisición de los troncos no varía con la localización geográfica y es equivalente a 23 \$ T<sup>-1</sup> y 29,23 \$ T<sup>-1</sup> para los dos tipos considerados. El precio de venta de los subproductos es igual a 14,11\$ T<sup>-1</sup> para los chips, 7,06 \$ T<sup>-1</sup> para el chip corteza y 3,18 \$ T<sup>-1</sup> para la corteza y el aserrín. El costo de adquisición del combustible líquido es de 1,096 10<sup>-6</sup> \$ kJ<sup>-1</sup>, los valores adoptados para la capacidad calorífica de los pellets es de 1,92 10<sup>4</sup> kJ kg<sup>-1</sup>, para la corteza de 9,61 10<sup>3</sup> kJ kg<sup>-1</sup>, para los chips 1,07 10<sup>4</sup> kJ kg<sup>-1</sup>, para el aserrín 1,25 10<sup>4</sup> kJ kg<sup>-1</sup>, y para el chip leña 10<sup>4</sup> kJ kg<sup>-1</sup>. El requerimiento de energía térmica para el secado de la madera es de 1,51 10<sup>6</sup> kJ m<sup>-3</sup> y 1,28 10<sup>7</sup> kJ m<sup>-3</sup> para la producción de etanol.

Con estos parámetros, y los que se presentan en el Apéndice A de este capítulo, se analizan tres casos. El primero de ellos, llamado caso base, consiste en optimizar la CS

<sup>1</sup> En esta tesis se utiliza la letra T para indicar toneladas, con el fin de evitar confusión con las variables del modelo matemático.

original y se enfatiza el análisis en la distribución y uso de residuos y subproductos. En el segundo caso no se contempla la posibilidad de usar residuos y subproductos como materia prima para la elaboración de otros productos con el objetivo de comparar las diferencias al considerar esta alternativa. El tercer caso permite el uso de troncos como materia prima en la producción de etanol, con el propósito de estudiar la distribución de las diferentes materias primas. En la última parte de la sección de resultados se incluye un estudio de sensibilidad, en el cual algunos de los parámetros del modelo son modificados con el fin de resaltar la capacidad del enfoque propuesto para resolver diferentes escenarios y representar los compromisos existentes.

El modelo propuesto se implementa en un caso específico para mostrar las capacidades del modelo en escenarios simplificados. El caso de estudio puede ser fácilmente adaptado a otros contextos, modificando los parámetros del mismo.

## **2.5 Resultados y discusión**

Con el objetivo de analizar el impacto de los diferentes elementos considerados en la configuración de la CS y probar el funcionamiento del modelo, se presentan los tres casos mencionados anteriormente. Todos los casos del presente capítulo, y de los siguientes, fueron modelados y resueltos en GAMS (Brooke et al., 2012), versión 24.1.3 con un procesador de 2,8 GHz Intel Core i7. El resolvidor CPLEX 12.5.1 fue utilizado para resolver los problemas MILP.

### **2.5.1 Caso 1: “Caso base”**

En la Figura 2.2 se presenta la configuración óptima de la CS para los parámetros expuestos en la sección “Caso de estudio”. En la misma se muestran los flujos de

materia prima, residuos y subproductos; por cuestiones de espacio no se presentan los flujos de productos. Como se puede notar, en la CS óptima existe una tendencia a localizar las unidades productivas conformando “clústeres”. La mayoría de las unidades productivas se ubican en los sitios que producen materia prima, evitando el costo de transporte de la misma. El beneficio anual (*Bf*) del sistema es 156,9 MM\$<sup>2</sup>, y el detalle de las ventas y los costos se muestran en la primera columna de la Tabla 2.3. Los troncos son utilizados totalmente para la producción de tableros y madera, mientras que los residuos provenientes de las plantaciones son consumidos en su totalidad por las plantas de pellets y etanol (Tabla 2.4). Teniendo en cuenta que estos residuos no tienen costo de adquisición y sólo se considera el costo de transporte a las plantas de producción, son utilizados por las plantas que se encuentran cerca del sitio donde son generados. De este modo, su uso es atractivo y representa una oportunidad de reducir la quema del material sobre el suelo, preservando su calidad.

En la Tabla 2.5 se muestran las capacidades instaladas de cada unidad productiva y el sitio donde se localizan. Puede observarse de la Tabla 2.4 que se produce un total anual de 250.152 m<sup>3</sup> de madera, 1.180.000 m<sup>3</sup> de tableros, 28.963 T de pellets y 50.000 m<sup>3</sup> de etanol. La capacidad instalada es utilizada totalmente en el caso de las plantas de tableros y etanol, mientras que un 99% y un 72% de la capacidad total en el caso de los aserraderos y de las plantas de pellets, respectivamente. En el último caso es importante destacar que, debido al costo de inversión de las plantas de pellets, es más rentable instalar dos plantas cercanas a los sitios de plantaciones que una de mayor tamaño y transportar el material a esta planta.

La demanda máxima de tableros es cubierta en un 98% mientras que la de madera en un 86%, siendo totalmente satisfecha la madera de tipo 1 y un 72.6% de la de tipo 2. Sólo

---

<sup>2</sup> En esta tesis se adopta la abreviación MM para indicar millones y M para indicar miles.

5% de la demanda máxima de pellets y etanol se abastece. Esto se debe a que la materia prima disponible, subproductos y residuos, no es suficiente para generar estos productos en mayor cantidad, habida cuenta también de que gran parte ha sido dedicada a la producción de tableros, producto con mayor rentabilidad.

La demanda de tableros no se encuentra totalmente satisfecha porque la instalación de una nueva planta, para lograr este objetivo, no es rentable. La capacidad instalada se utiliza en su totalidad y no se justifica una nueva unidad, teniendo en cuenta que sólo una pequeña parte de su capacidad se utilizará para satisfacer la demanda no cumplida. La planta de etanol se instala en un punto estratégico, cerca de diferentes fuentes de materia prima para reducir el costo de transporte.

Los subproductos generados en los aserraderos son distribuidos a las restantes unidades productivas. Chip, chip leña y aserrín son enviados a plantas cercanas de etanol y tableros (Figura 2.3). De la Figura 2.2 se puede observar que los residuos se distribuyen según la distancia a las unidades productivas en los diferentes sitios, buscando la viabilidad económica en la configuración de la CS. La producción total de pellets se vende a las regiones de consumo, es decir, no se utilizan como combustibles para calderas.

En este caso, el sitio donde se localizan las diferentes unidades es muy importante con el fin de utilizar los residuos y subproductos de una manera rentable. El uso de estos materiales permite poner en valor elementos que anteriormente tenían un aprovechamiento bajo o nulo, reduciendo el costo de producción.

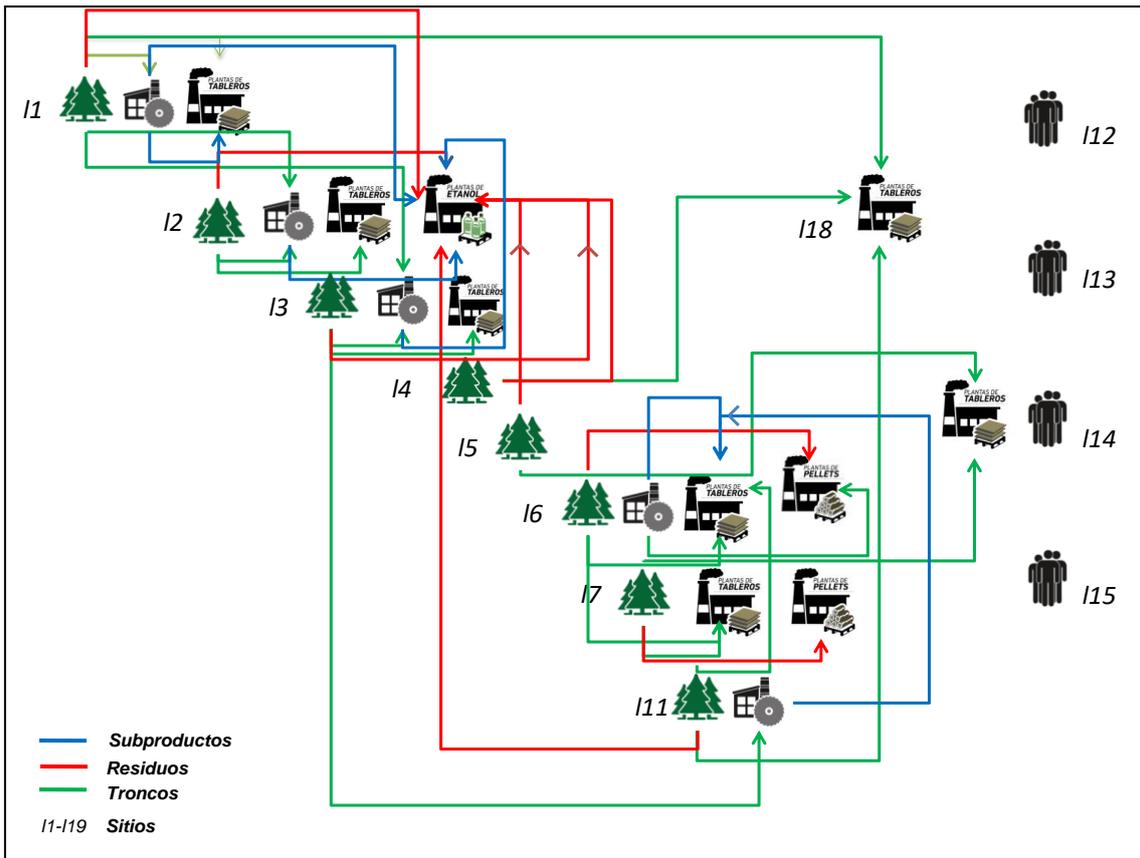


Figura 2.2. Caso 1: Configuración óptima de la CS.

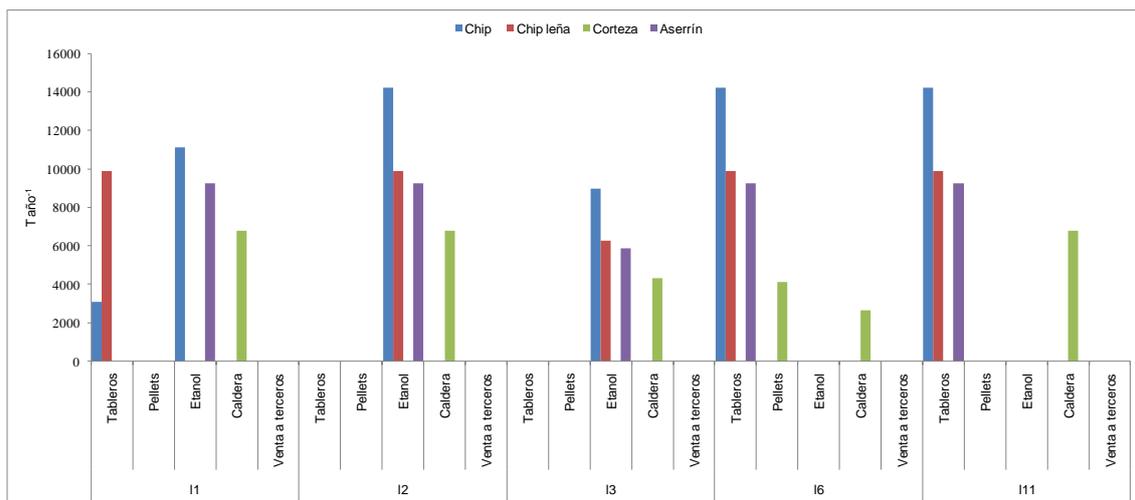


Figura 2.3. Caso 1: distribución óptima de los subproductos de aserraderos a los diferentes sitios donde se utilizan.

	<b>Caso base</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>
<b>Ventas [ MM\$ año<sup>-1</sup>]</b>			
<i>Madera</i>	50,88	43,72	11,62
<i>Tableros</i>	418,57	418,57	418,57
<i>Etanol</i>	58,98	0	117,96
<i>Pellets</i>	7,09	0	3,43
<i>Subproductos</i>	0	1,20	0
<b>Costos de inversión [ MM\$ año<sup>-1</sup>]</b>			
<i>Aserraderos</i>	0,89	0,75	0,19
<i>Tableros</i>	56,25	53,03	56,25
<i>Etanol</i>	10,10	0	15,31
<i>Pellets</i>	0,27	0	0,14
<b>Costos de producción [MM\$ año<sup>-1</sup>]</b>			
<i>Aserraderos</i>	26,44	22,83	5,64
<i>Tableros</i>	226,19	230,93	227,23
<i>Etanol</i>	18,88	0	35,93
<i>Pellets</i>	2,39	0	1,13
<b>Costos de transporte [MM\$ año<sup>-1</sup>]</b>			
	37,19	29,32	34,68
<b>Beneficio neto [MM\$ año<sup>-1</sup>]</b>			
	156,92	126,63	175,08

Tabla 2.3. Reporte económico de los diferentes casos.

### 2.5.2 Caso 2

Con el fin de analizar el impacto de aprovechar los residuos y los subproductos en la CS forestal, se estudia el mismo ejemplo presentado en el caso 1 sin la posibilidad de usar estos materiales como materia prima. De esta forma, sólo los troncos se consideran como materia prima y, por lo tanto, la producción de etanol y pellets no puede llevarse a cabo. Además, como los subproductos de los aserraderos no se utilizan como materia prima, se destinan como combustible a las calderas o se venden. En este caso, sólo se produce madera y tableros en la solución óptima.

La producción anual de tableros es de 1.180.000 m<sup>3</sup> y la de madera es de 212.118 m<sup>3</sup> (Tabla 2.4). Comparando con el caso base, se puede afirmar que la primera cantidad permanece igual, mientras que la producción en los aserraderos disminuye un 16%. Dado que los subproductos no pueden ser utilizados como materia prima y que la producción de tableros genera mayor rentabilidad que la de madera, los troncos reemplazan los subproductos que no se pueden utilizar en este caso. Esto implica menor cantidad de troncos disponibles para la producción de madera, la cual se reduce.

La demanda de tableros se cumple en un 98% mediante la instalación de 6 plantas, mientras que 4 aserraderos se instalan para satisfacer la demanda máxima de madera tipo 1 y el 47% de la demanda de madera tipo 2. No existe producción de etanol y pellets porque, como se menciona al principio, no se considera ninguna fuente de materia prima. Los troncos se utilizan por completo (Tabla 2.4) y todos los subproductos son vendidos, excepto parte de la corteza que se utiliza como combustible para las calderas en los aserraderos.

La ubicación de las plantas varía en comparación con el caso anterior (Tabla 2.5): hay menos aserraderos y también se reduce el número de plantas de tableros, ya que sólo se instalan seis unidades. En la Tabla 2.5, se puede observar que, en el primer caso, las plantas de tableros y los aserraderos se ubicaron juntos en la mayoría de los sitios; pero, en este caso, esto ocurre sólo en un sitio. Esta diferencia se debe a que, en el caso base, la ubicación de las plantas de tableros fueron afectadas por el uso de subproductos como materia prima, evitando largas distancias para lograr un diseño económicamente factible. En este caso, el uso de subproductos no es una opción y, por lo tanto, las plantas trabajan independientemente dado que no existe intercambio de materiales entre ellas.

Al no considerar el uso de los residuos y subproductos como materia prima, los beneficios se reducen a 126,6 MM\$ anuales, un 20% menos que el caso base. En la Tabla 2.3, las ventas y los costos se encuentran detallados. Al comparar la configuración de la CS en ambos casos (Tabla 2.5), se advierten varias diferencias. En primer lugar, la configuración de la CS se modifica notoriamente, teniendo en cuenta la cantidad de plantas, sus tamaños y ubicaciones. Por otro lado, la producción total de cada producto se ve modificada.

	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>
<b>% de la demanda satisfecha</b>			
<i>Madera</i>	86%	73%	18%
<i>Tableros</i>	98%	98%	98%
<i>Pellets</i>	6%	0%	3%
<i>Etanol</i>	5%	0%	9%
<b>% de troncos utilizados</b>			
	100%	100%	100%
<b>% de residuos utilizados</b>			
	100%	0%	100%
<b>Producción</b>			
<i>Madera [m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>]</i>	250.152	212.118	53.812
<i>Tableros [m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>]</i>	1.180.000	1.180.000	1.180.000
<i>Pellets [T año<sup>-1</sup>]</i>	28.963	0	13.662
<i>Etanol [m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>]</i>	50.000	0	100.000

Tabla 2.4. Satisfacción de la demanda, producción y uso de materia prima para los diferentes casos estudiados.

### 2.5.3 Caso 3

En este caso, se considera la posibilidad de utilizar troncos como materia prima para la producción de etanol. Para esto se agrega la planta  $f_4$  al set  $C(f)$ . Se define el parámetro  $c_{pr}$  para el producto  $p_5$  igual  $0,145 \text{ m}^3 \text{ T}^{-1}$  para cualquier  $r$ . Los restantes parámetros son iguales al caso 1.

El objetivo de este caso es analizar el impacto de esta alternativa en la configuración de la CS, considerando la competencia en la adquisición de troncos para elaborar los diferentes productos.

La solución óptima es de 175,08 MM\$ anuales, es decir, 3.3% mejor que el caso base. Los troncos se utilizan por completo (Tabla 2.4), principalmente para la producción de tableros que utiliza el 70% de la cantidad total. Sin embargo, el uso de esta materia prima para producir madera disminuye con el fin de aumentar la producción de etanol. Esto se debe a que la producción de etanol es más rentable que la producción de madera y, en el caso base, la producción de etanol estuvo limitada por la disponibilidad de residuos y subproductos. Además, los residuos de las plantaciones son completamente consumidos por las plantas de pellets y etanol usando 9,8% y 90,2% respectivamente, como se muestra en la Figura 2.4. En la misma también se puede apreciar la distribución de los residuos a las distintas plantas.

Se instalan siete plantas de tableros de diferentes capacidades de producción: 4 ubicadas en zonas de plantaciones, 1 en un sitio intermedio y 2 en una región de consumidores. Finalmente, sólo se instala una planta de pellets en un sitio de plantaciones.

Los subproductos generados en los aserraderos se utilizan principalmente para producir tableros, ya que parte de los troncos se emplean ahora para la producción de etanol. Además, los subproductos no se utilizan para la producción de etanol: en primer lugar porque la cantidad producida es menor que en el caso base y son enviados a la planta de tableros localizada en el mismo sitio; en segundo lugar por una cuestión de rentabilidad económica.

	Caso 1							Caso 2							Caso 3									
	11	12	13	16	17	111	114	118	11	12	13	16	17	19	114	115	118	12	13	16	17	114	115	118
Aserraderos	1	1	2	1		1			1	1		1		1						1				
Tableros	3	1	3	1	2		3	1		1	1		3		3	1	1	1	1	3	2	3	3	1
Pellets				2	2																2			
Etanol		3																		1				

Capacidades t1: 1 t2: 2 t3: 3  
verde: sitio de plantaciones; azul: sitio de consumo; negro: sitio intermedio

Tabla 2.5. Localización de las diferentes unidades de producción en los tres casos estudiados.

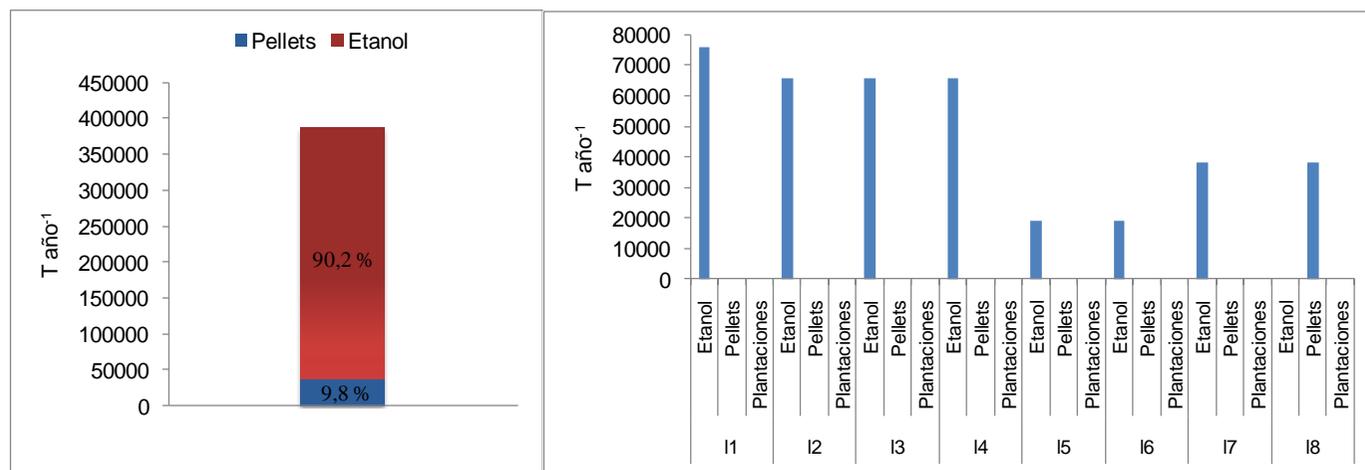


Figura 2.4. Caso 3: distribución óptima a plantas de pellets y etanol de los residuos generados en las plantaciones.

El uso de subproductos y residuos genera un pequeño “clúster” en el sitio 16 (Tabla 2.5). Las tres instalaciones: aserradero, planta de tableros y planta de etanol se encuentran ubicadas en ese sitio donde hay plantaciones, lo que reduce el costo de transporte de troncos y subproductos.

#### **2.5.4 Análisis de sensibilidad**

La configuración óptima de la CS depende fuertemente de los valores adoptados para los diferentes parámetros. Con el objetivo de evaluar cómo responde el modelo a variaciones de los mismos, algunos datos del caso base son modificados, uno por vez. De esta forma, se evalúa la sensibilidad del modelo frente a posibles cambios en determinados parámetros. Es posible también considerar para otros análisis que varios parámetros del modelo son modificados simultáneamente.

*Escenario a:* El precio de venta de la madera aumenta un 25% con respecto al valor original. Algunas características de la solución óptima para este escenario se muestran en la Tabla 2.6. La materia prima y los residuos se utilizan por completo. El beneficio total es igual a 169,7 MM\$ año<sup>-1</sup>. La producción de tableros se mantiene igual al caso base, el etanol disminuye a 45.380 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>, la producción de pellets aumenta ligeramente a 29.582 T año<sup>-1</sup> y la madera aumenta a 270.000 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>, como era esperable dado el aumento en el precio de venta. Comparando con el caso base, los sitios donde se ubican las instalaciones (Tabla 2.7) no se modifican, así como tampoco los tamaños de las diferentes plantas, excepto el aserradero ubicado en el sitio 13 que aumenta su producción. Aunque el precio de la madera es mejor que antes, no se alcanza la demanda total porque no es rentable instalar otro aserradero para cubrir esa diferencia. La producción de etanol se reduce, pues ahora se envía mayor cantidad de

subproductos a las plantas de tableros para reemplazar los troncos que se utilizan para la producción de madera.

*Escenario b:* la disponibilidad de materia prima disminuye un 25%. Como la producción de tableros es la más rentable, la cantidad de este producto se mantiene, mientras que la producción de madera se reduce un 89%, la de etanol un 38% y la de pellets un 30%. Toda la materia prima y los residuos se utilizan. El beneficio total es de 123,8 MM\$ año<sup>-1</sup>. Debido a la reducción de la disponibilidad de troncos, se envía una cantidad menor de esta materia prima al único aserradero instalado, de tamaño intermedio. Las plantas de etanol y pellets están ubicadas en el mismo lugar que antes, esta última con menor capacidad que en el caso base (Tabla 2.7).

*Escenario c:* para analizar un posible cambio en el precio de venta de tableros, éste se reduce un 25%. Nuevamente todos los troncos y residuos se utilizan. El beneficio es igual a 60,8 MM\$ año<sup>-1</sup>, lo que representa una reducción del 61% respecto del caso base. Las demandas de madera se cumplen totalmente, mientras que la correspondiente a tableros se satisface en un 83% (Tabla 2.6). La producción de pellets no varía considerablemente y la cantidad de etanol aumenta un 33%, instalando una planta de mayor capacidad en el mismo sitio que en los casos anteriores (12).

En este caso, el precio de venta más bajo de los tableros convierte a la producción de madera en un producto más atractivo desde el punto de vista económico, satisfaciendo su demanda máxima. Además, se generan y envían mayores cantidades de subproductos para aumentar la producción de etanol, en lugar de enviarlos a las plantas de tableros, reduciendo, de esta forma, la demanda satisfecha de este producto.

*Escenario d:* con el objetivo de analizar los cambios en la CS cuando se modifican las demandas, para cada producto se reducen un 25%. El beneficio es igual a 127,3 MM\$ año<sup>-1</sup>, 19% menos que el caso base. La producción de madera satisface la demanda total,

así como la producción de tableros. La producción de etanol sigue siendo la misma, mientras que la producción de pellets es igual a 34.000 T año<sup>-1</sup>. Esta última cantidad se incrementa debido a que algunos subproductos ahora son destinados a las plantas de pellets en lugar de enviarlos a las plantas de tableros, como en el caso base. Los troncos no se utilizan por completo (Tabla 2.6), dado que se satisface totalmente la demanda de los productos que lo utilizan como materia prima. Esto cambió la configuración de la CS, modificando las unidades instaladas. La planta de etanol se ubica en un lugar donde se utilizan todos los troncos disponibles, lo que reduce el costo del transporte de los residuos generados en ese sitio, utilizados por esta unidad productiva. Las plantas de pellets se instalan en los mismos sitios, pero ambas tienen mayor capacidad de producción. Los subproductos se utilizan totalmente como materia prima para la producción de pellets y etanol, ya que los tableros sólo utilizan troncos. Los residuos generados también son totalmente consumidos.

	<b>Escenario a</b>	<b>Escenario b</b>	<b>Escenario c</b>	<b>Escenario d</b>
<b>% de demanda abastecida</b>				
<i>Madera</i>	93%	10%	100%	100%
<i>Tableros</i>	98%	98%	83%	100%
<i>Pellets</i>	6%	4%	6%	9%
<i>Etanol</i>	4%	3%	6%	6%
<b>% de troncos utilizados</b>	100%	100%	99%	83%
<b>% de residuos utilizados</b>	100%	100%	100%	100%
<b>Producción</b>				
<i>Madera [m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>]</i>	270.000	28.250	291.000	218.250
<i>Tableros [m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>]</i>	1.180.000	1.180.000	1.000.000	900.000
<i>Pellets [T año<sup>-1</sup>]</i>	29.582	20.492	29.136	34.002
<i>Etanol [m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>]</i>	45.387	30.946	66.556	50.000
<b>Bf [MM\$ año<sup>-1</sup>]</b>	169,7	123,8	60,8	127,3

*Escenario a: el precio de la madera se incrementa 25%. Escenario b: la disponibilidad de troncos se reduce 25%. Escenario c: disminuye 25% el precio de venta de los tableros. Escenario d: disminuyen 25% cada una de las demandas.*

Tabla 2.6. Resultados de los diferentes escenarios estudiados en el análisis de sensibilidad.

De los resultados obtenidos previamente se puede concluir que la configuración de la CS varía según los valores de los parámetros. La ubicación de cada unidad productiva es un punto crítico en este tipo de industria, principalmente debido a la posibilidad de utilizar residuos y subproductos como materia prima, por un lado, y los costos de transporte, por otro lado. A través de los casos estudiados, se puede notar que el uso de estos materiales es una alternativa viable cuando se diseña la CS desde una perspectiva estratégica. En este sentido, el modelo representa una herramienta simple, de gran utilidad a la hora de analizar diferentes escenarios de producción y distribución con el objetivo de planificar el uso de diferentes tipos de materias primas y recursos.

<i>Escenario a</i>											
	11	12	13	16	17	111	114	118			
<i>Aserraderos</i>	1	1	1	1		1					
<i>Tableros</i>	3	1	3	1	2		3	1			
<i>Pellets</i>				2	2						
<i>Etanol</i>		3									
<i>Escenario b</i>											
	11	12	13	16	17	19	114	115	118	11	12
<i>Aserraderos</i>	2									2	
<i>Tableros</i>		1	1			3	3	1	1		1
<i>Pellets</i>				3	3						
<i>Etanol</i>			3								
<i>Escenario c</i>											
	11	12	13	14	15	16	17	19	114	115	118
<i>Aserraderos</i>	1	1	1	1	2			1			
<i>Tableros</i>		1	3				2		3	2	1
<i>Pellets</i>						2	2				
<i>Etanol</i>		2									
<i>Escenario d</i>											
	11	12	13	14	16	17	114	115	118		
<i>Aserraderos</i>	1	1	1	1	3						
<i>Tableros</i>			1			2	3	2	1		
<i>Pellets</i>					1	2					
<i>Etanol</i>			3								

Capacidades t1: 1 t2: 2 t3: 3  
verde: plantaciones; azul: región de consumidores; negro: sitio intermedio

Tabla 2.7. Ubicación de las plantas y tamaños adoptados en el análisis de sensibilidad para los diferentes escenarios.

## 2.6 Conclusiones

En este capítulo se formula y aplica un modelo MILP con el fin de optimizar el diseño de la CS forestal, considerando aspectos propios de esta industria en Argentina desde un enfoque económico. Se enfatiza el empleo de residuos y subproductos con el objetivo de agregar valor a la CS general. Se consideran diferentes alternativas para el destino de estos materiales, incluyendo la posibilidad de generación de energía y producción de biocombustibles a partir de biomasa forestal, producto que está cobrando relevancia en los últimos tiempos. Se analizaron diferentes casos para identificar y mostrar las capacidades del marco propuesto.

La formulación presentada permite evaluar elementos claves y los compromisos existentes entre los elementos involucrados para el desarrollo económico de esta área. Se pueden evaluar diversas cuestiones como: el efecto de las diferentes decisiones sobre la ubicación de las plantas, la conformación de “clústeres”, la escala de producción, la rentabilidad de los productos, el uso de la materia prima, la satisfacción de la demanda, etc. Por lo tanto, el enfoque propuesto representa una herramienta útil para analizar diferentes escenarios de la CS forestal con el fin de mejorar su eficiencia y agregar valor al sistema.

Teniendo en cuenta que el análisis del empleo de residuos y subproductos es un objetivo clave de este capítulo, los resultados muestran que su uso es una alternativa rentable. Además, la producción de etanol es una opción alentadora pero depende fuertemente del contexto considerado (por ejemplo, los precios). Por otro lado, como quedó demostrado en el análisis de sensibilidad, los resultados dependen en gran medida de los parámetros del modelo: costos, precios, disponibilidades de materia prima, los productos considerados, entre otros. En este sentido, el modelo se presenta como un marco

metodológico que permite el análisis de diferentes escenarios y, por lo tanto, los resultados deben estar en relación con los supuestos adoptados en los contextos específicos.

Se realizó un análisis sobre diferentes escenarios estudiando los compromisos existentes y las alternativas de producción, resaltando las capacidades del modelo propuesto.

Es interesante señalar que el enfoque presenta algunas limitaciones: por ejemplo, no se consideran producciones multiperíodo ni se incluyen algunos productos clásicos como la pulpa y el papel. Pero estos problemas se pueden abordar fácilmente con una extensión de la formulación. Por otro lado, en este capítulo sólo se considera el análisis de la CS desde un punto de vista económico, sin tomar en cuenta aspectos del medio social y/o natural, cuestiones que son abordadas en los capítulos siguientes.

### Bibliografía

Brooke, A., Kendrick D., Meeraus A., Raman R., 2012. GAMS, A User's Guide. GAMS Development Corporation. Washington, DC.

Camero C., Sowlati T., Marinescu M., Röser D., 2015. Strategic optimization of forest residues to bioenergy and biofuel supply chain. Internal Journal of Energy Research 39, 439-452.

Carlsson D., D'Amours S., Martel A., Rönnqvist M., 2009. Supply chain planning models in the pulp and paper industry. INFOR: Information Systems and Operational Research 47(3), 167-183

D'Amours S., Rönnqvist M., Weintraub A., 2009. Using Operational Research for Supply Chain Planning in the Forest Products Industry. INFOR Inf Syst Oper Res 46, 265-81.

Dansereau L.P., El-Halwagi M., Mansoornejad B., Stuart P., 2014. Framework for margins-based planning: Forest biorefinery case study. *Computer and Chemical Engineering* 63, 34-50.

Demirbas M.F., Balas M., Balas H., 2011. Biowastes-to-biofuels. *Energy Conversion and Management* 52, 1.815-1.828.

FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations), 2.006. Tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina y el Caribe. Estudio FAO Montes.

Heinimö J., Malinen H., Ranta T., Faaij A., 2011. Renewable energy targets, forest resources, and second-generation biofuels in Finland. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 5, 238-249.

Hurmekosky E., Hetemäki, L., 2013. Studying the future of the forest sector: Review and implications for long-term outlook studies. *Forest Policy and Economics* 34, 17-29.

INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), 2.013. Planilla de precios forestales. EEA Concordia.

IREAL de la Fundación Mediterránea, 2.011. Una Argentina competitiva, productiva y federal: cadena foresto industrial. Año n° 17-edición n° 95.

Kong J., Rönqvist M., Frisk M., 2012. Modeling an integrated market for sawlogs, pulpwood, and forest bioenergy. *Canadian Journal of Forest Research* 42, 315-332.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Ganadería. 2013. Industrias forestales Año 2012.

Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2013. Argentina Innovadora 2.020. Plan Nacional de Ciencia y Tecnología.

Mirkouei A., Mirzaie P., Haapala K.R., Sessions J., Murthy G.S., 2016. Reducing the cost and environmental impact of integrated fixed and mobile bio-oil refinery supply chains. *Journal of Cleaner Production* 113, 495-507.

Mishra D., Gunasekaran A., Papadopoulos T., Hazen B., 2017. Green supply chain performance measures: a review and bibliometric analysis. *Sustainable Production and Consumption* 10, 85-99.

- Mobini M., Sowlati T., Sokhansanj S., 2013. A simulation model for the design and analysis of wood pellet supply chains. *Applied Energy* 111, 1.239-1.249.
- Pettersson K., Wetterlund E. D., Lundmark R., Ehn C., Lundgren J., 2015. Integration of next-generation biofuel production in the Swedish forest industry – A geographically explicit approach. *Applied Energy* 154, 317-332.
- Pirraglia A., Gonzalez R., Saloni D., Denig J., 2013. Technical and economic assessment for the production of torrefied ligno-cellulosic biomass pellets in the US. *Energy Conversion and Management* 66, 153-164.
- Rönnqvist M., D'Amours S., Weintraub A., 2015. Operations Research challenges in forestry: 33 open problems. *Annals of Operation Research* 232, 11.
- Sarkar S., Kumar A., Sultana A., 2011. Biofuels and biochemicals production from forest biomass in Western Canada. *Energy* 36, 6.251-6.262.
- Troncoso J.J., Garrido R., 2005. Forestry production and logistics planning: An analysis using mixed-integer programming. *Forest Policy and Economics* 7, 625-633.
- Troncoso J., D'Amours S., Flisberg P., Rönnqvist M., Weintraub A., 2015. A mixed integer programming model to evaluate integrating strategies in the forest value chain - a case study in the Chilean forest industry. *Canadian Journal of Forest Research* 45, 937-949.
- Uasuf A., Becker G., 2011. Wood pellets production costs and energy consumption under different framework conditions in Northeast Argentina. *Biomass and Bioenergy* 35, 1.357-1.366.
- Whalley S., Klein S.J.W., Benjamin J., 2017. Economic analysis of woody biomass supply chain in Maine. *Biomass and Bioenergy* 96, 38-49.

## Apéndice A. Parámetros del modelo del capítulo 2.

**Tabla A.1.** Parámetros de las unidades de producción.

	Tableros			Pellets			Etanol			Aserraderos			
	t1	t2	t3	t1	t2	t3	t1	t2	t3		t1	t2	t3
<b>Capacidad máxima</b> [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]	250.000	150.000	100.000	26.000 <sup>a</sup>	20.000 <sup>a</sup>	13.000 <sup>a</sup>	100.000	70.000	50.000		54.000	36.000	18.000
<b>Costo de producción</b> [\$ m <sup>-3</sup> ]	168	160	152	81 <sup>b</sup>	82,4 <sup>b</sup>	84 <sup>b</sup>	341,47	354,61	359,86	<i>Madera tipo 1</i>	52,09	52,62	53,65
										<i>Madera tipo 2</i>	43,57	43,85	44,70

Unidades: <sup>a</sup> [T año<sup>-1</sup>] <sup>b</sup> [\$ T<sup>-1</sup>]

**Tabla A.2.** Rendimientos y factores de conversión

	<b>Madera</b> [m <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]	<b>Tableros</b> [m <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]	<b>Pellets</b> [T T <sup>-1</sup> ]	<b>Etanol</b> [m <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]
<b>Troncos</b>	0,262	0,972	-	-
<b>Residuos</b>	-	-	0,360	0,121
<b>Chips</b>	-	0,810	0,468	0,157
<b>Chip leña</b>	-	1,053	0,410	0,138
<b>Corteza</b>	-	-	0,468	0,157
<b>Aserrín</b>	-	1,296	0,576	0,194

**Tabla A.3.** Parámetros para los costos de instalación.

$\alpha_{f1}$	2399
$\alpha_{f2}$	52780,3
$\alpha_{f3}$	3205,7
$\alpha_{f4}$	136100
$\beta_{f1}$	0,6
$\beta_{f2}$	0,6
$\beta_{f3}$	0,6
$\beta_{f4}$	0,6
$CCF_{ft}$	0,1125

**Tabla A.4.** Distancia entre los sitios [km]

	<i>l1</i>	<i>l2</i>	<i>l3</i>	<i>l4</i>	<i>l5</i>	<i>l6</i>	<i>l7</i>	<i>l8</i>	<i>l9</i>	<i>l10</i>	<i>l11</i>	<i>l12</i>	<i>l13</i>	<i>l14</i>	<i>l15</i>	<i>l16</i>	<i>l17</i>	<i>l18</i>	<i>l19</i>
<i>l1</i>	0	50	80	92	185	562	939	247	7	118	250	1.391	1.273	1.044	588	1.136	650	387	1.100
<i>l2</i>	50	0	30	42	135	512	889	197	47	68	200	1.341	1.226	994	538	1.037	600	337	1.050
<i>l3</i>	80	30	0	115	111	355	732	173	71	42	43	1.317	1.202	970	512	997	580	317	1.030
<i>l4</i>	92	42	115	0	110	430	807	113	131	18	118	1.257	1.137	910	452	840	555	292	1.005
<i>l5</i>	185	135	111	110	0	190	701	91	182	128	170	1.262	1.146	915	496	1020	472	251	972
<i>l6</i>	562	512	355	430	190	0	511	100	316	203	177	1.072	956	725	351	523	285	231	765
<i>l7</i>	939	889	732	807	701	511	0	610	827	714	750	694	481	347	517	725	391	718	256
<i>l8</i>	247	197	173	113	91	100	610	0	244	131	75	1.171	1.055	824	417	1225	376	177	1.055
<i>l9</i>	7	47	71	131	182	316	827	244	0	113	288	1.384	1.268	1037	583	1082	597	335	1.097
<i>l10</i>	118	68	42	18	128	203	714	131	113	0	175	1.271	1.155	924	470	966	481	219	981
<i>l11</i>	250	200	43	118	170	177	750	75	288	175	0	1.134	1.018	787	395	868	320	120	820
<i>l12</i>	1.391	1.341	1.317	1.257	1.262	1.072	694	1.171	1.384	1.271	1.134	0	727	347	883	390	980	1.140	660
<i>l13</i>	1.273	1.226	1.202	1.137	1.146	956	481	1.055	1.268	1.155	1.018	727	0	350	962	636	741	1.068	231
<i>l14</i>	1.044	994	970	910	915	725	347	824	1037	924	787	347	350	0	536	181	723	804	404
<i>l15</i>	588	538	512	452	496	351	517	417	583	470	395	883	962	536	0	500	263	252	784
<i>l16</i>	1.135	1.037	997	840	1.020	523	725	1.225	1082	966	868	390	636	181	500	0	764	753	578
<i>l17</i>	650	600	580	555	472	285	391	376	597	481	320	980	741	723	263	764	0	285	552
<i>l18</i>	387	337	317	292	251	231	718	177	335	219	120	1.140	1.068	804	252	753	285	0	879
<i>l19</i>	1.100	1.050	1.030	1.005	972	765	256	1.055	1097	981	820	660	231	404	784	578	552	879	0

**Tabla A.5.** Precio de venta de los diferentes productos.

		<b>Regiones de consumo</b>			
		<i>112</i>	<i>113</i>	<i>114</i>	<i>115</i>
<b>Madera</b>	<i>Tipo 1</i>	229,2	223,4	215,2	218
<b>[\$ m<sup>-3</sup>]</b>	<i>Tipo 2</i>	194,5	188,7	180,5	183
<b>Tableros [\$ m<sup>-3</sup>]</b>		359,2	353,4	345,2	348,1
<b>Pellets [\$ T<sup>-1</sup>]</b>		294,6	271,9	239,6	250,8
<b>Etanol [\$ m<sup>-3</sup>]</b>		1213,5	1199,7	1179,6	1186,6

### **3 Optimización de la CS forestal considerando las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).**

*“La grandeza de las acciones humanas es proporcional a la inspiración que los produce.”*

*Louis Pasteur*

### 3.1 Introducción

En este capítulo se busca introducir la perspectiva ambiental en el diseño de la CS presentada en el capítulo 2. Para lograr esto, se utiliza como una primera aproximación, la cuantificación de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

El cambio climático resultante de las actividades humanas se reconoce actualmente como uno de los problemas ambientales más importantes que enfrenta la población mundial. Al abordarlo, los gobiernos, la comunidad y la industria buscan controlar y disminuir las emisiones de GEI generadas por las diferentes actividades que llevan adelante diariamente.

Estos gases se denominan de efecto invernadero porque tienen la capacidad de absorber parte de la energía del sol que es devuelta por la tierra a la atmósfera, evitando que vuelva al espacio. Este fenómeno produce un efecto similar al que se observa en un invernadero, generando un aumento de temperatura en la tierra. Entre estos gases se encuentran el agua (H<sub>2</sub>O), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>) y otros como los clorofluorocarbonos (CFC), los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), entre otros.

El efecto que producen los GEI en el ambiente es contabilizado a través del Potencial de Calentamiento Global (PCG), que es una medida de la capacidad que tienen estos gases de la retención del calor en la atmósfera, ya que no todos absorben la radiación infrarroja de la misma manera ni todos tienen igual vida media. Cuanto más alto sea el PCG que produce un gas, mayor será su capacidad de retención del calor en la atmósfera (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2.017).

En función de esto, ha habido diversos esfuerzos para cuantificar las emisiones de GEI desde niveles más globales, como lo hizo Argentina en su inventario nacional de

emisiones de GEI (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2.017), hasta niveles de menor escala, como lo hacen algunas industrias o empresas.

El indicador emisiones de GEI ha sido implementado en diferentes ámbitos y aspectos con el fin de buscar sustentabilidad en diversas actividades llevadas adelante por el hombre. Esta situación también se ve traducida a la gestión de la CS, donde diferentes autores contabilizan los gases buscando lograr un mejor desempeño ambiental de la misma.

Por ejemplo, Iacovidou y otros (2.017) estudian las métricas utilizadas en la cadena de recuperación de residuos, incluyendo la perspectiva de sustentabilidad. Concluyen que la más conocida y citada, para este criterio, es la de GEI. Kajaste (2.014) realiza una revisión sobre la gestión de GEI en las cadenas de producción de biorrefinerías. Tras realizar un análisis sobre varios trabajos, el autor concluye que las posibilidades de reducir las emisiones de GEI son numerosas y han sido ampliamente estudiadas. Hoekman y Broch (2.018) analizan los impactos ocasionados por la producción de etanol a partir de maíz en EE.UU. a partir de la bibliografía existente. Los autores concluyen que este tipo de práctica tiene algunas ventajas como una reducción moderada de los GEI, de alrededor del 20% del etanol de maíz en comparación con la gasolina, pero diversas desventajas relacionadas a la pérdida de calidad de los ecosistemas.

En relación a la CS forestal, se pueden citar diversos trabajos. Mälkki y Virtanen (2.003) analizan las emisiones de GEI producidas por la gestión de residuos de la madera provenientes de plantaciones y aserraderos, para ser utilizados en la producción de energía. Consideran desde la recolección de los diferentes residuos hasta la generación de energía a partir de esos materiales. Los autores concluyen que las

emisiones de la fase de conversión son significativas y que cuando la energía de la madera reemplaza la energía fósil, mitiga el cambio climático global.

Fan y otros (2.016) estudian los gases producidos en la generación de diesel y nafta renovables, a través de la hidropirólisis y la hidroconversión, a partir de residuos forestales y del rastrojo de maíz. En el análisis, se contabilizan las emisiones por recolección, transporte y procesamiento a través de simulaciones de Monte Carlo. Los autores calcularon ahorros de emisiones de GEI de 67-86% para la nafta y el diesel mediante el tipo de conversión analizada, en comparación con sus homólogos fósiles.

Nakano y otros (2.018) estudian las emisiones provenientes de la producción de rollizos de madera de las tres especies más utilizadas en Japón. Este estudio abarca todas las actividades forestales importantes, como la plantación, el raleo y la tala final. Los autores concluyen que el proceso de tala contribuye a la mayor parte de las emisiones de GEI en todas las especies arbóreas.

Sánchez-García y otros (2.017) estudian, a través de un sistema de información geográfica, la localización óptima de una caldera de biomasa forestal considerando las emisiones de GEI, los costos y la disponibilidad de materia prima. Los autores concluyen que el transporte es el que más aporta a las emisiones en la CS estudiada.

Cambero y otros (2.016) analizan una CS para la producción de bioenergía y biocombustibles a partir de biomasa forestal, desde un punto de vista económico y procurando el ahorro de emisiones de GEI. En el estudio consideran la obtención y conversión de la biomasa forestal y la distribución de biocombustibles. Los resultados indican que la transformación de biomasa para sustituir requerimientos energéticos podría generar beneficios desde el punto de vista económico. También se alcanzan ahorros significativos de emisiones de GEI en comparación con el sistema donde se

elimina la biomasa como desperdicio, y el combustible fósil y la hidroelectricidad se utilizan para satisfacer requerimientos de energía.

Según Cambero y Slowati (2.014), en función de un estudio realizado sobre las medidas utilizadas para introducir sustentabilidad al diseño de CS forestales, las emisiones de GEI se encuentra dentro de las métricas más utilizadas por diferentes autores. Esto se debe a que es fácilmente aplicable, dado que emplea información de fácil acceso para los sistemas productivos (United Nations Environment Programme, 2.000), y que permite cuantificar, sin mayores dificultades, el PCG del sistema bajo análisis. Además, como se mencionó anteriormente, es de gran interés contabilizar y disminuir las emisiones de este tipo de gases a nivel global. Sin embargo, esta métrica sólo se limita a calcular las emisiones producidas por el sistema bajo estudio y su PCG sin poder determinar otros posibles efectos sobre el entorno donde se llevan adelante las diferentes actividades productivas. Asimismo, el hecho de llevar todo a una medida en común, si bien simplifica el análisis, hace perder la noción del aporte de cada elemento al potencial impacto ambiental.

Teniendo en cuenta lo presentado hasta aquí, en este capítulo se introduce la cuantificación y análisis de las emisiones de GEI generadas en la CS forestal presentada en el capítulo anterior, como una primera aproximación a considerar la perspectiva ambiental en el sistema bajo estudio. Se propone utilizar la métrica de emisiones de GEI dado que es una de las más implementadas vinculadas al aspecto ambiental en este tipo de CS. Como el objetivo principal de esta tesis es estudiar la CS incluyendo este enfoque, no puede ser excluida en este tipo de análisis siendo la más aplicada.

El objetivo del presente capítulo es generar una herramienta que permita analizar las emisiones producidas en la CS forestal en relación a la configuración y diseño de la misma. Para lograr esto, se contabilizan las emisiones existentes de los diferentes GEI,

principalmente las pertenecientes a la generación de energía y al transporte en la industria forestal, las cuales luego son introducidas como una función objetivo en el programa matemático de optimización. A diferencia de los trabajos presentados anteriormente que utilizan esta métrica, en este capítulo se propone estudiar cómo afecta considerar o no las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de la generación de energía a partir de biomasa forestal.

En este sentido, según Wielgosinski y otros (2011), es muy común asignarle un valor neutro a las emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción de energía a partir de biomasa forestal. Este material se forma por el proceso de fotosíntesis; los organismos vegetales absorben CO<sub>2</sub> del aire y lo convierten en carbono orgánico, formando su estructura. Esto significaría que la combustión de biomasa sólo libera CO<sub>2</sub> que ya ha circulado en la atmósfera, sin introducir nuevas cantidades. Sin embargo, esta postura está siendo actualmente bastante discutida. Incluso, el comité científico de la Agencia Europea de Medio Ambiente, en un informe realizado sobre las emisiones de GEI en el año 2011, lo considera como un concepto erróneo. Los mismos sostienen que: “la combustión de biomasa aumenta la cantidad de carbono presente en el aire, al igual que la combustión de carbón, petróleo y gasolina, y la extracción de biomasa reduce la cantidad de carbono almacenada en plantas y terrenos de cultivo o reduce la continua captura y almacenamiento de carbono”. Por este motivo en este capítulo se realiza un análisis del efecto de considerar estas emisiones en la generación de energía a partir de combustibles de biomasa vegetal. En esta controversia, influye además el tipo de tecnología utilizada para la generación de energía, ya sea con combustibles fósiles o a partir de biomasa, aspecto que será tenido en cuenta en el desarrollo.

Por otro lado, se consideran las emisiones discriminando por actividad (transporte y energía) dado que difieren ampliamente en magnitud. Por lo tanto, si se realiza una

suma sobre todas las emisiones, las de menor magnitud no influirían en el resultado final; esto se traduciría en un efecto despreciable sobre el diseño de la CS. En la mayoría de los trabajos hasta ahora se utiliza la suma de todas las emisiones provenientes de las diferentes acciones en el modelo de optimización.

Para llevar adelante la contabilización de los GEI se utilizan, como base metodológica, los lineamientos planteados por "The International Council of Forest and Paper Associations ICFPA" (Climate change working group of ICFPA, 2.005). Los mismos son implementados sobre la base del modelo matemático descrito en el capítulo anterior, a través de un enfoque multiobjetivo. Este tipo de enfoque permite considerar más de un objetivo en el sistema y analizar los diferentes compromisos existentes entre ellos. Más adelante, en el cuerpo del capítulo, se explicará el método con mayor detalle. Por otra parte, a diferencia del capítulo anterior, el modelo incorpora la opción de instalar calderas que puedan utilizarse de manera compartida entre las diferentes unidades de producción en los diferentes sitios. Adicionalmente se consideran diferentes tecnologías para la producción de energía a partir de fuel y de biomasa, donde una de ellas permite que parte de esta energía se pueda vender a la red como energía eléctrica.

### **3.2 Metodología**

Una de las primeras tareas que hay que llevar adelante para contabilizar las emisiones de GEI consiste en calcular aquellas producidas en el sistema, realizando un análisis sobre las diferentes acciones que se realizan en la CS bajo estudio. Para estimar estas emisiones se siguieron los principios presentados por la ICFPA, donde se detallan las diversas actividades presentes en la industria forestal y los factores de emisión en cada caso.

Las emisiones generadas por un sistema productivo generalmente son divididas en dos tipos: emisiones directas e indirectas. Las emisiones directas corresponden a fuentes que son controladas o que son propiedad de la empresa. Las emisiones indirectas son aquellas que son consecuencia de las actividades de la empresa, pero que son emitidas desde fuentes que no son controladas o que no son propiedad de la misma. Por ejemplo, si una empresa genera energía eléctrica las emisiones son directas; no ocurre así en el caso que obtenga esta energía de la red, donde otra empresa la está generando, siendo emisiones indirectas. En esta tesis, el análisis sólo se limitará a contabilizar las emisiones directas producidas por la CS forestal considerada, ya que se pueden controlar y modificar en el sistema bajo estudio variando la configuración de la misma.

En la Figura 3.1 se puede observar los límites que se tuvieron en cuenta en la CS analizada. Las emisiones directas provenientes de este tipo de industrias, según el informe base que se toma como referencia (Climate change working group of ICFPA, 2.005), provienen de diferentes fuentes: principalmente corresponden a emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O de calderas de fuel, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O de las calderas de biomasa y emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O provenientes del transporte. En este caso, también se opta por contabilizar las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por las calderas de biomasa, con el objetivo de analizar su magnitud y el impacto que tienen en la CS estudiada, dado que, como se mencionó en la sección anterior, hay una discusión de base sobre si se deberían considerar como neutras o no. En este sentido, se pretende estudiar si existen diferencias significativas entre ambas situaciones.

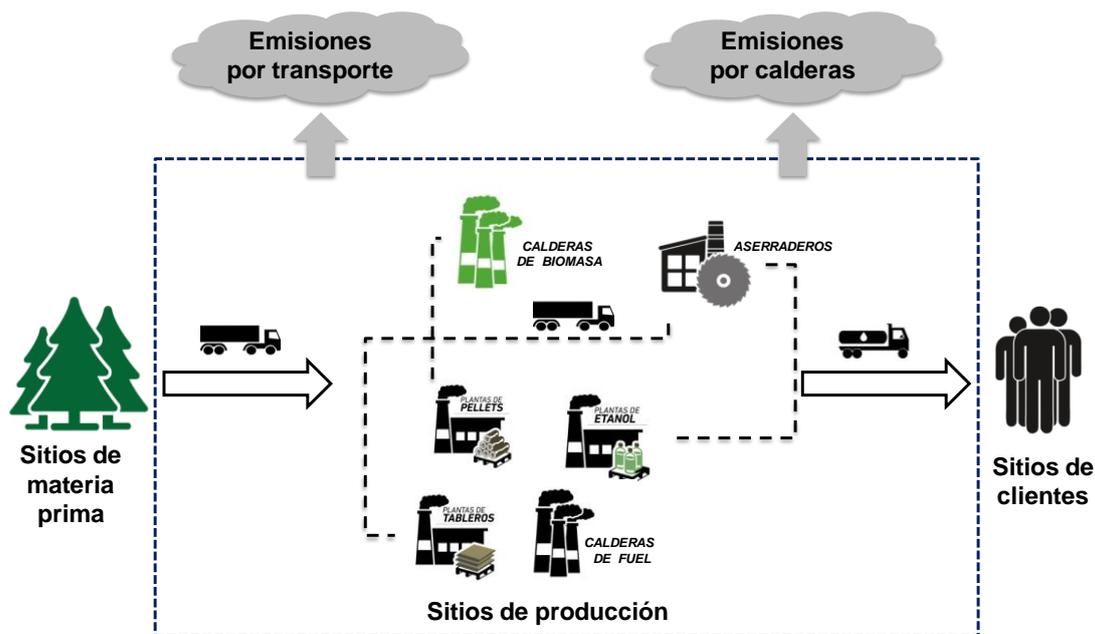


Figura 3.1. Límites para el análisis de emisiones de GEI.

Los factores de emisiones que se utilizan provienen del ICFPA y equivalen a  $0,87 \text{ kgCO}_2 \text{ km}^{-1}$ ,  $4 \cdot 10^{-4} \text{ kgCH}_4 \text{ km}^{-1}$  y  $3 \cdot 10^{-5} \text{ kgN}_2\text{O km}^{-1}$  para el transporte,  $95.420 \text{ kgCO}_2 \text{ TJ}^{-1}$ ,  $30 \text{ kgCH}_4 \text{ TJ}^{-1}$  y  $4 \text{ kgN}_2\text{O TJ}^{-1}$  para la combustión de biomasa y  $74.770 \text{ kgCO}_2 \text{ TJ}^{-1}$ ,  $2 \text{ kgCH}_4 \text{ TJ}^{-1}$ ,  $0,6 \text{ kgN}_2\text{O TJ}^{-1}$  para las calderas de fuel. Para el transporte, con el fin de calcular la cantidad de cada tipo de gas emitido, se multiplica el factor de emisión por los kilómetros recorridos; mientras que, para las calderas, se multiplica por la energía producida.

Una vez obtenidas las emisiones, los GEI distintos del  $\text{CO}_2$  ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) son convertidos a su valor equivalente en dióxido de carbono, multiplicando la masa del gas en cuestión por su PCG, el cual está referenciado al PCG del  $\text{CO}_2$ . El  $\text{CH}_4$  y el  $\text{N}_2\text{O}$  son gases con efecto invernadero con PCG de  $21 \text{ kgCO}_2/\text{kgCH}_4$  y  $310 \text{ kgCO}_2/\text{kgN}_2\text{O}$ , respectivamente. Esto significa que, en una media de tiempo de 100 años, cada kg de  $\text{CH}_4$  calienta el planeta Tierra 21 veces más que la misma masa de  $\text{CO}_2$  y cada kg de

$\text{N}_2\text{O}$ , 310 veces más. Por lo tanto, para llevar todo a kg de  $\text{CO}_2$  se multiplica el total de emisiones de  $\text{CH}_4$  por 21 y las de  $\text{N}_2\text{O}$  por 310.

En el capítulo 2 se trabajó el diseño de la CS forestal con un modelo de un sólo objetivo, el cual busca optimizar la perspectiva económica del sistema analizado. En el mundo real, la mayor parte de los problemas tienen varios objetivos, posiblemente en conflicto entre sí, que se desean conseguir de manera simultánea. Los problemas donde se considera más de un objetivo se denominan multiobjetivo, y su propósito es optimizar todos ellos de forma simultánea. Existen distintos métodos para abordar este tipo de problemas. Un enfoque muy utilizado es transformarlos en modelos mono-objetivo, incorporando algunos de los objetivos originales como restricciones adicionales del modelo, los cuales deben satisfacerse en niveles apropiados. Otro enfoque es generar una única función objetivo que los contemple a todos asignando un peso o ponderando cada uno de los objetivos.

En general, un problema multiobjetivo no tiene una única solución eficiente, sino que tiene un conjunto de soluciones eficientes. A este conjunto de soluciones se lo denomina frontera de Pareto. Para obtenerla existen diversas metodologías, siendo una de las más habituales el método  *$\varepsilon$ -constraint* que se utilizará en esta tesis. Este método elige una función como único objetivo y los objetivos restantes se transforman en restricción/es paramétricas. Mediante una variación sistemática de los límites de esta/s restricción/es, se pueden obtener los diferentes elementos de la frontera de Pareto (Laumanns y otros, 2.006).

La idea del método es modificar el valor permitido para el límite de las restricciones correspondientes a los objetivos que han sido incorporados al modelo, en una cantidad constante y predefinida. Para cada objetivo que se maneja como una restricción, se

buscan sus valores mínimo y máximo y se introduce al modelo como una restricción paramétrica. Se define un salto  $d$  para cada objetivo, con el cual se irá variando sucesivamente el límite impuesto a la restricción paramétrica de modo de cubrir sistemáticamente el rango definido entre los valores mínimo y máximo calculados. Se optimiza en sucesivas resoluciones la función elegida como único objetivo, donde en cada una de ellas se restringe el valor de la/s restricción/es paramétrica/s al valor mínimo más  $d$ , en la primera iteración, valor mínimo mas  $2d$  en la segunda iteración, y así sucesivamente hasta llegar al valor máximo de la/s función/es objetivo agregadas como restricciones. De esta forma se genera una serie de puntos que conforman la frontera de Pareto.

En este capítulo se trabaja con tres objetivos: el beneficio económico, como se utilizó en el capítulo anterior, y se agregan las emisiones de GEI provenientes del transporte y de la generación de energía. Para analizar los compromisos existentes, el primero de ellos se utiliza como función objetivo mientras que las emisiones son traducidas a restricciones paramétricas.

### **3.3 Modelo matemático**

El modelo matemático utilizado en este capítulo es igual al del capítulo 2 (Sección “Modelo matemático”, Ecs. ((2.1)-(2.19))), sólo que presenta algunas variantes vinculadas a elementos mencionados en la sección anterior.

Estas variantes están relacionadas con la generación de energía a partir de los diferentes tipos de calderas y con el cálculo de las emisiones de GEI. Por otro lado se producen modificaciones menores como la posibilidad de utilizar troncos como materia prima para la producción de pellets, con el objetivo de introducir otra alternativa en el diseño

de la CS. En este caso sólo se agrega el factor de conversión de tronco a pellets en la Ec. (2.3) y se modifica la relación  $C(f)$  presentada en el capítulo 2. Por otro lado se consideran demandas mínimas para los diferentes productos.

### 3.3.1 Calderas

En este capítulo se analiza la configuración e instalación de las calderas necesarias para generar energía en los diferentes procesos, a diferencia del capítulo anterior, donde esto fue considerado implícitamente en el costo de instalación y producción de cada unidad.

Las calderas son instaladas para generar la energía térmica necesaria en cada uno de los procesos de las diferentes unidades productivas: aserraderos, plantas de etanol, pellets y tableros. Pueden ser calderas que requieran biomasa o fuel oil como combustible, y la energía producida se utiliza por las diferentes unidades de producción instaladas en un sitio  $l$ . De la Ec. (3.1) se estima que la energía necesaria en un sitio  $l$  ( $E_{cald_l}$ ) se obtiene teniendo en cuenta los requerimientos para elaborar todos los productos en dicho sitio, los cuales son proporcionales a la cantidad de producto elaborado a través de la constante  $enec_p$  para cada producto  $p$ :

$$E_{cald_l} = \sum_{\substack{p,f \\ p,f \in V(p,f)}} enec_p Prod_{lfp} \quad \forall l \quad (3.1)$$

En este punto se define un nuevo conjunto  $n$  que corresponde al tipo de caldera de biomasa. Se consideran dos tipos: de cogeneración ( $n_1$ ) y hornos de incineración ( $n_2$ ). Ambas generan energía térmica para ser utilizada en los diferentes procesos, pero las

primeras tienen la posibilidad de generar, además, energía eléctrica que se puede enviar a la red. Para las calderas de fuel oil existe un único tipo, el cual no permite enviar energía a la red.

Cada una de estas calderas se puede instalar con diferentes capacidades  $m$ , las cuales se seleccionan de un nuevo conjunto discreto  $MF_m$ ,  $MH_m$  y  $MC_m$  que corresponden a las capacidades disponibles para las calderas de fuel oil, los hornos de incineración y las de cogeneración, respectivamente.

Las calderas de biomasa ubicadas en  $l$  pueden utilizar como combustible pellets de madera ( $pellboil_{l'}$ ) de las plantas ubicadas en  $l'$  o subproductos provenientes de los diferentes aserraderos ( $Bypboil_{l'q}$ ) ubicados en  $l'$ ; por lo tanto la energía total generada, a partir de este tipo de combustible, en el sitio  $l$  por las calderas de dimensión  $m$  y tipo  $n$  ( $Ebiom_{nml}$ ) es igual a:

$$\sum_{nm} Ebiom_{nml} = \sum_{l'q} Bypboil_{l'q} cc_q + \sum_{l'} pellboil_{l'} ccp \quad \forall l \quad (3.2)$$

donde  $cc_q$  es la capacidad calorífica de los distintos subproductos  $q$  y  $ccp$  es la capacidad calorífica de los pellets.

Esto modifica la Ec. (2.7) del capítulo 2 a la expresión que se muestra a continuación, donde se admite que se utilicen pellets fabricados en plantas ubicadas en otros sitios  $l'$ :

$$Byp_{lq} \geq \sum_{\substack{l'fp \\ (p,f) \in V(p,f) \\ (q,p) \in R(q,p)}} Byp_{l'qfp} + Bypboil_{l'q} + Byp_{sle_{lq}} \quad \forall l, q \quad (3.3)$$

Para la instalación de las calderas de biomasa, se define una nueva variable binaria  $y_{b_{nml}}$  que vale 1 si se instala la caldera de biomasa de tipo  $n$  y tamaño  $m$ , y 0 en caso contrario. Si se instala la caldera, entonces la energía generada no puede exceder la capacidad máxima  $P_{maxcb_{nm}}$  de la caldera, donde  $f_{conv}$  es un factor de conversión:

$$E_{biom_{nml}} \leq y_{b_{nml}} P_{maxcb_{nm}} f_{conv} \quad \forall n, m, l \quad (3.4)$$

De igual manera, para las calderas de fuel se define la variable binaria  $y_{f_{ml}}$ , que vale 1 si se instala la caldera de fuel de tamaño  $m$  y 0 en caso contrario. Si se instala la caldera, la producción de energía no puede exceder la capacidad máxima,  $P_{maxcf_m}$ :

$$E_{fuel_{ml}} \leq y_{f_{ml}} P_{maxcf_m} f_{conv} \quad \forall m, l \quad (3.5)$$

Se puede instalar a lo sumo una caldera de cada tipo (fuel oil, horno de incineración o de cogeneración) en cada sitio  $l$ , pero pueden coexistir calderas de diferente tipo (Ec. (3.6)-(3.8)).

$$\sum_m y_{f_{ml}} \leq 1 \quad \forall l \quad (3.6)$$

$$\sum_m y_{b_{n,ml}} \leq 1 \quad \forall l \quad (3.7)$$

$$\sum_m yb_{n_2,ml} \leq 1 \quad \forall l \quad (3.8)$$

Para las calderas de cogeneración es necesario plantear una relación en cada sitio  $l$  entre la energía térmica utilizada en los sitios de producción ( $E_{biom}l_l$ ) y la energía enviada a la red eléctrica ( $Q_{red}l$ ). La suma de ambas es equivalente a la energía generada por las calderas de cogeneración ( $E_{biom_{n1}ml}$ ), Ec. (3.9).

$$\sum_m E_{biom_{n1}ml} = E_{biom}l_l + Q_{red}l \quad \forall l \quad (3.9)$$

Finalmente, las calderas de fuel generan una cantidad de energía  $E_{fuel_{ml}}$  en el equipo de dimensión  $m$  en el sitio  $l$  para lo cual utilizan una cantidad de combustible  $fuel_l$  que tiene una capacidad calorífica representada por  $cc_{fuel}$ .

$$\sum_m E_{fuel_{ml}} = fuel_l cc_{fuel} \quad \forall l \quad (3.10)$$

De acuerdo a la Ec. (3.11) la energía térmica consumida en  $l$  por las plantas de producción, debe ser satisfecha por la generación de la caldera de cogeneración ( $E_{biom_{n1}ml}$ ), los hornos incineradores ( $\sum_m E_{biom_{n2}ml}$ ) y las calderas de fuel ( $\sum_m E_{fuel_{ml}}$ ).

$$E_{cald}l \leq E_{biom_{n1}ml} + \sum_m E_{biom_{n2}ml} + \sum_m E_{fuel_{ml}} \quad \forall l \quad (3.11)$$

### 3.3.2 Demandas

Como se menciona al principio de esta sección, en este capítulo se agrega una demanda mínima para cada producto: madera, tableros, pellets y etanol. Esto se realiza con el objetivo de analizar la perspectiva ambiental: si no existiese una condición de este tipo, el mejor valor para las emisiones de GEI, al minimizarlas, sería nulo, dado que sin producción, en la CS no existen emisiones.

Por lo tanto la Ec. (2.10) del capítulo 2 se transforma en la Ec. (3.12), donde  $Dlmin_{lp}$  es la demanda mínima requerida para cada producto  $p$  en el sitio  $l$ . La Ec. (3.12) determina que el total de los productos  $p$  que proviene de las distintas unidades de producción  $l'$  y se entrega en los sitios  $l$  donde se encuentran los clientes ( $Qp_{l'l'pf}$ ) no puede exceder la máxima demanda existente y debe ser mayor a la demanda mínima requerida:

$$Dlmin_{lp} \leq \sum_{\substack{l'f \\ (p,f) \in V(p,f)}} Qp_{l'l'pf} \leq Dlmax_{lp} \quad \forall l, p \quad (3.12)$$

### 3.3.3 Función objetivo económica

La función objetivo económica ( $Bf$ ) es igual al modelo del capítulo previo sólo que en este caso se agregan los ingresos vinculados a la venta de energía a la red eléctrica con un valor  $Eprice$ . Por lo tanto la Ec. (2.14) pasa a ser la Ec. (3.13)

$$I = \sum_{\substack{l'pf \\ (p,f) \in V(p,f)}} Ql_{l'pf} Sle_p + \sum_{lq} Bypsl_{lq} Bypprice_q + \sum_l Qred_l Eprice \quad (3.13)$$

En cuanto a los costos, ahora se incluyen aquellos vinculados a la instalación de las calderas. Por lo tanto la Ec. (2.17) pasa a ser la Ec. (3.14).

$$Ic = \sum_{\substack{itf \\ t \in T_f}} CCF_{ft} \alpha_f (Plmax_{itf})^{\beta_f} w_{itf} + \sum_{lmn} Cb_{mn} \alpha_b (Pmaxcb_{mn})^{\beta_b} yb_{nml} + \sum_{lm} Cf_m \alpha_f (Pmaxcf_m)^{\beta_f} yf_{ml} \quad (3.14)$$

El costo de instalación y mantenimiento de las calderas se presentan en el segundo y tercer término, donde  $Cb_{mn}$  y  $Cf_m$  representa el factor de capital para las calderas de biomasa y fuel, respectivamente, en el horizonte de tiempo, que incluye amortización y mantenimiento de cada unidad. Por otro lado,  $\alpha_b$ ,  $\beta_b$ ,  $\alpha_f$  y  $\beta_f$  son coeficientes de costo para las calderas de biomasa y fuel, en ese orden.

### 3.3.4 Función objetivo ambiental: emisiones de GEI

Como se menciona en la sección 2, en este caso se trata de un problema multiobjetivo. Anteriormente se presentó la función objetivo de la variable económica; a continuación se presentan las dos funciones objetivos vinculadas a la perspectiva ambiental: la suma de las emisiones provenientes del transporte y las de la generación de energía a partir de las calderas. Para realizar los cálculos correspondientes se llama,  $G$  a un conjunto que representa los diferentes tipos de gases emitidos  $g$ , donde, en este caso, se consideran  $g_1=CO_2$ ,  $g_2=CH_4$  y  $g_3=N_2O$ .

Las emisiones provenientes del transporte  $Emtrans$  se calculan como se muestra en la Ec. (3.15):

$$\begin{aligned}
 Emtrans = \sum_g Eq_g Et_g ( & \sum_{\substack{l' rfp \\ (p,f) \in V(f,p) \\ f \in C(f)}} Qh_{l' rfp} distll_{l'} + \sum_{\substack{l' fg \\ f \in D(f)}} Qres_{l' f} distll_{l'} + \\
 & \sum_{\substack{l' qfp \\ (p,f) \in V(p,f) \\ (q,p) \in R(q,p)}} Byprm_{l' qfp} distll_{l'} + \sum_{\substack{l' lpf \\ (p,f) \in V(p,f)}} Ql_{l' lpf} distll_{l'} + \sum_{l'} pellboil_{l'} distll_{l'} ) \quad (3.15)
 \end{aligned}$$

Las emisiones por el transporte son proporcionales a la distancia recorrida y a la cantidad transportada. Se obtienen multiplicando dicho valor para transportar materia prima, residuos, subproductos y productos, por la cantidad de emisiones del gas de tipo  $g$ , generadas por unidad de distancia recorrida ( $Et_g$ ). Para llevar todo a una misma unidad, se multiplica por un factor ( $Eq_g$ ) que transforma las emisiones de cada tipo de gas a toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes, factores que están vinculados al PCG como se mencionó en la sección anterior.

Las emisiones provenientes de las calderas  $Emcald$  son proporcionales a la cantidad de energía generada. Para calcularlas se utilizan factores de emisión diferentes para las calderas de biomasa ( $Eb_{ng}$ ) y para las de fuel ( $Ef_g$ ). Por lo tanto, la totalidad de las emisiones generadas por las calderas se obtiene como se muestra en la Ec. (3.16). Una vez obtenida la cantidad total de los gases del tipo  $g$  generados en la producción de energía, se multiplica por  $Eq_g$  para llevar todo a toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes.

$$Emcald = \sum_g Eq_g \left[ \sum_{ml} Efuel_{ml} Ef_g + \sum_{nml} Ebiom_{nml} Eb_{ng} \right] \quad (3.16)$$

### 3.3.5 Modelo multiobjetivo

El problema a resolver es del tipo multiobjetivo, donde se consideran tres objetivos distintos:  $Bf$ ,  $Emtrans$  y  $Emcald$ . Como se mencionó anteriormente, al diferir los órdenes de magnitud de las emisiones generadas por el sistema se tiene en cuenta cada una de ellas como una función objetivo distinta.

Para resolver este problema se utiliza la metodología  $\varepsilon$ -constraint. En este procedimiento se maximiza o minimiza una función objetivo,  $Bf$  para este caso, mientras que las otras,  $Emtrans$  y  $Emcald$ , pasan a ser restricciones paramétricas. Se realiza una serie de pasos que se describen en detalle a continuación.

En el primero, se maximiza la función objetivo económica,  $Bf$ , sin considerar restricciones vinculadas a las otras funciones objetivo. A partir de la solución se calculan los valores de  $Emtrans$  y de  $Emcald$ , que corresponderán a la cantidad máxima de emisiones generadas. Estos valores se denominan  $\varepsilon_{1max}$  y  $\varepsilon_{2max}$ , para las emisiones de transporte y calderas, respectivamente, y permiten determinar las emisiones en aquel caso en el cual no se ha establecido ninguna condición al respecto, por lo que se asume que es el peor caso posible desde la perspectiva ambiental.

En el segundo paso se resuelven dos modelos de optimización: se minimizan las emisiones de transporte ( $Emtrans$ ), por un lado, y, por otro lado, se minimizan las emisiones provenientes de las calderas ( $Emcald$ ). No se incluye, en ninguno de estos

casos, consideración alguna sobre el resultado económico. Si no se hubiese considerado una demanda mínima de los productos, el valor de ambas emisiones en este punto sería 0. Los valores obtenidos al considerar de manera separada cada una de las funciones objetivos ambientales representa la cantidad mínima de emisiones que puede generar el sistema. A estos se los denomina  $\varepsilon_{1min}$  para aquellas provenientes del transporte y  $\varepsilon_{2min}$  para las de las calderas.

El tercer paso consiste en transformar las funciones objetivo ambientales en restricciones paramétricas. Se debe decidir cuantas soluciones  $h$  se quiere obtener o qué salto se va a tener en cuenta en el rango considerado. Se debe tener presente que, a partir de los cálculos previos, han quedado determinados dos rangos: entre  $\varepsilon_{1min}$  y  $\varepsilon_{1max}$  para las emisiones provenientes del transporte, y entre  $\varepsilon_{2min}$  y  $\varepsilon_{2max}$  para las de las calderas, en ambos casos entre el mejor y el peor caso posible desde el punto de vista ambiental. A partir de esto, se calculan  $d_1$  y  $d_2$  que corresponden al salto a considerar para la evaluación de las emisiones del transporte y de las calderas, respectivamente.

$$d_1 = \frac{\varepsilon_{1max} - \varepsilon_{1min}}{h} \quad (3.17)$$

$$d_2 = \frac{\varepsilon_{2max} - \varepsilon_{2min}}{h} \quad (3.18)$$

Usando estos valores  $d_1$  y  $d_2$ , las funciones objetivo  $Emtrans$  y  $Emcald$  pasan a ser restricciones paramétricas. Se resuelve ahora, sucesivamente, el problema multiobjetivo maximizando el  $Bf$  y exigiendo que las emisiones de transporte y de las calderas cumplan determinadas condiciones, como se representa a continuación:

$$\max_{x,y} Bf(x, y)$$

$$\text{sujeto a: ec. (2.1-2.6, 2.8, 2.9,} \\ 2.11-2.13, 2.15 \\ 2.16, 2.18, 2.19, \\ 3.1-3.18)$$

$$Emtrans \leq \varepsilon_1 \\ Emcald \leq \varepsilon_2 \\ x \in \mathfrak{R}, y \in \{0,1\}$$

Se resuelve un conjunto de problemas que corresponden a todas las posibles combinaciones de valores de  $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$ , correspondientes a los límites paramétricos para las emisiones de transporte y calderas, respectivamente. Los posibles valores de  $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$  se calculan teniendo en cuenta los saltos discretos  $d_1$  y  $d_2$ , determinados previamente, entre los valores límite  $\varepsilon_{1min}$  y  $\varepsilon_{1max}$  para las emisiones provenientes del transporte, por un lado, y entre  $\varepsilon_{2min}$  y  $\varepsilon_{2max}$  para las de las calderas, por el otro.

De esta forma se calculan los valores que vinculan las tres funciones objetivos:  $Bf$ ,  $Emcald$  y  $Emtrans$ , con los cuáles puede obtenerse una superficie de Pareto.

### 3.4 Caso de estudio

El caso de estudio es el mismo utilizado en el capítulo 2, al cual se modifican y agregan los elementos que se mencionan a continuación: cantidad de sitios considerados, demanda mínima de los clientes, la disponibilidad de troncos como materia prima para la elaboración de pellets, la posibilidad de generar energía a partir de diversas fuentes y los factores de emisión de GEI.

En este capítulo se consideran en total 12 sitios, y no 19 como en el capítulo 2. Esto se realiza para facilitar el análisis del modelo dado que, de esta manera, las alternativas para la configuración de la CS son más acotadas. Al disminuir los posibles sitios para la instalación de unidades productivas también se disminuye la demanda máxima a un 50% de los valores utilizados en el capítulo 2. Los sitios 17, 18, 19 y 110 son de consumidores y 11, 13, 14 y 15 son de materia prima, los restantes son sitios intermedios. En total hay 12 sitios (11-112).

Las demandas mínimas para los diferentes productos se muestran en la Tabla 3.1, mientras que el factor de conversión de troncos a pellets es el mismo que de subproductos a pellets.

Sitio	Producto				
	$p1$ [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]	$p2$ [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]	$p3$ [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]	$p4$ [T año <sup>-1</sup> ]	$p5$ [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]
17	7.500	22.500	12.750	2.250	13.500
18	30.000	7.500	15.000	3.000	12.000
19	22.500	25.500	13.500	2.700	15.000
110	3.750	8.250	10.500	1.500	0

Tabla 3.1. Demandas mínimas consideradas en el capítulo 3.

Las capacidades máximas de las plantas son las que se muestran en Tabla 3.2.

Tamaño	Aserraderos [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]	Tableros [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]	Pellets [T año <sup>-1</sup> ]	Etanol [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]
t1	54.000	80.000	26.000	70.000
t2	18.000	25.000	9.000	30.000
t3	7.000	15.000	5.000	15.000

Tabla 3.2. Tamaños máximos de las unidades de producción.

En cuanto a las calderas, existen 4 posibles tamaños diferentes para cada una de ellas, los cuáles se presentan en la Tabla 3.3.

<b>Capacidad máxima [MW]</b>			
Tamaños	Calderas de cogeneración	Hornos de incineración	Calderas de fuel
m1	15	5	8
m2	30	15	20
m3	50	30	60
m4	65	45	80

Tabla 3.3. Capacidades máximas para los diferentes tipos de calderas.

### 3.5 Resultados

La sección de resultados se divide en dos subsecciones. La primera de ellas tiene como objetivo analizar el comportamiento del sistema considerando diferentes alternativas en las calderas y en las emisiones provenientes de la generación de energía a partir de biomasa. En la siguiente subsección se estudian los compromisos existentes entre las perspectivas económica y ambiental a partir del modelo multiobjetivo planteado anteriormente.

Es importante aclarar que en la subsección siguiente no se utiliza la formulación multiobjetivo planteada en la sección “Modelo multiobjetivo”. En este caso, para analizar las alternativas se maximiza la función objetivo económica presentada anteriormente y solamente se contabilizan las emisiones de transporte y de las calderas. En la segunda subsección se estudian los compromisos existentes entre los resultados considerando las perspectivas económica y ambiental mediante la metodología  $\epsilon$ -*constraint* a través de la formulación multiobjetivo.

### 3.5.1 Alternativas en la generación de energía

Para analizar diferentes cuestiones vinculadas a las calderas, se plantean cuatro escenarios donde se proponen alternativas en la generación de energía para el sistema bajo estudio. En todos estos casos se utilizan las ecuaciones planteadas, con algunas variantes que se mencionan para cada escenario.

- Escenario 1: sólo existe la posibilidad de generar energía a partir de calderas de fuel. En este caso la  $Pmaxcb_{nm}$  es equivalente a 0 para todos los tipos y tamaños de calderas de biomasa.
- Escenario 2: sólo existe la posibilidad de generar energía a través de calderas de biomasa, donde se consideran las emisiones de CO<sub>2</sub> de dichas calderas. En este caso la  $Pmaxcf_m$  es equivalente a 0 para todos los tamaños.
- Escenario 3: sólo existe la posibilidad de generar energía a través de calderas de biomasa, donde se consideran neutras las emisiones de CO<sub>2</sub> de dichas calderas. En este caso la  $Pmaxcf_m$  y la  $Eb_{ngl}$  son equivalentes a 0 para todos los tamaños.
- Escenario 4: existe la posibilidad de generar energía con ambas calderas pero las emisiones de CO<sub>2</sub> de las calderas de biomasa se consideran neutras. En este caso el valor de  $Eb_{ngl}=0$ .

Los resultados muestran que la distribución de troncos usados como materia prima varía notablemente en cada uno de los casos analizados. En la Figura 3.2 se puede observar que en el escenario 1 se destina una mayor cantidad a la producción de etanol. El escenario 2 y 3 presentan una variación significativa frente a los otros. En primer lugar, son los casos en el que se destina mayor cantidad de troncos a la producción de madera. Esto se debe a la necesidad de generar una cantidad superior de subproductos para usarlos como combustible en las calderas y poder cubrir los requerimientos de energía. También se observa que, con este mismo objetivo, se destinan más troncos a la producción de pellets en comparación con otros casos, con el fin de producir mayor cantidad para enviar parte de estos a las calderas. Con el fin de aumentar la producción de estos productos la cantidad de troncos destinados a etanol, en estos escenarios, disminuye. En los cuatro casos la materia prima es usada en su totalidad, lo mismo sucede con los residuos generados en las zonas de materia prima.

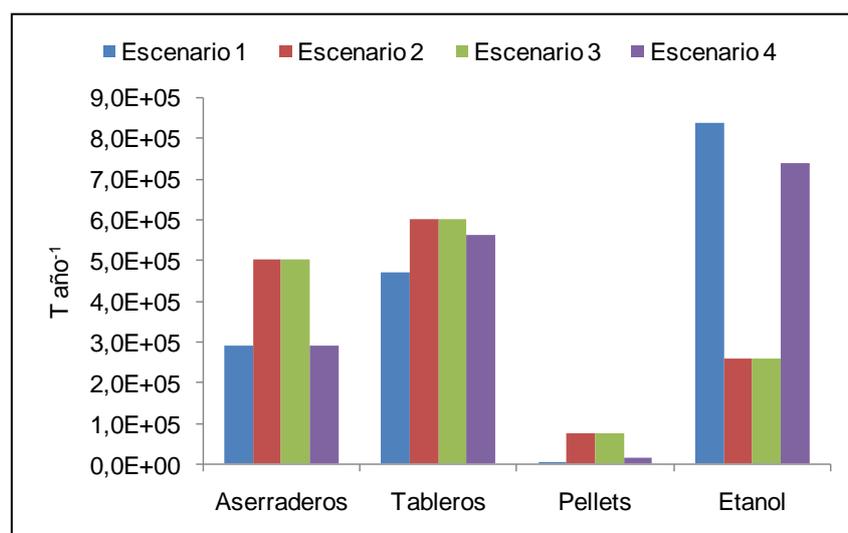


Figura 3.2. Destino de los troncos para los diferentes escenarios.

En la Figura 3.3 se puede observar que la producción varía cuando se consideran las diferentes posibilidades. Si se compara el escenario 1 con el 4 se puede observar que la producción de tableros aumenta levemente y la de etanol disminuye. Esto se debe a que, ante la posibilidad de generar energía a partir de calderas de biomasa, es económicamente más factible instalar otra planta de tableros aumentando su producción y que varias de ellas se alimenten con esta energía, que mantener la producción de etanol que consume proporcionalmente mayor cantidad de este recurso.

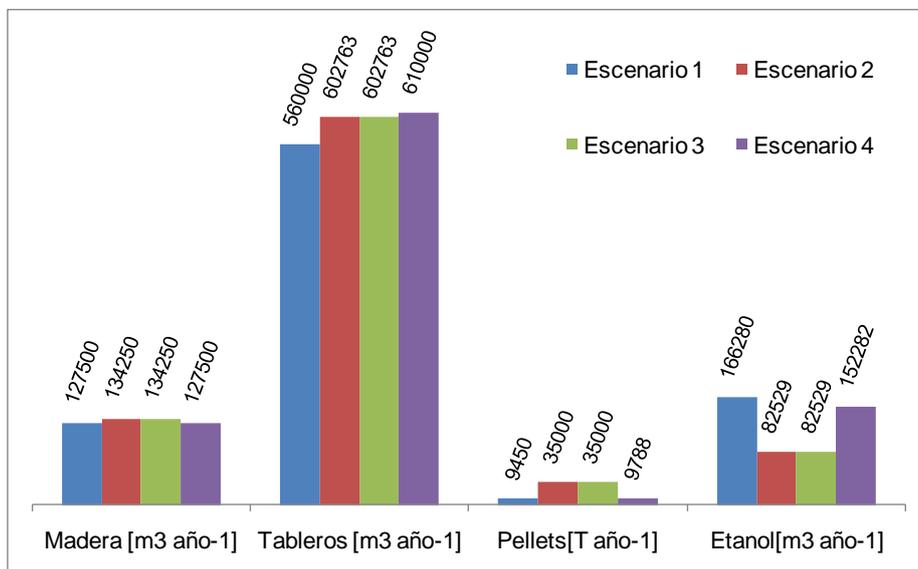


Figura 3.3. Producción en cada escenario.

El destino de los subproductos generados en los aserraderos se distribuye de manera muy diferente en cada caso, según muestra la Figura 3.4. En el escenario 1 se destina en su totalidad a la producción de tableros mientras que en el segundo y tercer escenario a las calderas de biomasa. En el escenario 4 se reparte entre la producción de tableros y generación de energía en las calderas.

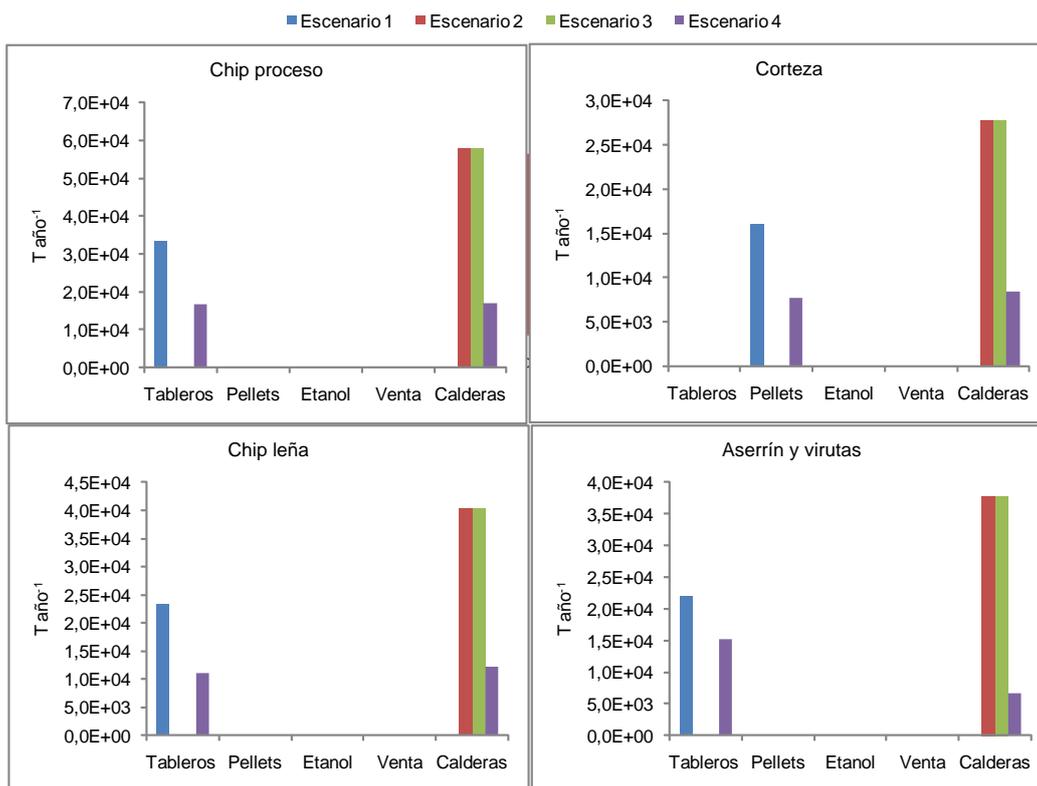


Figura 3.4. Destino de los diferentes subproductos en cada escenario.

En la Tabla 3.4 se puede observar la cantidad de energía total generada para cada escenario. En el escenario 2 y 3 se produce menor cantidad de energía mientras que en el 4 se generan  $3,94 \cdot 10^9$  MJ año<sup>-1</sup> con ambos tipos de caldera; el 88% se genera con calderas de fuel y el porcentaje restante con hornos de incineración. Estas diferencias en la generación de este recurso para cada caso se deben a los requerimientos específicos para cada tipo de proceso productivo, siendo la producción de etanol la que mayor energía necesita en comparación con los demás productos. Por este motivo en los escenarios 2 y 3 la cantidad disminuye notablemente, dado que la producción de etanol es menor. En ningún caso se vende energía a la red. Esto se debe a que el precio al que se compra la energía eléctrica no es atractivo frente a los costos de la misma.

En la Tabla 3.4 se muestran las unidades de producción y las calderas instaladas en cada sitio para los diferentes escenarios. Si se compara el escenario 1 con el escenario 4, se puede observar que, en este último, la configuración de las plantas varía y se instalan calderas de biomasa, opción admitida en ese escenario. Esto se debe a que conviene utilizar parte de los subproductos para la generación de energía en el mismo sitio donde se producen, en vez de trasladarlos para usarlo como materia prima en otra ubicación.

Sitio	Escenario 1						Escenario 2 y 3						Escenario 4					
	Plantas			Calderas			Plantas			Calderas			Plantas			Calderas		
	f1	f2	f3	f4	Cf	Cb	f1	f2	f3	f4	Cf	Cb	f1	f2	f3	f4	Cf	Cb
11	t1	t1			m1		t1	t1				m2.n2		t1		t2	m2	
12	t2						t1	t1				m1.n2	t1	t1				m1.n2
13		t1		t1	m3		t1	t1	t1	t3		m2.n2		t1		t2	m3	
14	t2	t1		t1	m3		t1	t1		t3		m3.n2	t1	t1	t3		m3	
15	t1	t1	t3	t2	m2		t1	t1	t2	t3		m2.n2		t1		t2	m2	
16							t1	t1				m1.n2						
18		t1			m1								t2	t1	t3		m1	
19		t1	t3		m1		t1	t1				m1.n2	t1	t1				m1.n2
110		t1			m1		t1	t1				m1.n2	t2	t1				m1.n2
	<b>Bf [M\$ año<sup>-1</sup>]</b>				<b>120.521</b>		<b>Bf [M\$ año<sup>-1</sup>]</b>				<b>90.598</b>		<b>Bf [M\$ año<sup>-1</sup>]</b>				<b>123.000</b>	
	Energía generada [MJ año <sup>-1</sup> ]				4,05 10 <sup>9</sup>		Energía generada [MJ año <sup>-1</sup> ]				2,83 10 <sup>9</sup>		Energía generada [MJ año <sup>-1</sup> ]				3,94 10 <sup>9</sup>	

\*Cf=calderas de fuel, Cb=calderas de biomasa

Tabla 3.4. Localización y tamaño de plantas y calderas.

De la Figura 3.5 y de la anteúltima fila de la Tabla 3.4 se puede concluir que el *Bf* también se ve afectado de acuerdo al escenario elegido y la consiguiente configuración de la CS. El escenario 1 es solamente un 4% menor al del 4, mientras que al considerar sólo la posibilidad de instalar calderas de biomasa el beneficio disminuye 25% aproximadamente.

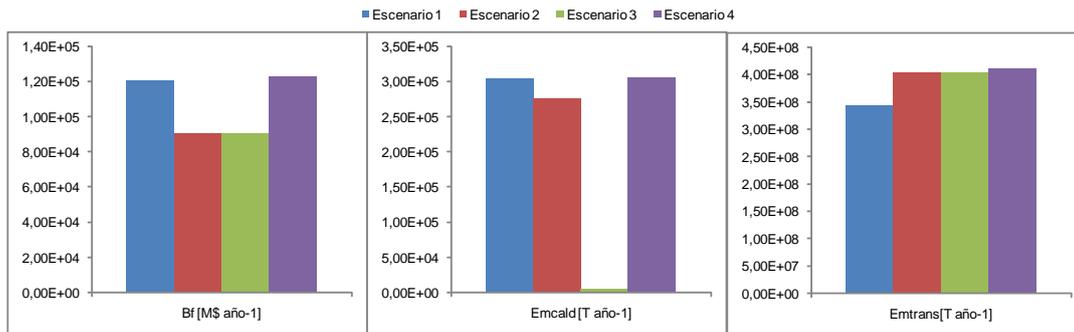


Figura 3.5. Bf, Emcald y Emtrans de los diferentes escenarios.

Las emisiones de transporte (*Emtrans*) varían de acuerdo a los diferentes escenarios (Figura 3.5). En el escenario 4 es dónde existe mayor emisión, principalmente por los productos que se envían a los clientes y las distancias que se recorren. En los escenarios 2 y 3, si bien se produce menos, la necesidad de transportar biomasa para generar energía aumenta las emisiones de este tipo, si se compara con el escenario 1. En cuanto a las emisiones de las calderas (*Emcald*) existen diferencias entre los diferentes escenarios. La mayor cantidad de GEI emitida a la atmósfera por esta fuente se da en los escenarios 1 y 4, existiendo una mínima diferencia entre estos. En ellos la generación de gases es mayor que en los escenarios 2 y 3 donde sólo se considera la generación de energía a partir de biomasa. Por otro lado, si se compara el escenario 2 y el 3 se puede observar que el hecho de considerar neutras las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de la energía de biomasa es significativo, siendo casi despreciables en este último.

A partir de los resultados mostrados anteriormente, se puede concluir que las alternativas que se consideren en la generación de energía para el diseño de la CS forestal modifican notablemente la configuración de la misma. Esto se debe principalmente al uso y destino de los diferentes subproductos generados en los aserraderos. Por otro lado, considerar las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de las calderas

de biomasa, es significativo en las emisiones totales de GEI generadas en un sistema. El modelo propuesto permite realizar diferentes análisis sobre cuestiones vinculadas a la CS forestal y a las emisiones de GEI. En la sección siguiente se analizan los compromisos existentes entre la perspectiva económica y ambiental.

### **3.5.2 Perspectiva económica vs ambiental en el diseño de la CS**

En esta sección se estudian los compromisos existentes considerando simultáneamente los objetivos de beneficio económico y de emisiones de GEI en la CS forestal. Mediante la metodología  $\varepsilon$ -*constraint* se analizan diferentes soluciones maximizando  $Bf$  e incorporando como restricciones  $Emcald$  y  $Emtrans$ . Para realizar este análisis se considera el escenario 4 de la sección anterior, teniendo en cuenta ambos tipos de calderas, con el fin de mostrar los compromisos existentes entre los objetivos contemplados. El mismo estudio se podría replicar para los demás escenarios sin mayores dificultades.

En la Figura 3.6 se muestra la superficie de Pareto generada considerando el enfoque multiobjetivo a partir de los resultados presentados en la Tabla 3.5. Los valores de esta tabla surgen de resolver todos los casos posibles como se presenta en la sección 3.5, considerando un valor de  $h$  igual a 6.

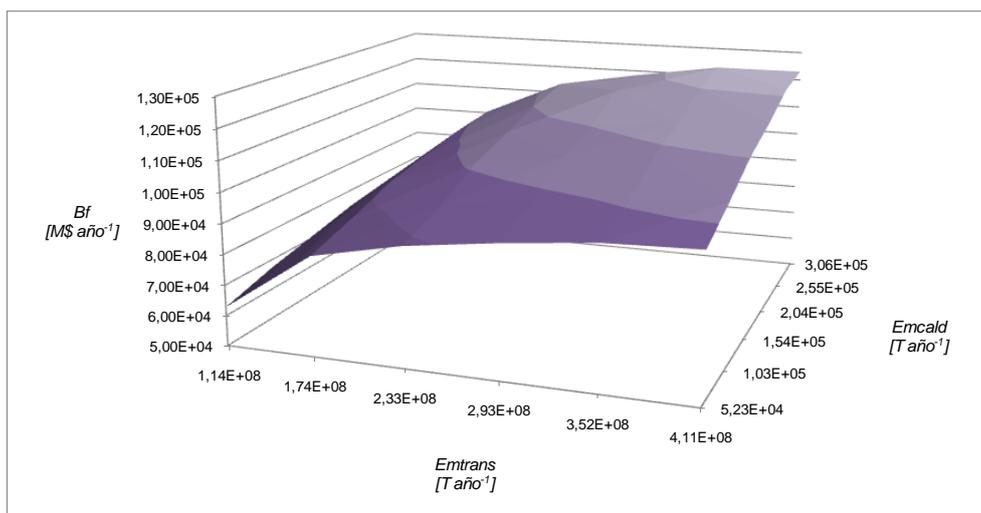


Figura 3.6. Superficie de Pareto considerando el objetivo económico y los objetivos de emisiones de GEI.

		<i>Emtrans</i> [T año <sup>-1</sup> ]					
		1,14 10 <sup>8</sup>	1,74 10 <sup>8</sup>	2,33 10 <sup>8</sup>	2,93 10 <sup>8</sup>	3,52 10 <sup>8</sup>	4,11 10 <sup>8</sup>
<i>Emcald</i> [T año <sup>-1</sup> ]	5,23 10 <sup>4</sup>	62.831	82.622	88.753	92.580	95.616	96.573
	1,03 10 <sup>5</sup>	67.366	87.524	94.182	97.869	101.006	103.145
	1,54 10 <sup>5</sup>	70.780	92.846	101.292	105.647	108.671	110.274
	2,04 10 <sup>5</sup>	74.280	95.858	105.758	110.033	113.295	115.061
	2,55 10 <sup>5</sup>	74.243	98.801	110.290	117.292	119.972	121.120
	3,06 10 <sup>5</sup>	74.280	100.487	113.344	118.443	122.970	123.049

Tabla 3.5. Valores del *Bf* para los diferentes valores de *Emtrans* y *Emcald*.

De la Tabla 3.5 se observa que a medida que aumentan *Emtrans* y *Emcald*, aumenta el *Bf*. En la superficie obtenida se puede ver que existe una pendiente más pronunciada en los puntos donde se exige menor cantidad de ambas emisiones de GEI, mientras que al acercarse al valor de máximo *Bf* la pendiente es más leve. Esta situación puede analizarse en mayor detalle a partir de las Figura 3.7 y 3.8 donde se grafican, en color violeta, las curvas pertenecientes a la última fila y columna de la tabla, respectivamente.

Esto equivale a graficar  $Bf$  vs  $Emcald$ , en la Figura 3.7, sin considerar restricciones para  $Emtrans$ ; mientras que en la Figura 3.8 se presenta  $Bf$  vs  $Emtrans$ , o sea sin considerar restricciones para  $Emcald$ . En ambas, en tono rojizo, se grafican los valores del  $Bf$  mostrados en la diagonal resaltada con el mismo color en la Tabla 3.5. Esta curva representa los resultados de  $Bf$  cuando las restricciones que corresponden a los dos tipos de emisiones se mueven de manera simultánea, con idéntico valor de  $h$ .

En ambas figuras se puede observar que, para el mismo valor de  $Emcald$  y de  $Emtrans$ , el  $Bf$  es menor sobre la curva roja que sobre la curva violeta. Esto quiere decir que considerar ambas emisiones de manera discriminada y simultánea tiene repercusión en el  $Bf$  de la CS y en su configuración. Si se observa la Tabla 3.5 se puede ver que para un tolerancia máxima de  $Emcald$  igual a  $2,04 \cdot 10^5 \text{ T año}^{-1}$ , sin considerar las  $Emtrans$ , el  $Bf$  es equivalente a  $115.061 \text{ M\$ año}^{-1}$ ; mientras que si se considera un valor máximo para las emisiones de transporte equivalente a  $2.93 \cdot 10^8 \text{ T año}^{-1}$ , el  $Bf$  disminuye a  $110.033 \text{ M\$ año}^{-1}$  (Fila 4, columna 4 y 6).

Por otro lado los últimos puntos de las curvas de color rojizo presentadas en las Figuras 3.7 y 3.8 tienen una pendiente menor que los primeros, esto implica que se puede mejorar notablemente el desempeño ambiental sin desmejorar sensiblemente el beneficio económico. Por ejemplo, si se compara los dos últimos puntos de la curva de color rojizo, disminuir las emisiones de transporte y calderas 15% sólo requiere una reducción del 3% en el  $Bf$ .

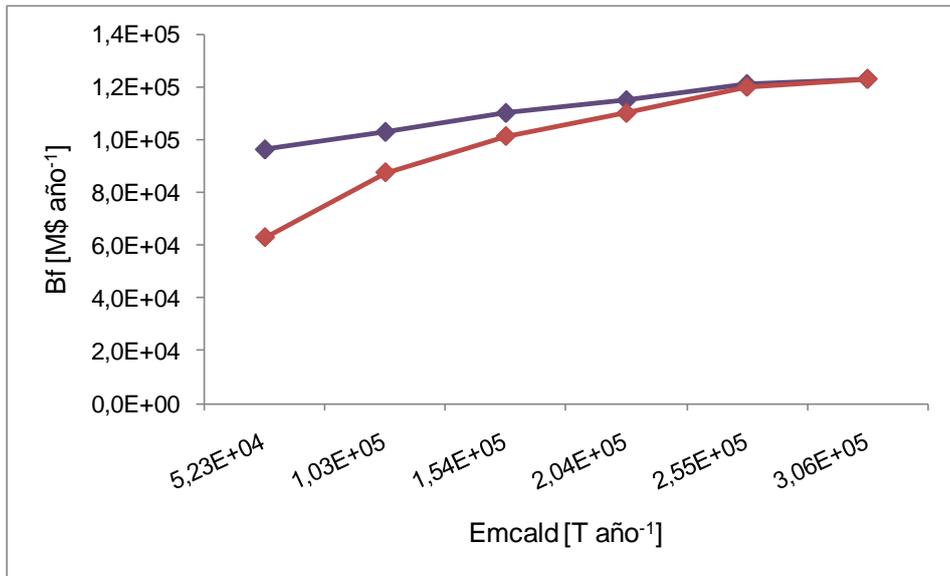


Figura 3.7. Emisiones de caldera vs beneficio económico.

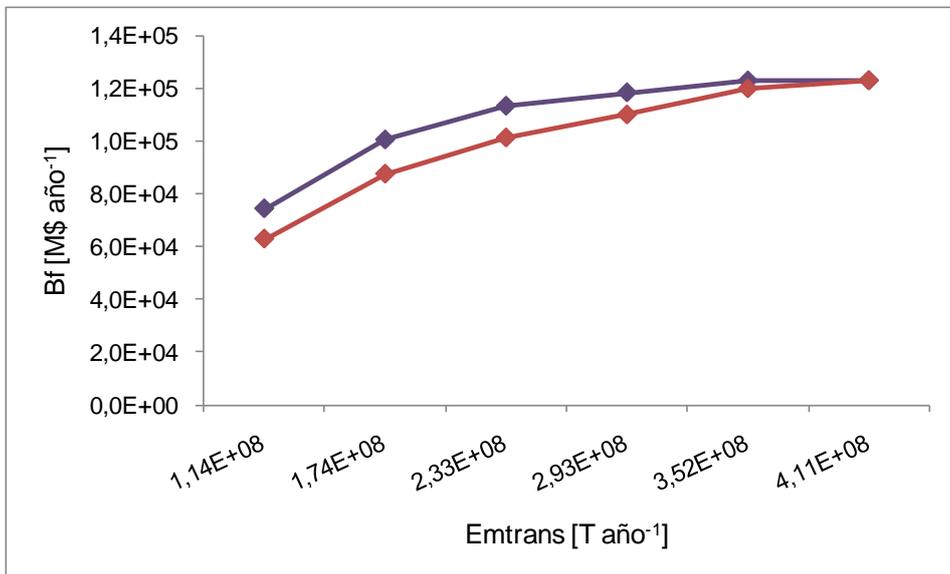


Figura 3.8. Emisiones de transporte vs beneficio económico.

Para analizar cómo se modifica la configuración de la CS a lo largo de la superficie de Pareto se seleccionan dos puntos aleatorios a modo de ejemplo. Queda claro que este análisis puede ser extendido a cualquier punto de dicha superficie y también que, el grado de detalle con el cual se puede construir la misma es una decisión de quienes realicen el estudio, en función de la cantidad de intervalos en los cuales se divide el rango de las emisiones. El punto 1 corresponde a la fila 2 y columna 2 de la Tabla 3.5, mientras que el punto 2 a la fila 4 y columna 5.

En la Tabla 3.6 se pueden observar las características principales de ambas soluciones. En primer lugar se advierte las sensibles diferencias entre las mismas, tanto en lo que hace a la ubicación de las plantas, su dimensión, las calderas instaladas, entre otras. Evidentemente imponer condiciones ambientales a la configuración de la CS afecta las soluciones óptimas halladas. La diferencia más importante entre los puntos seleccionados está en la producción de pellets y tableros. Cuando se permite emitir mayor cantidad de GEI provenientes de las calderas, punto 2, la producción de tableros aumenta dado que, como una mayor parte de la energía se obtiene a partir del fuel, los subproductos que en el punto 1 se utilizaban como combustible se destinan a materia prima. Una situación similar sucede con los troncos que se usan para elaborar pellets en el primer punto, disminuyendo su producción. Esto se debe a que se genera menor cantidad de energía a partir de biomasa y no se los utiliza como combustible.

Por otro lado, se puede observar que los aserraderos en el punto 1 son de mayor tamaño que en el 2, además las unidades productivas se distribuyen en seis sitios en vez de siete. Esto se debe a que se permite emitir menor cantidad de GEI generados por el transporte, y por lo tanto se deben recorrer distancias más acotadas.

<i>Sitio</i>	<b>Punto 1</b>						<b>Punto 2</b>					
	<i>Plantas</i>				<i>Calderas</i>		<i>Plantas</i>				<i>Calderas</i>	
	f1	f2	f3	f4	Cf	Cb	f1	f2	f3	f4	Cf	Cb
11	t1		t1	t2		m2.n2	t2	t1				m1.n2
12							t2	t1				m1.n2
13	t1			t1		m3.n2	t2	t1	t3	t1	m3	
14		t1		t1	m3				t2	t1	m3	
15	t1	t1	t2	t3		m2.n2	t1	t1		t3		m2.n2
19	t1	t1				m1.n2	t2	t1				m1.n2
110	t2	t1				m1.n2	t2	t1				m1.n2
<b>Producción</b>						<b>Producción</b>						
	Madera [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]				127.500		Madera [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]				127.500	
	Tableros [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]				249.237		Tableros [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]				522.763	
	Pellets [T año <sup>-1</sup> ]				35.000		Pellets [T año <sup>-1</sup> ]				14.000	
	Etanol [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]				160.809		Etanol [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]				153.589	
	<b>Bf [M\$ año<sup>-1</sup>]</b>				<b>87.524</b>		<b>Bf [M\$ año<sup>-1</sup>]</b>				<b>115.061</b>	

\*Cf=calderas de fuel, Cb=calderas de biomasa

Tabla 3.6. Configuración de dos puntos de la superficie de Pareto.

Los resultados obtenidos en esta sección muestran que considerar las emisiones de GEI en el diseño de la CS produce modificaciones en la configuración de la misma.

### 3.6 Conclusiones

En este capítulo se desarrolló un modelo para el diseño óptimo de una CS forestal considerando la perspectiva ambiental, para la cual se utiliza las emisiones de GEI como criterio de performance. Se realizaron dos análisis, el primero de ellos referente a las diferencias existentes en aspectos vinculados a la generación de energía y el segundo relacionado a los compromisos entre la perspectiva ambiental y económica. Para este último se utilizó la metodología  $\varepsilon$ -constraint involucrando tres objetivos, donde se ha elegido maximizar la función objetivo económica, mientras que los indicadores del desempeño ambiental son transformados en restricciones paramétricas.

Considerar las emisiones de GEI en el caso de estudio, permite analizar el beneficio económico teniendo en cuenta las emisiones que genera el sistema. A partir de los primeros resultados se puede observar que es importante considerar alternativas en la generación de energía para este tipo de industria. En este sentido, quedó demostrado que no es lo mismo, para la CS, considerar sólo calderas de fuel o de biomasa, que los dos tipos de calderas. Al tener en cuenta ambas opciones, mejora la rentabilidad del sistema dado que se genera un aprovechamiento integral de todos los recursos existentes. Si bien no se profundizó en la alternativa, la posibilidad de vender energía puede ser interesante si la demanda ajusta sus precios.

En cuanto a contabilizar las emisiones de CO<sub>2</sub> de las calderas de biomasa como neutras o no, quedó demostrado que las diferencias son significativas en el caso bajo estudio. Por este motivo al contemplar la generación de este tipo de energía y determinar las emisiones de GEI en la CS es importante analizarlo desde ambos puntos de vista.

A partir de los resultados obtenidos del problema multiobjetivo se pudo observar que considerar el aspecto ambiental produce variaciones significativas del diseño de la CS: la localización, tamaño y tipo de unidades productivas, la cantidad de producto elaborado, tamaño de calderas, entre otros. Sin embargo es posible mejorar notablemente el desempeño ambiental con pequeñas variaciones en la rentabilidad del sistema, lo cual significa un aspecto positivo para el diseño de la CS si se busca disminuir las emisiones de GEI. En este sentido la herramienta presentada permite evaluar opciones a la hora de decidir la configuración de la CS en relación al aspecto ambiental considerado.

A partir del modelo generado se pueden estudiar diversas soluciones que busquen un equilibrio entre la perspectiva ambiental y económica a la hora de pensar en el diseño de la CS.

En cuanto al indicador emisiones de GEI se puede decir que es una herramienta de fácil implementación metodológica, si se quiere medir el PCG de un sistema. Además es sencillo de comprender: a menor valor de emisiones de GEI, menor PCG del sistema bajo análisis. Una de las desventajas que presenta esta medida es que no considera otros aspectos vinculados al ambiente, por ejemplo, contaminación del agua, erosión de los suelos, modificación del paisaje, aspectos sociales del entorno, entre otros. Esto lo torna un indicador parcial para la perspectiva ambiental, dado que sólo tiene en cuenta el PCG. Por otro lado, en general, todos los aportes parciales de GEI de las diferentes actividades del sistema bajo análisis son llevados a una sola unidad en la optimización de CS, mediante la suma de dichos valores. Esto hace que muchas veces se pierda la noción de los efectos que tiene cada una de ellas sobre el sistema global.

### Bibliografía

Cambero C., Sowlati T., 2014. Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives – A review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 36, 62-73.

Cambero C., Sowlati T., Pavel M., 2016. Economic and life cycle environmental optimization of forest-based biorefinery supply chains for bioenergy and biofuel production. *Chemical Engineering Research and Design* 107, 218-235.

Climate change working group of ICFPA, 2005. Calculation tools for estimating greenhouse gas emissions from wood products facilities, NC, USA.

European Environment Agency Scientific Committee, 2011. Opinion of the EEA Scientific Committee on Greenhouse Gas Accounting in Relation to Bioenergy.

Fan J., Gephart J., Marker T., Stover D., Updike B., Shonnard D., 2016. Carbon Footprint Analysis of Gasoline and Diesel from Forest Residues and Corn Stover using Integrated Hydrolysis and Hydroconversion. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 4, 284-290.

Hoekman S., Broch A., 2018. Environmental implications of higher ethanol production and use in the U.S.: A literature review. Part II – Biodiversity, land use change, GHG emissions, and sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, 3.159-3.177.

Iacovidou E., Velis C., Purnell P., Zwirner O., Brown A., Hahladakis J., Millward-Hopkins J., Williams P., 2017. Metrics for optimizing the multi-dimensional value of resources recovered from waste in a circular economy: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 166, 910-938.

Kajaste R., 2014. Chemicals from biomass e managing greenhouse gas emissions in biorefinery production chains e a review. *Journal of Cleaner Production* 75, 1-10.

Laumanns M., Thiele L., Zitzler E., 2006. An efficient, adaptive parameter variation scheme for metaheuristics based on the epsilon-constraint method. *European Journal of Operational Research* 169, 932-942.

Mälkki H., Virtanen Y., 2003. Selected emissions and efficiencies of energy systems based on logging and sawmill residues. *Biomass and Bioenergy* 24, 321-327.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2017. Inventario nacional de GEI, Argentina. <https://inventariogei.ambiente.gob.ar/files/inventario-nacional-gei-argentina.pdf>

Nakano K., Shibahara N., Nakai T., Shintani K. , Komata H., Iwaoka M., Hattori N., 2.018. Greenhouse gas emissions from round wood production in Japan. *Journal of Cleaner Production* 170, 1.654-1.664.

Sánchez-García S., Athanassiadis D., Martínez-Alonso C., Tolosana E., Majada J., Canga E., 2.017. A GIS methodology for optimal location of a wood-fired power plant: Quantification of available woodfuel, supply chain costs and GHG emissions. *Journal of Cleaner Production* 157, 201-212.

United Nations Environment Programme, 2.000. *The GHG Indicator: UNEP Guidelines for Calculating Greenhouse Gas Emissions for Businesses and Non Commercial Organizations.*

Wielgosinski G., Łechtanska P., Namiecinska O., 2.017. Emission of some pollutants from biomass combustion in comparison to hard coal combustion. *Journal of the Energy Institute* 90, 787-796.

**4 Consideraciones del entorno natural en el diseño y optimización de la CS, en el contexto de la metodología de Evaluación de Impacto Ambiental.**

*“La naturaleza se complace con la simplicidad. Y la naturaleza no es ninguna tonta”.*

*Isaac Newton*

## 4.1 Introducción

Desde los años 70 la perspectiva ambiental ha cobrado un importante reconocimiento por parte de diferentes países, gobiernos y ciudadanos como factor determinante para el progreso y calidad de vida de la humanidad. En este contexto, y en función de lograr sustentabilidad entre las actividades humanas y el funcionamiento del medio natural y social, es necesario implementar criterios y condiciones que permitan promover un desarrollo sustentable.

Las exigencias del mercado, la sociedad y los gobiernos en la protección del ambiente, se reflejan en acciones de las industrias e instituciones para una adecuada gestión ambiental (Zhu y Cote, 2.004) y en las normativas y metodologías que ponen en marcha distintas instituciones para cumplir objetivos ambientales satisfactorios.

Esta situación presenta un gran desafío para los sistemas de producción dado que implica no sólo cumplir con metas de productividad económica, sino hacerlo satisfaciendo requerimientos ambientales. Esta realidad genera la necesidad de congeniar criterios antagónicos.

En la actualidad, es habitual plantear los sistemas productivos desde el enfoque de CS, donde distintos actores, con intereses y objetivos diversos, son involucrados. En este contexto, estamos frente a un sistema amplio y complejo en el cuál crece notablemente la dificultad al congeniar intereses y objetivos económicos, y se complejiza aún más con la necesidad de considerar aspectos ambientales. Por lo tanto, no se trata sólo de lograr que una empresa cumpla con ciertos objetivos, sino que la operación conjunta e integrada de muchas organizaciones sea apropiada, tanto desde el punto de vista económico como ambiental.

En este contexto el diseño sustentable de la Cadena de Suministros (CS) juega un rol importante, campo que está adquiriendo creciente interés entre investigadores y profesionales dedicados a la operación y gestión de la misma.

A partir de ello, ha habido esfuerzos de diversos autores y organismos con el fin de definir el concepto de sustentabilidad para la CS. Algunos se refieren a ella con el término "Cadena de Suministros Verde (CSV)" o "Gestión Sustentable de la Cadena de Suministros (GSCS)", y la definen como "una extensión de la CS tradicional con el objetivo de reducir el impacto ambiental de un producto, servicio o proceso a lo largo de su ciclo de vida" (Deepa y otros, 2.017; Beamon, 1.999). Según Ahi y Searcy (2.013), la GSCS es una extensión de la CSV que involucra aspectos económicos, ecológicos y sociales en los negocios.

Para las Naciones Unidas, la sustentabilidad de la CS implica la administración de los impactos ambientales, sociales y económicos, y el estímulo de las buenas prácticas de gobierno, a lo largo del ciclo de vida de bienes y servicios. El objetivo de una CS responsable es "crear, proteger y cultivar el medio ambiente a largo plazo, el valor social y económico para todas las partes interesadas que participan en llevar productos y servicios al mercado" (ONU, 2.010).

Por lo tanto, se puede decir que el objetivo de una CS verde, a partir de los diversos conceptos expuestos anteriormente, es eliminar o minimizar el impacto ambiental negativo y el desperdicio de recursos desde la extracción y/o adquisición de materia prima hasta la generación o el uso final de los productos (Hervani y otros, 2.015; Ahi y Searcy, 2.015). Mientras que al hablar de CS sustentable, no sólo se considera el medio natural, sino también el aspecto económico y social.

Actualmente hay un gran reconocimiento en la literatura del impacto que tiene sobre el ambiente natural y la sociedad la gestión de la CS. Esto deriva en la necesidad de introducir el concepto de sustentabilidad en la optimización y diseño de la CS a través de diferentes herramientas, principalmente indicadores, y a través de enfoques sobre la CS. Dos de los más comúnmente utilizados son el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y el de "logística reversa".

En cuanto a los indicadores, uno de los más usados por los autores para introducir el concepto de cadena verde al análisis de la CS es el de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Ahi y Searcy, 2.015; Eskandapour y otros, 2.015), indicador que fue explicado y desarrollado en detalle en el capítulo 3.

Del análisis realizado en ese capítulo, se concluyó que el indicador de GEI tiene la ventaja de que es fácil de implementar y permite comparar diferentes procesos en cuanto a las emisiones gaseosas generadas; cuanto menor sean las mismas, menor será el PCG. Esta comparación se puede realizar porque la metodología permite llevar todo a una misma unidad, en este caso a CO<sub>2</sub> equivalente. En contrapartida, la desventaja que presenta es que no tiene en cuenta otros efectos en el ambiente como la emisión de efluentes líquidos, deterioro del suelo, efectos sobre la sociedad del entorno, entre otros. Por lo tanto es una herramienta prometedora a la hora de hacer comparaciones en función del PCG de un producto, proceso o actividad, pero si se quiere analizar la sustentabilidad del sistema es una herramienta deficiente ya que no considera los diversos efectos que tiene sobre su entorno, y limita el análisis a las emisiones gaseosas. Por otro lado, el hecho de llevar las diferentes emisiones a una unidad en común limita el análisis a un enfoque global, no permite considerar efectos particulares de las diferentes acciones llevadas adelante en el sistema.

Como se mencionó previamente, una herramienta utilizada para introducir sustentabilidad al análisis de CS es el enfoque de ACV, también conocido como "de la cuna a la tumba". Éste permite definir las cargas ambientales de un producto, proceso o actividad identificando y cuantificando el uso de energía y materiales, así como las descargas de desechos, evaluando los impactos de éstos en el ambiente y las oportunidades de mejora en relación al ciclo de vida completo (Hilohidari y otros, 2.017). Para su aplicación se considera el ciclo del producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta las etapas de extracción y procesamiento de materias primas, así como, la producción, transporte, distribución, uso, mantenimiento y reciclado. Para analizar la sustentabilidad del sistema mediante el enfoque de ACV es necesario implementar indicadores, donde las emisiones de GEI y el Eco Indicator 99 son los más comúnmente utilizados en CS (Barbosa y otros, 2.017). En este sentido el ACV es muy usado dado que permite identificar las diferentes entradas y salidas de materia y energía a lo largo del ciclo de vida de un producto, proceso o actividad. Por ejemplo, Miranda-Ackerman y otros (2.017) utilizan el ACV y las emisiones de GEI como herramienta para introducir variables ambientales al diseño y optimización de una cadena de producción agroalimentaria, específicamente de elaboración de jugos. Proponen un modelo multiobjetivo que considera las perspectivas económica y ambiental en el diseño de la CS. Los autores concluyen que es importante considerar este tipo de enfoque, si se compara con los de un sólo objetivo, dado que, en general, estos últimos sólo tienen en cuenta el aspecto económico y los intereses de la empresa, limitando el interés de otros actores sobre cuestiones vinculadas al medio natural y social. Duarte y otros (2.016) analizan una CS para la producción de bioetanol a partir del tronco de la planta de café, a través de un modelo de optimización matemática. En el mismo consideran aspectos económicos y ambientales, mediante el ACV y las emisiones de GEI. Los resultados

obtenidos demuestran que, cuando esta materia prima es utilizada para la generación de bioetanol, el ambiente recibe una influencia positiva dado que disminuyen las emisiones de GEI.

Otro indicador, además de las emisiones de GEI, presente en algunos trabajos es el Eco Indicator 99. El mismo surge de la implementación de un ACV y considera los materiales utilizados para la obtención del producto, proceso o actividad con el fin de analizar los impactos, que, en la metodología, se encuentran subdivididos en tres categorías de daño. Para obtener el valor del indicador, en una primera instancia, se contabiliza la cantidad de materiales utilizados para la elaboración del producto o servicio, y los procesos involucrados. De acuerdo al material y al tipo de proceso existe una serie de ecoindicadores, ya establecidos por la metodología, que, al multiplicarlos por la cantidad total de cada material utilizado, se logra una medida de impacto para cada una de las categorías que considera este indicador. La primera categoría considera el daño producido en la salud humana, y se expresa como el número de años de vida perdidos y el número de años que se ha sufrido una enfermedad; la segunda categoría tiene en cuenta el daño a la calidad del ecosistema y se expresa como la pérdida de especies en un área específica durante un tiempo determinado; la última categoría, que se define como daño a los recursos minerales, se expresa como el exceso de energía que se necesitará para extraer minerales y combustibles fósiles en el futuro.

Este indicador fue utilizado por Murillo-Alvarado y otros (2015) para evaluar la perspectiva ambiental en la optimización de la CS de biocombustibles a partir de residuos generados en la industria de tequila en México. Presentan un modelo multiobjetivo, considerando la variable económica y ambiental, ésta última a través del Eco Indicator 99. Los resultados muestran que la implementación de la biorefinería a partir de residuos lignocelulósicos trae soluciones atractivas en el uso de energía en

términos de rendimiento económico y ambiental. Santibañez-Aguilar y otros (2016) presentan una metodología para optimizar el planeamiento de una CS de conversión de biomasa en biocombustibles. Introducen la incertidumbre en el análisis y consideran el aspecto ambiental a través del uso del Eco Indicator 99.

El Eco Indicator 99 tiene como principal objetivo ser un soporte de decisión en el desarrollo de productos y procesos. Con los ecoindicadores propuestos, cualquier diseñador o gestor de productos puede analizar las cargas ambientales durante su ciclo de vida. Esta herramienta está destinada principalmente a empresas, con el fin de comparar alternativas de diseño del producto final (Goedkoop y otros, 1999). Como ventaja se tiene que esta evaluación se puede hacer con objetividad al utilizar la misma base de comparación. Sin embargo, su uso se limita a los ecoindicadores de la metodología, los cuales no consideran las características particulares del entorno. Esto hace que sea eficiente a la hora de analizar opciones de diseño del producto pero no es útil si se quiere estudiar los efectos directos que tiene sobre un ambiente en particular. Por otro lado, las predicciones de los factores de daño del Eco Indicator 99 se basan en predicciones empíricas, generando un alto grado de incertidumbre en el análisis (Santibañez-Aguilar y otros, 2014). Además, al igual que el caso de GEI, al llevar todo a una medida única se pierde noción de la magnitud de los efectos particulares de cada acción en la totalidad del sistema.

El enfoque de ACV demuestra ser muy útil para contabilizar las entradas y salidas de materia y energía en el ciclo de vida de un producto, proceso o actividad. La dificultad se presenta a la hora de decidir qué indicador implementar que permita analizar, de manera eficiente, la sustentabilidad del sistema. En este sentido, normalmente la relación entre los datos obtenidos de contabilizar la cantidad de materiales utilizados en un proceso, actividad o servicio se relacionan linealmente con los factores que

consideran los indicadores utilizados. De esta manera, los efectos sinérgicos de los contaminantes son descuidados, lo que puede subestimar la evaluación de impacto (Pieragostini y otros, 2.012).

Además del ACV, otro enfoque utilizado, complementario a este, con la CS es el de logística reversa. El mismo comprende el flujo de productos, información y dinero desde el punto de uso hasta el de origen, siendo contrario a la dirección tradicional del análisis sobre la CS que comprende desde el origen hasta el punto final (Gómez y otros, 2.012). Este enfoque implica considerar un conjunto de procesos encargados de recibir, evaluar, registrar y transformar o tratar los productos retornados por los clientes, para reutilizarlos en el medio industrial o disponerlos adecuadamente para reducir los impactos en el ambiente, la comunidad y generar beneficios económicos (Barker y Zabinsky, 2.008). Teniendo en cuenta este enfoque, Soleimani y otros (2.017) proponen un modelo multiobjetivo de optimización de una CS genérica que considera la devolución de los productos por parte de los consumidores los cuales pueden ser recuperados o reciclados con el objetivo de introducir sus partes nuevamente al proceso de producción. Consideran tres objetivos en la optimización: las emisiones de CO<sub>2</sub>, la reducción de horas perdidas de trabajo por accidentes laborales y el beneficio económico. La resolución de este modelo proporciona decisiones sobre la apertura o cierre de cada uno de los nodos de la red y el flujo óptimo de productos entre ellos, considerando criterios vinculados al ambiente. Mientras, Banasik y otros (2.017) proponen un rediseño a la estructura de una CS de producción de hongos a través de un modelo de optimización multiobjetivo. Demuestran que adoptando una CS de flujos reversos se incrementa en un 11% la rentabilidad del sistema. Estos últimos autores no trabajan con emisiones de CO<sub>2</sub>, sino con una métrica ambiental denominada pérdida de exergía que, según los autores, es simple y puede ser utilizada para medir el desempeño

ambiental. Por otro lado, este indicador permite cuantificar el impacto de las actividades productivas y expresarlas en una unidad singular, por ejemplo, megajoules, lo que representa una ventaja.

El enfoque de flujo reverso es interesante ya que considera la reutilización y reúso de diferentes materiales con el fin de disminuir los residuos generados por el sistema. Para introducir un análisis de sustentabilidad al sistema es necesario trabajar con algún indicador, como lo han hecho los autores citados y, al igual que con el ACV, la dificultad se presenta en decidir qué indicador utilizar que permita considerar de la mejor manera posible la sustentabilidad del diseño de la CS.

Por otro lado, hay esfuerzos aislados para desarrollar nuevas metodologías que introduzcan criterios ambientales en el diseño de la CS. Por ejemplo, el trabajo de Carvalho y otros (2017) tiene como objetivo considerar el concepto de eco-eficiencia en un modelo matemático para la optimización de la CS. Este concepto es introducido a través de diferentes criterios, por ejemplo aquellos considerados en la ISO 14001, como concentración geográfica de proveedores, packaging amigable con el ambiente, entre otros; éstos son elegidos por el evaluador y son traducidos a indicadores. Cada uno de estos aspectos es evaluado a través del grado de implementación que tienen en el ciclo productivo y se les asigna un peso de acuerdo a la magnitud de la variación del impacto, considerando el impacto negativo que generan las diferentes actividades de la empresa asignando un valor -1 (reducción del impacto ambiental negativo), 0 (no modifica) y 1 (aumento del impacto ambiental negativo). El trabajo permite tener una idea global sobre cuestiones ambientales, buscando características en cada unidad productiva que puedan generar un posible impacto ambiental. El aspecto positivo de esta metodología es que los autores traducen una variación del impacto: reduce, aumenta o no afecta, a un indicador ambiental. Al igual que el Eco indicator 99, el

indicador está limitado a considerar cuestiones vinculadas exclusivamente a los productos, procesos o actividades del sistema bajo análisis, sin considerar los efectos directos que tienen sobre el medio natural y social donde se llevan adelante al no tener en cuenta las características particulares del entorno inmediato.

En cuanto a las CS forestales, el enfoque de ACV y el indicador de emisiones de GEI son los más usados (Cambero y Sowlati, 2.014). Mirkouei y otros (2.017) utilizan este enfoque e indicador con el fin de diseñar, desde los puntos de vista económico y ambiental, una CS de generación de energía a partir de biomasa forestal mediante diferentes tipos de biorrefinerías. El trabajo consiste en analizar alternativas en la producción de energía y en el transporte. Los autores concluyen que las CS donde se consideran diversas alternativas en la producción de energía, comparadas con las tradicionales, permiten reducir los costos hasta un 24 % y las emisiones en un 5%. De la Fuente y otros (2.017) comparan CSs en Canadá y Suecia, desde la producción de plantines hasta la entrega de biomasa forestal a la industria. A través del ACV y las emisiones de GEI concluyen que las CS suecas estudiadas presentan un mejor desempeño desde el punto de vista ambiental. Este mismo enfoque e indicador son utilizados por García-Durañoma y otros (2.016) para estudiar la CS para la producción de pallets a partir de madera de pino, y por Liu y otros (2.017) para analizar la CS forestal para la producción de energía y bioetanol a través de una caldera de cogeneración.

De los indicadores mencionados anteriormente se puede observar que en todos los casos existe una tendencia de llevar los diferentes procesos y actividades a una medida común, con el fin de facilitar el objetivo de introducir sustentabilidad al diseño de la CS. Por ejemplo, en el caso de GEI las diferentes emisiones se llevan a toneladas CO<sub>2</sub> equivalente, en el caso de exergía se traduce todo en MJ y, en el caso del Eco Indicator

99, todo es llevado a un valor común para cada uno de los tres niveles de impacto. Si bien esto facilita el análisis en la CS, al considerar diferentes aspectos en una sola medida se pierde la singularidad de los efectos que produce cada uno de ellos en el entorno. Esta situación quedó demostrada en el capítulo 3 al analizar las emisiones de GEI en el transporte y en el funcionamiento de las calderas, por la diferencia de magnitud existente entre ambos. Esto puede llevar a compensar efectos o disimular impactos en aspectos particulares.

Por otro lado, si se considera la definición de impacto ambiental de la Real Academia Española: "el efecto sobre el entorno de una determinada actividad", está claro que si se desea evaluar el impacto ambiental es necesario conocer y considerar las características del entorno donde se lleva adelante una determinada acción. En este sentido, los indicadores presentados anteriormente no consideran las condiciones del entorno a la hora de evaluar la perspectiva ambiental. En el trabajo de Ahi y Searcy (2.015), luego de hacer un análisis sobre diferentes métricas utilizadas sobre la CS, se concluye que una de las deficiencias de los indicadores normalmente utilizados es que no tienen en cuenta los aspectos vinculados al entorno donde operan las unidades involucradas en la CS. Una de las principales características con las que deberían contar las herramientas que se centran en la sustentabilidad del ambiente, es que deben estar relacionadas al contexto en el que una entidad opera. Por ejemplo, no es lo mismo instalar una unidad productiva en una zona de valor turístico que en una zona industrial; tampoco es igual disponer los efluentes líquidos en un río de gran caudal que en uno de pequeño caudal, dado que la alteración sobre el ambiente es diferente en ambos casos.

Frente a esta situación, se advierte la ausencia de herramientas que evalúen eficazmente el impacto ambiental en la CS. En particular, para el problema de diseño de la CS, es necesario identificar los sitios de instalación de las diferentes unidades de producción y

sus dimensiones. Cada una de las ubicaciones propuestas pertenece a un ambiente que contiene elementos con características particulares: cursos de agua superficial, flora y fauna, calidad de aire, población, suelos y paisajes, entre otros. Al instalar una determinada industria se genera una modificación positiva o negativa en estos elementos. Para este análisis, es necesario proponer formas de medir el impacto ambiental, las cuáles no pueden excluir la consideración de las características particulares del entorno.

Ésta no es una tarea fácil, ya que, en general, tiene un alto grado de subjetividad (Fernández-Vítora, 2.010), no sólo por la relación de los diferentes efectos con el entorno sino también por los criterios considerados por los evaluadores a la hora de valorar el impacto. Por otro lado, es necesario considerar diferentes consecuencias sobre el ambiente, las cuales no pueden ser incluidas en una medida única dado que, en general, tienen diferentes unidades de medida y algunas hasta son difíciles de cuantificar. Además, para cada efecto es necesario manejar rangos de impacto y tolerancias máximas, las cuales dependen de las particularidades de cada entorno y, en algunos casos, de criterios específicos que desea adoptar el evaluador. A esto se le suma que, a la hora de hablar de diseño de la CS, se consideran participantes con actividades e intereses diversos, y distintos sitios de operación con sus características específicas.

Finalmente, el objetivo es que la evaluación de impacto ambiental pueda ser manejada con herramientas de optimización, las cuales permiten considerar un número importante de alternativas para elegir la más apropiada. Esto obliga a que todos los elementos previos tengan un formato adecuado para ser incluido en una formulación matemática que admita, por un lado, representar apropiadamente el problema desde la perspectiva ambiental y, por otro lado, encontrar una solución desde el punto de vista matemático. En función de todas estas particularidades, se puede afirmar que, al momento de evaluar

el impacto ambiental de una CS, se requiere de un gran esfuerzo de sistematización en el contexto de un programa de optimización. Para esto es necesario generar medidas numéricas que puedan ser incluidas en una herramienta de toma de decisión para poder evaluar los compromisos entre los elementos del problema.

El objetivo de este capítulo es proponer un enfoque innovador que, a diferencia de las herramientas utilizadas previamente en modelos de optimización de la CS, logre dar respuesta a las deficiencias y problemas antes citados.

Se plantea utilizar los fundamentos de la metodología de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) con el fin de considerar diferentes elementos del ambiente. A partir de esto, con el objetivo de evaluar los efectos sobre el entorno, se diseñará una serie de indicadores para cuantificar la alteración o modificación en el ambiente. Cada uno de estos indicadores considerará distintas características del medio natural y social, y particularidades de las plantas de producción. La ventaja de los indicadores propuestos es que permiten utilizar diferentes unidades de medida para cada efecto, y distintos rangos de impacto para cada sitio, con el fin de considerar las características de cada ambiente en particular. Por otro lado, a través de estos indicadores, se traduce e incorpora la subjetividad de la EIA de forma sistematizada en el diseño de CS. Esto admite la vinculación de las diferentes actividades llevadas adelante en los procesos de producción con el ambiente donde tiene efectos directos. Por otro lado, además de utilizar los indicadores, se propone considerar los límites permisibles por normativa para cada elemento del ambiente considerado.

El enfoque propuesto se implementa en una CS forestal, la misma que se analizó en capítulos anteriores, pero, dada su generalidad, se puede extender a otro tipo de industrias sin mayores dificultades.

#### **4.1.1 Evaluación de impacto ambiental**

Para llevar adelante un análisis ambiental que considere los impactos generados por la operación de las unidades de producción sobre un determinado ambiente, se propone una metodología basada en los conceptos y procedimientos utilizados para la EIA. La EIA es un proceso analítico que examina sistemáticamente las posibles consecuencias de la implementación de proyectos, programas y políticas (Glossary of Environment Statistics, 1.997) en el ambiente bajo estudio. Es un procedimiento previo a la toma de decisiones, que sirve para registrar y valorar de manera sistemática y global los efectos potenciales, o comúnmente denominados impactos ambientales, de un proyecto con el objeto de evitar desventajas para los componentes del ambiente en sus diferentes dimensiones.

En lo que hace a la implementación, las dimensiones del ambiente, en general, son dos y se clasifican en: medio natural y social. A su vez cada una de ellas contiene distintos componentes como: agua, aire, fauna, empleo, entre otros (Figura 4.1). El listado presentado en la Figura 4.1 no pretende ser exhaustivo, pues el enfoque permite contemplar otros elementos de acuerdo a cada problema.

Se dice que hay impacto ambiental cuando una acción, consecuencia de un proyecto o actividad, produce una alteración favorable o desfavorable, en alguno o varios componentes del medio. El impacto puede ser negativo o positivo, y se define como la diferencia entre la situación futura del componente modificado por la acción y la situación futura del componente sin modificar, es decir, la alteración que se produce sobre éste.

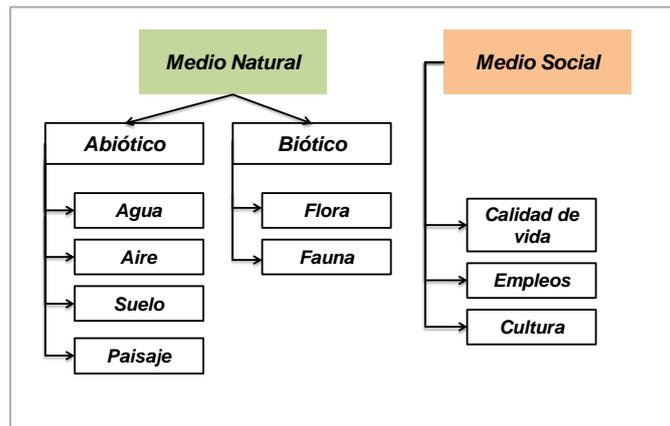


Figura 4.1 Dimensiones y algunos componentes del medio natural y social

Existen diferentes metodologías para llevar adelante la EIA. Algunas de las más utilizadas son: listas de chequeo, matrices causa-efecto, métodos basados en indicadores o índices, métodos "ad-hoc", entre otros (Fernández-Vítora, 2.010). El método de evaluación puede ser cualitativo, cuantitativo o cuali-cuantitativo, dependiendo de la metodología, pero siempre se encuentra ligado a la percepción y/o criterio del evaluador o grupo de evaluadores, admitiendo subjetividad en el análisis. Esta carga de subjetividad en la evaluación, lejos de ser negativa, refleja la complejidad de los sistemas. La misma proviene de las decisiones subjetivas que deben tomar los técnicos a la hora de hacer evaluaciones desde una perspectiva estratégica (Orea y Villarino, 2.013).

Para lograr una adecuada EIA, los indicadores de impacto ambiental son una herramienta muy utilizada. Se definen como características asociadas a un componente del ambiente que proporcionan información sobre la magnitud del impacto (Estevan, 1.983), mediante las cuales puede medirse la calidad ambiental de un determinado componente del medio y su modificación luego de la intervención sobre el mismo.

El indicador permite cuantificar un impacto a través de una expresión que vincula el estado del componente "con proyecto" y el estado del componente "sin proyecto". Por

ejemplo, un determinado suelo donde se instalará una industria, sin proyecto sería el suelo como se encuentra actualmente y con proyecto sería el suelo con la planta instalada. Para cada indicador de impacto es necesario disponer de una escala de valores asociados, que permita establecer la calidad ambiental en función de la magnitud del mismo.

Sobre todo lo expuesto anteriormente, el desafío que se presenta en este capítulo consiste en:

- Formular una metodología que considere distintas dimensiones y componentes del ambiente intervenido por el sistema bajo análisis, basados en los conceptos de EIA.
- Crear y utilizar indicadores que puedan ser sistematizados para implementarlos en un modelo de optimización matemática.
- Generar un procedimiento en el marco de un modelo de optimización matemática para el diseño de la CS.
- Permitir introducir la opinión del evaluador en el análisis ambiental a través del uso de indicadores, de manera sistemática.
- Considerar aspectos relacionados a la normativa de cada elemento analizado.
- Introducir sistemáticamente la subjetividad vinculada a la EIA en la optimización de la CS.
- Valorar alteraciones al ambiente de acuerdo a diferentes medidas, que consideren aspectos del entorno.

## 4.2 Metodología

Con el fin de desarrollar estos procedimientos y la implementación de los conceptos de EIA en un modelo de optimización matemática, se propone realizar el análisis para cada componente ambiental teniendo en cuenta la legislación existente y el conocimiento empírico. La diferencia fundamental entre ambas perspectivas es que la segunda permite incorporar valoraciones particulares de los evaluadores, las cuáles surgen de experiencias y percepciones subjetivas de los mismos, teniendo en cuenta cada ubicación o entorno específico y sus respectivas características. Algunas veces estos dos elementos tienen cuestiones comunes, y otras no; pero a la hora de evaluar aspectos vinculados al ambiente, el análisis debería realizarse desde el punto de vista legal y también teniendo en cuenta el conocimiento empírico. El primero de ellos implica considerar valores límites de disposición o emisión de contaminantes y/o cumplir con ciertos requisitos de infraestructura, localización, entre otros. Si bien estas exigencias buscan preservar la calidad ambiental del entorno, muchas veces sólo tienen en cuenta aspectos específicos al componente sobre el cual se genera la normativa, descuidando los restantes. Por ejemplo, en la normativa que se utiliza en el presente capítulo se podrá observar que los límites permitidos están en función del caudal del curso receptor sin considerar otras características del mismo; no es lo mismo un río de uso recreativo o uno que tenga una riqueza importante de fauna y flora, con otro que no lo tenga. En cambio, al analizar desde el conocimiento empírico, se consideran otras cuestiones vinculadas al entorno y a otros componentes, permitiendo un análisis más integral y logrando introducir la evaluación subjetiva de acuerdo a la experiencia del evaluador.

El esquema de la metodología propuesta se expone en la Figura 4.2. Es importante aclarar que la lista de componentes que se muestra no es taxativa, y que se pueden incluir con facilidad otros además de los expuestos en la imagen.

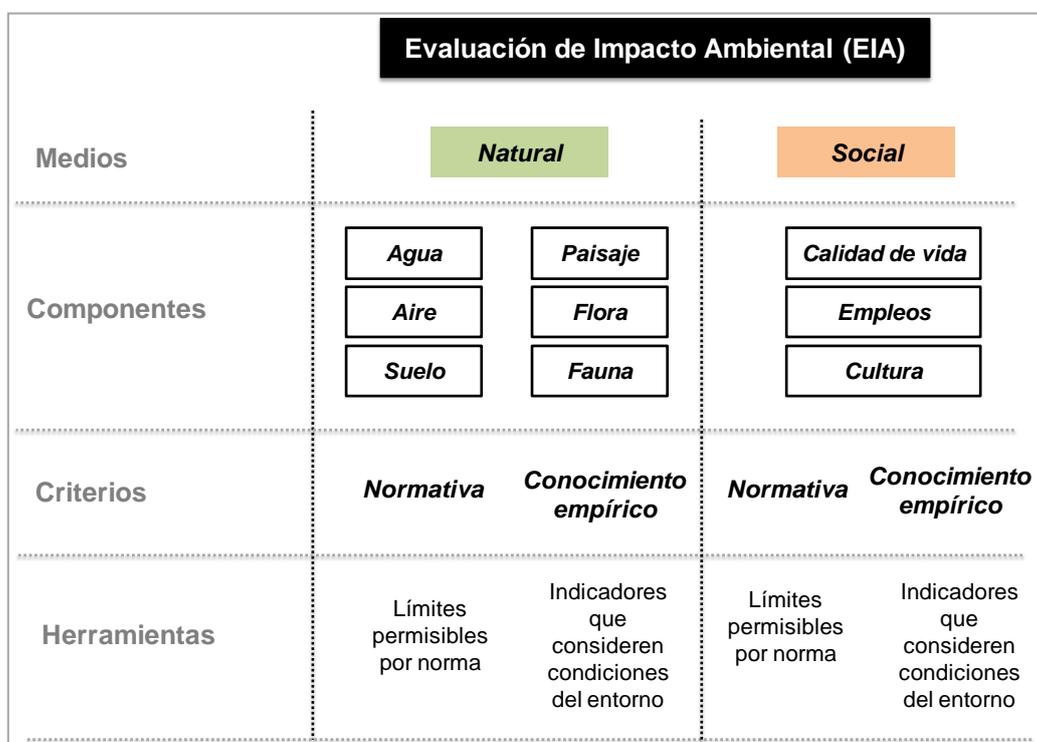


Figura 4.2. Metodología general.

A través de esta metodología, cada actividad que se realiza en el ambiente puede ser evaluada en cada componente de cada medio mediante criterios vinculados a la normativa existente y al conocimiento empírico sobre el mismo. En relación a la normativa, se propone utilizar como herramienta los límites permitidos por la ley que se adopte. En Argentina, corresponde a las provincias el dominio originario de los recursos naturales existentes en su territorio, por lo tanto las leyes que se propone adoptar son provinciales. Pero en caso de que se quisiera considerar alguna de nivel municipal o nacional, fácilmente podría implementarse con el mismo criterio.

Para introducir el conocimiento empírico a la EIA se diseñan indicadores que incluyen condiciones del entorno, a través de los cuáles se puede evaluar la modificación o alteración de un componente en el sitio a partir de la implantación del proyecto. Además, permite considerar distintos límites para cada indicador de acuerdo a criterios de admisibilidad determinados por el conocimiento empírico, en relación al ambiente considerado. Una de las ventajas es que a través de la metodología que se propone se pueden generar diferentes indicadores para cada uno de los componentes del medio considerado. Por otro lado, a partir de ellos, se pueden analizar diversos rangos de admisibilidad, para la modificación o alteración, que se encuentren vinculados con cada sitio en particular y con cada indicador.

Para cada componente considerado pueden existir uno o varios indicadores. Estos deberán cumplir con un valor límite permitido por ley, en caso de que existiera, y con un valor mínimo o máximo relacionado con el entorno particular, el cual tiene en cuenta el conocimiento del evaluador, que representa un valor límite para el indicador desarrollado para ese componente. Es importante aclarar que cada indicador tiene su particularidad. La sección siguiente se basa en los indicadores que se generaron para esta tesis. Pero, con la misma lógica, se pueden crear otros indicadores para otros componentes, siendo también factible la inclusión de varios indicadores para el mismo componente.

Usando esta metodología, en esta tesis se propone analizar los dos medios, natural y social. En este capítulo se desarrollan algunos indicadores para el medio natural, los cuales son implementados en un modelo matemático. En el capítulo siguiente, se presenta el indicador desarrollado para evaluar el medio social, mientras que la implementación considerando ambos medios, se expone en el capítulo 6.

#### **4.2.1 Metodología para el medio natural**

Para analizar el medio natural se estudian, en esta tesis, dos componentes: el agua superficial y el paisaje. Estos han sido elegidos teniendo en cuenta las diferencias conceptuales importantes con las que cuentan, dado que interesa mostrar cómo la metodología propuesta puede adaptarse a distintos perfiles de componentes y a diferentes tipos de indicadores. El primero de ellos se seleccionó por ser uno de los más desarrollados desde el aspecto legal, ya que existen diferentes normativas que regulan los efluentes líquidos en cada provincia. Por otro lado, se caracteriza por ser uno de los componentes que fácilmente se puede cuantificar y para el cual se dispone de diversas mediciones que caracterizan su calidad. El paisaje fue elegido por no contar con medidas que lo permitan cuantificar y por tratarse de un componente con un alto grado de subjetividad a la hora de evaluarlo. Por lo tanto, a partir de ambos, se muestra cómo representar de manera general componentes muy diferentes para su cuantificación, y cómo incluirlos en el diseño de la CS mediante un modelo de programación matemática.

##### **4.2.1.1 Componente agua superficial**

Las aguas superficiales son aquellas que se encuentran sobre la superficie del suelo, como los ríos, arroyos, lagos y lagunas. En este punto se descarta el agua subterránea ya que Argentina cuenta con gran cantidad de cursos superficiales, siendo los efluentes líquidos de la industria forestal generalmente vertidos en ellos y excepcionalmente en cursos subterráneos. El impacto ambiental sobre este componente se produce, principalmente, por los efluentes líquidos que generan las diferentes industrias a lo largo del proceso, y son vertidos a los cursos de agua para su disposición final. Existen diferentes medidas del grado de contaminación que permiten caracterizar la calidad del

agua; algunas de ellas se definen en la Tabla 4.1. Éstas se obtienen a partir de una medición, mediante ensayos de laboratorio, con diferentes instrumentos, etc.

<i>Medida</i>	<i>Definición</i>
<b>Demanda Biológica de Oxígeno [DBO]</b>	Es la cantidad de oxígeno necesaria para que una población microbiana heterogénea estabilice la materia orgánica biodegradable presente en una muestra de agua residual. Representa una medida indirecta de la concentración de la materia orgánica e inorgánica degradable o transformable biológicamente.
<b>Demanda Química de Oxígeno [DQO]</b>	Es una medida de la cantidad de oxígeno consumido en la oxidación química de la materia orgánica, biodegradable o no, presente en una muestra de agua.
<b>Sólidos Suspendidos Totales [SST]</b>	Es la cantidad de materia que permanece como residuo después de una evaporación, entre 103 y 105 grados centígrados de una muestra de agua. Es importante como indicador puesto que su presencia disminuye el paso de la luz a través del agua evitando su actividad fotosintética en las corrientes, importante para la producción de oxígeno.

Tabla 4.1. Algunas medidas del grado de contaminación del agua.

En Argentina existen normativas sobre la calidad de los efluentes que se disponen en los cursos de agua, las cuales buscan conservar tanto la calidad ambiental del lugar como la calidad de vida de sus habitantes. En función de esto, para este componente, se estudian dos cuestiones: aquellas vinculadas a las consideraciones de la ley, o normativa, y aquellas relacionadas a la modificación o alteración generada mediante el conocimiento empírico, tal como se presentó en la Figura 4.2.

a) *Consideraciones de la ley*

La legislación sobre los recursos hídricos en Argentina depende de cada provincia; esto hace que existan diferencias entre las normativas. Al presentar gran disparidad entre ellas, en esta tesis se adopta la legislación perteneciente a la provincia de Santa Fe, debido a las consideraciones que presenta en función de las diferentes medidas de calidad de agua. Por ejemplo, esta normativa diferencia el límite máximo para cada medida del grado de contaminación en relación a las características del curso receptor involucrado y del efluente emitido, característica que no se considera en otros casos. Sin embargo, con la metodología presentada, cualquier otra normativa se puede incluir fácilmente.

La norma adoptada es la Resolución n° 1.089/82, la cual se presenta en el Anexo I de la presente tesis. En la misma se busca establecer un control sobre los vertidos líquidos residuales a desagües, cuerpos de aguas subterráneos y superficiales. Para cualquiera de ellos la normativa establece condiciones de vuelco a través de diferentes medidas del grado de contaminación: DQO, DBO, SST, pH, entre otros. Para determinar el valor máximo admisible por normativa de vuelco en un cuerpo receptor particular es necesario calcular un factor de dilución (*Dilución*), el cual es definido como "valor adimensional que resulta como cociente entre el caudal del curso receptor final y el caudal del efluente" según la Resolución n° 1.089/82, y se representa en la siguiente expresión:

$$Dilución = \frac{Q_{AAr}}{Q_{planta}} \quad (4.1)$$

En la Ec. (4.1) se vincula el caudal del sistema receptor ( $Q_{AAr}$ ) con el de vertimiento o efluente de la/s planta/s ( $Q_{planta}$ ) que será/n instalada/s. A partir de este valor de *Dilución* y de acuerdo a lo expresado en la normativa, se determinan los valores máximos para las distintas medidas del grado de contaminación que dependen de la distancia de toma de agua (Ver Anexo II de la norma en el Anexo I de la tesis).

#### *b) Indicador para el agua superficial*

Para evaluar la calidad del agua superficial, a través del conocimiento empírico, se propone un indicador que considera el estado inicial y final de este componente. Para esto se utiliza una de las medidas del grado de contaminación del agua presentadas en la Tabla 4.1.

Para el cálculo del indicador se utilizan balances de materia en el curso de agua superficial donde se vierten las aguas residuales de los distintos procesos productivos. El balance se realiza involucrando el caudal ( $Q_{AAr}$ ) y el valor de la medida del grado de contaminación aguas arriba ( $Cont_{AAr}$ ) de la descarga del efluente, con el caudal ( $Q_{planta}$ ) y el valor de la medida del grado de contaminación del efluente generado por las unidades de producción ( $Cont_{planta}$ ). Esto permitirá determinar el grado de contaminación aguas abajo ( $Cont_{AAb}$ ) considerando el caudal aguas abajo ( $Q_{AAb}$ ), que será el valor que se utilizará para analizar la modificación en la calidad del agua superficial. En la Figura 4.3 se presenta un esquema del balance de materia para el agua superficial y la manera en que se calcula cada una de las variables involucradas.

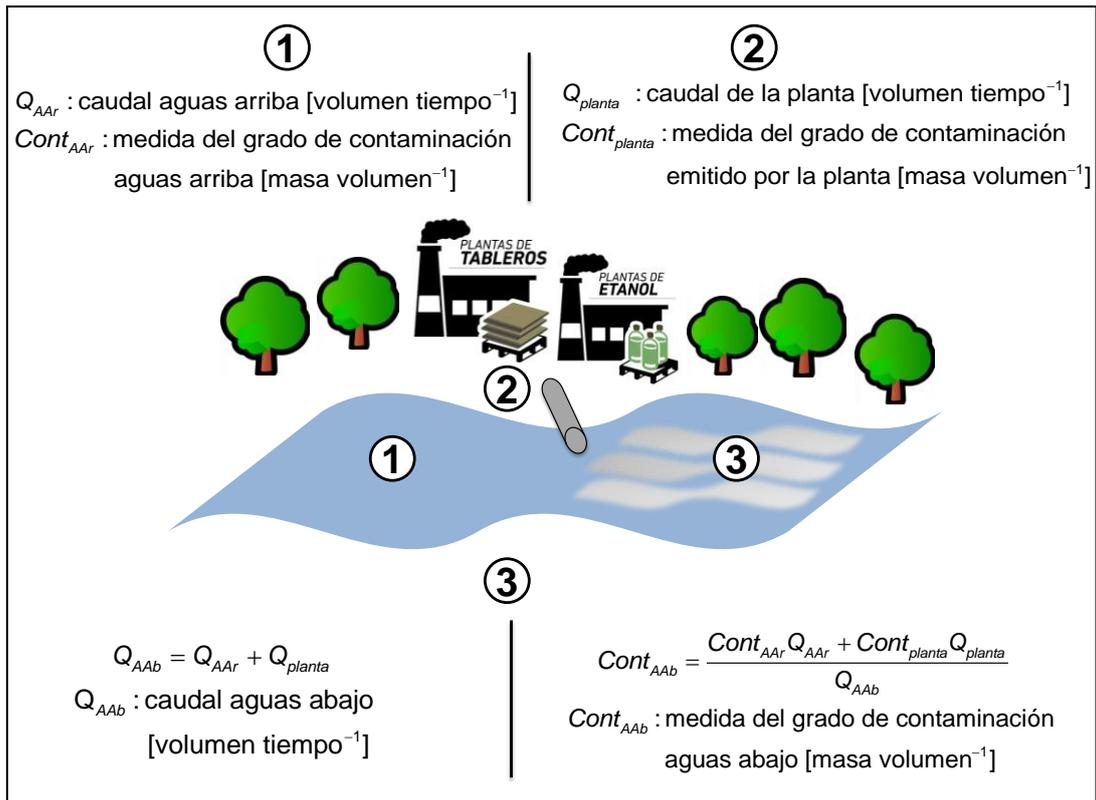


Figura 4.3. Balance de materia en el curso de agua superficial.

Con el valor de la medida del grado de contaminación aguas abajo (condición con proyecto) y aguas arriba (condición sin proyecto) se propone un indicador que tiene como objetivo evaluar la alteración en la calidad del curso de agua donde se vierten los efluentes industriales. El Indicador de Agua Superficial (IAS) tiene la siguiente estructura:

$$IAS = \frac{Cont_{AAb} - Cont_{AAr}}{Cont_{AAr}} 100\% \quad (4.2)$$

Este indicador muestra la variación en la calidad del agua superficial en relación a una determinada medida del grado de contaminación considerando las características del lugar. Cuanto mayor sea el valor de IAS, mayor es la variación en la calidad de agua superficial de un determinado sitio. En la Tabla 4.2 se ejemplifica el comportamiento de este indicador si se toma como referencia el valor de una determinada medida del grado de contaminación ( $Cont_{planta}$ ) y su caudal ( $Q_{planta}$ ) en distintos sitios:

- Si se compara la fila 1 y 2, se puede ver que el indicador es mayor cuando el caudal aguas arriba es menor. En cambio, existe mayor dilución del contaminante en cursos de agua de mayor caudal, y por lo tanto es menor la variación de la calidad de agua.
- A igual caudal aguas arriba (fila 1 y 3), se puede observar que el IAS es mayor cuando la medida del grado de contaminación aguas arriba es menor. Esto quiere decir que se genera una modificación mayor en la calidad de agua en cursos con menor valor en el grado de contaminación.

$Q_{AAr}$	$l\ s^{-1}$		$mg\ l^{-1}$			IAS
	$Q_{planta}$	$Q_{AAb}$	$Cont_{AAr}$	$Cont_{planta}$	$Cont_{AAb}$	
300.000	160	300.160	10	1.000	10,53	5,28%
43.000	160	43.160	10	1.000	13,67	36,70%
300.000	160	300.160	100	1.000	100,48	0,48%
43.000	160	43.160	100	1.000	103,34	3,34%

Tabla 4.2. Ejemplificación del IAS.

Es importante aclarar que el IAS propuesto puede implementarse con cada una de las medidas del grado de contaminación existente, de esta manera se obtendría un IAS para DQO, un IAS para DBO, un IAS para SST, entre otros.

#### 4.2.1.2 Componente paisaje

El paisaje se define como un área de la superficie terrestre que es la resultante de la interacción entre diversos factores (bióticos, abióticos y antrópicos) y que cuenta con un reflejo visual en el espacio. Es una zona que, siendo perceptible visualmente, posee recursos naturales, culturales y sociales que le otorgan una calidad que la hace única y representativa.

A diferencia del agua superficial, sobre este componente no existen restricciones determinadas por ley. Sin embargo, en diferentes normativas vinculadas a la evaluación de impacto ambiental, se hace referencia al paisaje como un elemento a tener en cuenta en el análisis. A continuación se mencionan algunas de estas referencias a manera de ejemplo:

- Decreto N° 0101, reglamentario de la Ley n° 11.717 de la provincia de Santa Fe: estipula considerar los cambios en el paisaje por la presencia física del proyecto.
- Decreto 2.131/00 reglamentario del capítulo IX del impacto ambiental de la ley n° 7.343 de la provincia de Córdoba: define al proyecto como a una propuesta a desarrollar en un determinado tiempo y lugar que implica intervenciones en el medio natural o modificado como, por ejemplo, transformaciones en el paisaje.
- Decreto (PEP) 4.977/09 reglamentario para la EIA de la provincia de Entre Ríos: determina la suspensión de obra, proyecto o actividad cuando de su realización derivase daño o peligro a los recursos naturales, al medio ambiente, al paisaje, a la salud humana, a los bienes.

De lo mencionado anteriormente, se puede concluir que se exige tener en cuenta la modificación del paisaje que surge de la inserción de un nuevo proyecto.

Para incorporar el efecto sobre el paisaje del diseño de la CS, se propone una metodología que considera las características de los sitios involucrados en la instalación de las diferentes unidades de producción.

Las características de cada zona se vinculan con un indicador que tendrá como criterio de medida el área construida en un radio determinado por el evaluador, alrededor del sitio de instalación de la/s unidad/es de producción. En el área construida se consideran edificaciones, caminos, tendidos eléctricos, cercos, entre otros. Se elige esta medida porque en las industrias la modificación sobre el paisaje está determinada principalmente por el tamaño de las mismas, y porque permitirá cuantificar la alteración, de tal manera que se pueda incluir en un modelo de optimización de la CS. El indicador para el paisaje propuesto  $I_{p_l}$  en la ubicación  $l$  es el siguiente:

$$I_{p_l} = ap_l + ai_l \quad \forall l \quad (4.3)$$

donde  $ai_l$  es el área inicial construida en el sitio  $l$  en el radio determinado por el evaluador y  $ap_l$  es el área que ocupan la/s planta/s instaladas en ese mismo sitio. En esta tesis se utilizará este indicador para evitar un nivel de modificación no deseado a criterio del evaluador. De acuerdo al conocimiento empírico del evaluador, para cada sitio se admitirá un valor de  $I_{p_l}$  máximo ( $I_{pmax_l}$ ) que dependerá de las características del entorno. Esto implica que, de acuerdo a la definición del  $I_{p_l}$ , interesa restringir el área máxima que se permite construir en cada sitio. Por lo tanto:

$$I_{p_l} \leq I_{pmax_l} \quad \forall l \quad (4.4)$$

Para cada sitio  $I_{pmax_l}$  es igual a:

$$I_{pmax_l} = tol_l \cdot at_l \quad \forall l \quad (4.5)$$

donde  $tol_l$  es un valor entre 0 y 1 que representa la fracción máxima de área que se puede utilizar para construir en relación al área total ( $at_l$ ) del sitio en el radio considerado por el evaluador. El valor adoptado para  $tol_l$  dependerá del criterio del evaluador, donde podría considerar las características del sitio donde se instalen las plantas, por ejemplo si es una zona urbana, rural, de valor ambiental, histórico, etc.

### **4.3 Modelo matemático**

El modelo matemático para el diseño óptimo de la CS forestal considerando el impacto ambiental, en particular el medio natural, se basa en el que fue presentado en el capítulo 3, sin considerar las ecuaciones vinculadas a las emisiones de GEI y al modelo multiobjetivo, al cual se le agregan variables, parámetros y ecuaciones que permiten considerar la evaluación del agua superficial y del paisaje, mencionados en la sección anterior.

#### **4.3.1 Ecuaciones para el agua superficial**

En este punto, como se mencionó anteriormente en la metodología, se tienen en cuenta dos perspectivas: una vinculada a las restricciones de la ley y otra empírica. En el análisis del componente agua superficial podrían utilizarse ambas de manera simultánea

o sólo una de ellas. Como se menciona previamente, los dos enfoques consideran la/s medida/s del grado de contaminación para su implementación.

#### 4.3.1.1 Ecuaciones relacionadas a la normativa

Para considerar los valores máximos permitidos por la legislación es necesario calcular la dilución, Ec. (4.1), de la manera que se encuentra definida en la normativa. El modelo debe decidir qué tipo y tamaño de plantas se instalarán en cada sitio, de modo que se cumplan las exigencias. Las especificaciones sobre los efluentes generados de acuerdo a las dimensiones y tipos de plantas son datos del problema, y se plantean como un conjunto discreto de efluentes máximos generados por cada una de ellas.

Para considerar los valores máximos aplicados por normativa es importante aclarar que se define un nuevo índice  $u$  que representa las diferentes medidas del grado de contaminación: DBO<sub>5</sub>, DQO, SST, entre otros, y una nueva variable binaria  $ms_{l,ta,ttab,tp,te}$ , la cual toma valor 1 si en el sitio  $s$ , se instala un aserradero de tamaño  $ta$ , una planta de tableros de tamaño  $ttab$ , una planta de pellets de tamaño  $tp$  y una planta de etanol de tamaño  $te$ . Esta variable binaria permite relacionar las diferentes opciones discretas de tamaños para las plantas para el sitio  $l$  a través del set  $ta$  para aserraderos,  $ttab$  para tableros,  $tp$  para pellets y  $te$  para plantas de etanol. Estos sets  $(ta, ttab, tp, te)$  son los que oportunamente se definieron en el capítulo 2 mediante  $t$ ; en este caso se redefinen con el fin de identificar específicamente a qué unidad productiva representan, dato necesario para determinar el valor del indicador.

Para establecer el valor de  $ms_{l,ta,ttab,tp,te}$ , se definen nuevas variables binarias que relacionan la variable  $w_{l,f}$ , usada en capítulos anteriores, con las nuevas variables  $as_{l,ta}$ ,  $tab_{l,ttab}$ ,  $pell_{l,tp}$  y  $et_{l,te}$ , que determinan el tamaño de los aserraderos, de las plantas de

tableros, de las plantas de pellets y de las plantas de etanol, respectivamente, instaladas en el sitio  $l$ . Al igual que en los modelos formulados en capítulos previos, estos índices corresponden a una serie de conjuntos discretos para los posibles tamaños disponibles para las plantas. En este capítulo, a diferencia de los anteriores, se agrega una nueva opción de tamaño para cada tipo de planta que corresponde a la dimensión nula o, lo que es lo mismo, no se instala una unidad de producción de ese tipo en ese sitio. Esto permite generalizar la formulación, incluyendo el caso en el cual no se instalan plantas. De este modo, el cálculo de  $ms_{l,ta,ttab,tp,te}$  permite considerar todas las posibles opciones de instalación de plantas en un determinado sitio  $l$ . También, es la base para la evaluación de los indicadores para cada posible ubicación  $l$  contemplada en el modelo de diseño de la CS. Así se tiene una formulación general, que admite cualquier combinación de plantas en los posibles sitios considerados. En las Ecs. (4.6)-(4.9) se calculan las nuevas variables binarias a partir de  $w_{l,f}$ .

$$as_{l,ta} = w_{l,f_1} \quad \forall l, t, ta \quad (4.6)$$

$$tab_{l,ttab} = w_{l,f_2} \quad \forall l, t, ttab \quad (4.7)$$

$$pell_{l,tp} = w_{l,f_3} \quad \forall l, t, tp \quad (4.8)$$

$$et_{l,te} = w_{l,f_4} \quad \forall l, t, te \quad (4.9)$$

Las variables  $as_{l,ta}$ ,  $tab_{l,ttab}$ ,  $pell_{l,tp}$  y  $et_{l,te}$  se combinan para generar la variable binaria  $ms_{l,ta,ttab,tp,te}$  mediante las siguientes expresiones:

$$as_{l,ta} \geq ms_{l,ta,ttab,tp,te} \quad \forall l, ta, ttab, tp, te \quad (4.10)$$

$$tab_{l,ttab} \geq ms_{l,ta,ttab,tp,te} \quad \forall l, ta, ttab, tp, te \quad (4.11)$$

$$pell_{l,tp} \geq ms_{l,ta,ttab,tp,te} \quad \forall l, ta, ttab, tp, te \quad (4.12)$$

$$et_{l,te} \geq ms_{l,ta,ttab,tp,te} \quad \forall l, ta, ttab, tp, te \quad (4.13)$$

$$ms_{l,ta,ttab,tp,te} \geq as_{l,ta} + tab_{l,ttab} + pell_{l,tp} + et_{l,te} - 3 \quad \forall l, ta, ttab, tp, te \quad (4.14)$$

$$\sum_{ta} as_{l,ta} = 1 \quad \forall l \quad (4.15)$$

$$\sum_{ttab} tab_{l,ttab} = 1 \quad \forall l \quad (4.16)$$

$$\sum_{tp} pell_{l,tp} = 1 \quad \forall l \quad (4.17)$$

$$\sum_{te} et_{l,te} = 1 \quad \forall l \quad (4.18)$$

Mediante las Ecs. (4.10) a (4.13) se relacionan los diferentes tamaños de planta instalados en el sitio  $l$  con la variable binaria  $ms_{l,ta,ttab,tp,te}$ , mientras que la Ec. (4.14) determina cuál de estas variables vale 1 para cada sitio  $l$ . Las Ecs. (4.15-4.19) restringen a una sola opción por cada tipo de unidad de producción en cada sitio. Por lo tanto, para cada  $l$ , sólo una variable binaria  $ms_{l,ta,ttab,tp,te}$  valdrá uno y las restantes cero. Aquella que vale uno corresponde al conjunto de plantas y dimensiones que se han asignado a la ubicación  $l$  en la solución óptima.

En función del valor de  $ms_{l,ta,ttab,tp,te}$ , a través de la Ec. (4.19) se obtienen los valores de dilución ( $Dilución_l$ ) para los diferentes sitios.

$$Dilución_l = \sum_{ta,ttab,tp,te} \frac{Qas_{ta} + Qtab_{ttab} + Qpell_{tp} + Qet_{te}}{QAAR_l} ms_{l,ta,ttab,tp,te} \quad \forall l \quad (4.19)$$

Todos los caudales en función del tamaño y tipo de planta son datos conocidos.  $Q_{AAr_l}$ ,  $Q_{as_{ta}}$ ,  $Q_{tab_{ttab}}$ ,  $Q_{pell_{tp}}$  y  $Q_{et_{te}}$  son caudales del curso superficial aguas arriba de la descarga del efluente en el sitio  $l$ , del efluente del aserradero de tamaño  $ta$ , del efluente de la planta de tableros de tamaño  $ttab$ , del efluente de la planta de pellets de tamaño  $tp$  y del efluente de la planta de etanol de tamaño  $te$ , respectivamente. Tener presente que en la ecuación (4.19), uno sólo de los sumandos será considerado, aquel correspondiente a la única variable  $ms_{l,ta,ttab,tp,te}$  con valor uno en el sitio  $l$ .

En este punto es importante aclarar que, a la hora de implementar el concepto de dilución definido en la normativa, Ec. (4.1), en el modelo matemático se trabajó con el concepto de manera inversa ( $Q_{plantas}/Q_{AAr}$ ) con el objetivo de salvar los casos en que el caudal del efluente de las plantas es equivalente a 0. Si en un determinado sitio no se instalan plantas, el caudal es igual a 0; por lo tanto el valor de dilución de acuerdo a la normativa no podría calcularse ya que representa matemáticamente una indeterminación (división por 0). Al mismo tiempo, al utilizar la expresión recíproca ( $Q_{plantas}/Q_{AAr}$ ), los límites de los distintos rangos de dilución pertenecientes a la legislación también son modificados, con el mismo criterio, para lograr congruencia entre ellos.

El valor máximo para cada medida del grado de contaminación se encuentra en la normativa en función de intervalos de dilución. Por ejemplo, de acuerdo a la normativa, para la medida  $u=DQO$  si la dilución es menor de 360, el valor máximo admitido de DQO es  $75 \text{ mg l}^{-1}$ ; si está entre 361 y 1.300 el valor máximo admitido de DQO es  $190 \text{ mg l}^{-1}$ ; y así para los intervalos restantes. Por lo tanto, una vez que se calcula la dilución se puede determinar el valor máximo admisible de una medida específica (Ver Anexo II de la norma).

Con el fin de representar los intervalos considerados en la normativa, en la Ec. (4.20) se expresa la *Dilución<sub>l</sub>* dependiendo de *Dilequivalente<sub>l,inter</sub>*, donde *inter* es un índice que representa los intervalos determinados por la normativa.

$$Dilución_l = \sum_{inter} Dilequivalente_{l,inter} \quad \forall l \quad (4.20)$$

*Dilequivalente<sub>l,inter</sub>* se debe encontrar entre un valor mínimo (*vmin<sub>inter</sub>*) y máximo de dilución (*vmax<sub>inter</sub>*). Para cada sitio sólo uno de estos valores será positivo. Para determinar a qué intervalo [*vmin<sub>inter</sub>*, *vmax<sub>inter</sub>*] pertenece, se utiliza una variable binaria *rango<sub>l,inter</sub>* que toma el valor 1 si la dilución equivalente *Dilequivalente<sub>l,inter</sub>* se encuentra entre los valores *vmin<sub>inter</sub>* y *vmax<sub>inter</sub>*, y 0 en otro caso (Ecs. (4.21)-(4.22)). *vmin<sub>inter</sub>* y *vmax<sub>inter</sub>* son parámetros que se encuentran determinados en la normativa.

$$Dilequivalente_{l,inter} \geq rango_{l,inter} vmin_{inter} \quad \forall l, inter \quad (4.21)$$

$$Dilequivalente_{l,inter} \leq rango_{l,inter} vmax_{inter} \quad \forall l, inter \quad (4.22)$$

Para cada sitio *l*, la dilución pertenece a un único intervalo, determinado por la legislación, y a partir de éste se selecciona un único límite para cada medida *u*. En este

caso, la normativa considera los mismos intervalos de dilución para todas las medidas del grado de contaminación.

$$\sum_{inter} rango_{l,inter} = 1 \quad \forall l \quad (4.23)$$

Una vez calculado el intervalo al cual pertenece la dilución, se obtiene el valor máximo de la medida del grado de contaminación del tipo  $u$ , de acuerdo a la normativa, en el curso de agua del sitio  $l$  ( $Contmaxsitio_{lu}$ ).

$$Contmaxsitio_{lu} = \sum_{inter} contmax_{u,inter} rango_{l,inter} \quad \forall l, u \quad (4.24)$$

donde  $contmax_{u,inter}$  es un parámetro que indica el valor máximo admitido de la medida de contaminación de acuerdo al intervalo en que se encuentra la dilución.

Hasta este punto se ha obtenido con las Ecs. (4.19)-(4.24) el valor máximo de cada medida de contaminación que puede ser emitido en un determinado sitio. Por lo tanto la medida del grado de contaminación  $u$  emitida por las plantas en el sitio  $l$  ( $confinalsitio_{lu}$ ) tiene que ser menor a  $Contmaxsitio_{lu}$ .

$$confinalsitio_{lu} \leq Contmaxsitio_{lu} \quad \forall l, u \quad (4.25)$$

donde la variable  $contfinalesitio_{lu}$  se obtiene utilizando el concepto de balance de materia presentado previamente aplicado a todas las unidades de producción instaladas en  $l$  (Ec. 4.26):

$$contfinalesitio_{lu} = \sum_{ta,ttab,tp,te} \frac{contas_{u,ta}Qas_{ta} + conttab_{u,ttab}Qtab_{ttab} + contpell_{u,tp}Qpell_{tp} + contet_{u,te}Qet_{te}}{Qas_{ta} + Qtab_{ttab} + Qpell_{tp} + Qet_{te}} ms_{l,ta,ttab,tp,te} \quad \forall l, u \quad (4.26)$$

donde  $contas_{u,ta}$ ,  $conttab_{u,ttab}$ ,  $contpell_{u,tp}$  y  $contet_{u,te}$  son valores conocidos de la medida del grado de contaminación  $u$  para cada tipo de planta y su correspondiente tamaño: aserraderos, tableros, pellets y etanol de tamaños  $ta$ ,  $ttab$ ,  $tp$  y  $te$ , respectivamente.

Para ejemplificar lo expuesto en las Ecs. (4.20)-(4.25), supóngase que el valor de dilución en un determinado sitio  $l$  (Ec. 4.20) es equivalente a  $6,6 \cdot 10^{-4}$ . En la Tabla 4.3, se presentan los diferentes rangos, de acuerdo al Anexo II de la normativa, modificados según la transformación de la dilución para salvar la indeterminación. Por lo tanto, en este caso, la dilución estaría en el 3er intervalo, correspondiente a  $inter3$ , siendo  $vmin_{inter}$  y  $vmax_{inter}$  iguales a  $2 \cdot 10^{-4}$  y  $7,68 \cdot 10^{-4}$  respectivamente. Esto resulta en un  $Contmaxsitio_{lu}$  igual a  $270 \text{ mg l}^{-1}$ .

$vmin_{inter}$	$vmax_{inter}$	$inter$	$contmax_{DQO, inter} [mg l^{-1}]$
0	$5,00 \cdot 10^{-5}$	inter1	600
$4,90 \cdot 10^{-4}$	$1,90 \cdot 10^{-4}$	inter2	410
$2,00 \cdot 10^{-4}$	$7,68 \cdot 10^{-4}$	inter3	270
$7,69 \cdot 10^{-4}$	$2,77 \cdot 10^{-3}$	inter4	190
$2,78 \cdot 10^{-3}$	-	inter5	75

Tabla 4.3. Valores para la DQO según normativa con los intervalos modificados.

#### 4.3.1.2 Ecuaciones relacionadas a la alteración en la calidad del agua superficial

En este punto, se utiliza el indicador definido en la Ec. (4.2) para introducir el conocimiento empírico en el análisis del agua superficial. De esta manera se establece el indicador ( $IAS_{lu}$ ) para cada sitio  $l$  y medida del grado de contaminación del tipo  $u$ :

$$IAS_{lu} = \frac{ContAAb_{lu} - ContAAr_{lu}}{ContAAr_{lu}} 100\% \quad \forall l, u \quad (4.27)$$

donde  $ContAAr_{lu}$  es un valor conocido del grado de contaminación  $u$  que tiene el curso de agua superficial antes de la descarga del efluente líquido en el sitio  $l$ , y  $ContAAb_{lu}$  representa el valor de la medida del grado de contaminación  $u$  luego de la instalación de las unidades de producción en el sitio  $l$  y se calcula a través del balance de materia de la siguiente manera (Figura 4.3):

$$ContAAb_{lu} = \sum_{ta,ttab,tp,te} \frac{contas_{u,ta} Qas_{ta} + conttab_{u,ttab} Qtab_{ttab} + contpell_{u,tp} Qpell_{tp} + contet_{u,te} Qet_{te} + ContAAR_{l,u} QAAR_l}{Qas_{ta} + Qtab_{ttab} + Qpell_{tp} + Qet_{te} + QAAR_l} ms_{l,u,ta,ttab,tp,te} \quad \forall l,u \quad (4.28)$$

En la Ec. (4.28) uno sólo de los sumandos es distinto de cero, ya que como se mencionó anteriormente la variable binaria  $ms_{l,u,ta,ttab,tp,te}$  toma el valor 1 solamente para una combinación de tamaños en cada sitio  $l$ .

De acuerdo al criterio del evaluador, el indicador puede ser utilizado como se mostró en la Ec. (4.27), para cada sitio, y/o como se muestra continuación, en todo el sistema:

$$IASG_u = \sum_l \frac{ContAAb_{lu}}{ContAAR_{lu}} 100\% \quad \forall u \quad (4.29)$$

Para cada uno de los indicadores presentados en la Ec. (4.27) y (4.29) el criterio del evaluador se vincula a través de una tolerancia máxima de alteración del componente agua superficial. Este valor límite quedará sujeto a las condiciones del ambiente de cada sitio, relacionando la situación sin proyecto y con proyecto. Por lo tanto la modificación medida a través de los indicadores propuestos deberá ser menor o igual a un determinado valor, como se expresa en las Ec. (4.30) y (4.31).

$$IAS_{lu} \leq IASmax_{lu} \quad \forall l,u \quad (4.30)$$

$$IASG_u \leq IASGmax_u \quad \forall u \quad (4.31)$$

donde  $IASmax_{lu}$  es la tolerancia máxima del grado de contaminación de la medida  $u$  en cada uno de los sitios y  $IASGmax_u$  es la tolerancia máxima global, a lo largo de todo el sistema, del grado de contaminación de la medida  $u$ . Ambas tolerancias dependen del conocimiento empírico del evaluador. Por lo tanto, en esta instancia, se incluye la subjetividad de la evaluación ambiental.

Los valores de  $IASmax_{lu}$  podrían fácilmente ser considerados a través de intervalos para cada sitio, como se realizó para considerar las restricciones impuestas por ley, en caso de que el evaluador quisiera optar por este método.

#### 4.3.2 Ecuaciones relacionadas al paisaje

Para evaluar la alteración sobre el paisaje, se consideran los parámetros vinculados al área construida en un determinado sitio. Para implementar las Ecs. (4.3)-(4.5) se definen los parámetros  $aas_{ta}$ ,  $atab_{tab}$ ,  $ape_{tp}$  y  $aete_{te}$  que representan el área ocupada por los aserraderos, plantas de tableros, plantas de pellets y plantas de etanol de tamaño  $ta$ ,  $tab$ ,  $tp$  y  $te$ , respectivamente. Se necesita identificar las plantas que se instalan en cada sitio  $l$  y el tamaño que adoptarán, para lo que se usan las variables binarias definidas anteriormente para cada planta:  $as_{l,ta}$ ,  $tab_{l,tab}$ ,  $pell_{l,tp}$  y  $et_{l,te}$ . Por lo tanto el área utilizada por las plantas  $ap_l$  en el sitio  $l$  se obtiene como se muestra a continuación:

$$ap_l = \sum_{ta} aas_{ta} as_{l,ta} + \sum_{ttab} atab_{ttab} tab_{l,ttab} + \sum_{tp} ape_{tp} pell_{l,tp} + \sum_{te} aet_{te} et_{l,te} \quad \forall l \quad (4.32)$$

A partir de las Ecs. (4.3)-(4.5) y de la Ec. (4.32) se calcula la modificación generada en el paisaje.

### 4.3.3 Función objetivo

La función objetivo consiste en maximizar el beneficio económico del sistema (*Bf*). El modelo matemático incluye las ecuaciones (2.1)-(2.7), (2.11), (2.13), (2.15), (2.16), (2.18), (2.19), las (3.1)-(3.11) y las (4.1) a (4.32).

Con este planteo se asegura que la solución obtenida cumpla, desde el punto de vista ambiental, tanto con las condiciones legales como con las restricciones que plantee el evaluador para el problema.

## 4.4 Caso de estudio

La CS considerada es la misma que fue presentada en el capítulo 3 salvo algunas modificaciones: se introducen valores vinculados a los efluentes líquidos y a la superficie construida, y se disminuye al 30% la capacidad de abastecimiento de materia prima y al 60% la demanda mínima.

Para evaluar el impacto sobre el agua superficial, se considerará el valor de DQO como medida del grado de contaminación de la calidad del agua con el fin de mostrar el funcionamiento de la metodología propuesta. Es una primera aproximación donde se incluyen las consideraciones de la ley y los indicadores propuestos, pero fácilmente se

pueden introducir otras medidas del grado de contaminación con las ecuaciones presentadas anteriormente. Se asume que la toma de agua en todos los casos se encuentra a más de 8 km. En la Tabla 4.4 se muestran los valores de DQO y de caudal para las distintas plantas involucradas en la CS forestal.

Tamaño	$Q_{tab}$ [ $l\ s^{-1}$ ]	$Cont_{tab}$ [ $mg\ l^{-1}$ ]	$Q_{et}$ [ $l\ s^{-1}$ ]	$Cont_{et}$ [ $mg\ l^{-1}$ ]
t1	13,00	400	745	2.000
t2	4,05	400	310	2.000
t3	2,43	400	160	2.000
t4	0,00	0	0	0

Tabla 4.4. Valores de DQO y caudal de las plantas de producción

De esta tabla se observa que no existen valores para los aserraderos y las plantas de pellets debido a que generan una cantidad de efluentes mínima que puede ser despreciable.

Las características vinculadas con cada sitio se presentan en la Tabla 4.5. Se muestran valores relacionados al curso de agua superficial y el área construida en un radio de 2 km del posible lugar de emplazamiento en cada uno de los sitios, la cual en esta tesis se considera constante para todos. También, para cada uno de ellos, se muestra el valor de  $tol_i$  adoptado de acuerdo a las características de cada sitio.

Sitio	ai [m <sup>2</sup> ]	tol	QAAR [l s <sup>-1</sup> ]	ContAAR [mg l <sup>-1</sup> ]
<i>l1</i>	0	0,00	15.000	200
<i>l2</i>	200.000	0,97	17.300.000	20
<i>l3</i>	1.400.000	0,67	17.300.000	145
<i>l4</i>	150.000	0,02	43.000	10
<i>l5</i>	0	0,00	25.000	150
<i>l6</i>	550.000	0,08	125.000	11
<i>l7</i>	1.600.000	0,76	90.000	50
<i>l8</i>	1.500.000	0,72	90.000	180
<i>l9</i>	150.000	0,02	90.000	8
<i>l10</i>	280.000	0,98	90.000	10
<i>l11</i>	900.000	0,18	17.300.000	68
<i>l12</i>	1.450.000	0,69	17.300.000	215

Tabla 4.5. Características de cada sitio.

En relación al paisaje, la Tabla 4.6 muestra los m<sup>2</sup> que ocupa cada una de las plantas de acuerdo al tamaño que adopte.

Tamaño	Aserraderos [m <sup>2</sup> ]	Tableros [m <sup>2</sup> ]	Pellets [m <sup>2</sup> ]	Etanol [m <sup>2</sup> ]
t1	200.000	350.000	150.000	400.000
t2	170.000	200.000	100.000	300.000
t3	150.000	150.000	80.000	200.000
t4	0	0	0	0

Tabla 4.6. Superficie ocupada por las plantas de producción.

En primer lugar, se resuelve el modelo sin consideraciones ambientales, llamado Caso Base, que es equivalente a resolver el caso óptimo desde la perspectiva económica. Para analizar la CS forestal con la metodología propuesta se plantean distintos escenarios con el fin de comprender cómo afectan las consideraciones del impacto ambiental a la localización de las diferentes unidades de producción y, en consecuencia, la configuración de la CS. En la Tabla 4.7 se listan los diferentes escenarios que se analizan, considerando aspectos mencionados en la metodología de este trabajo.

	<b>Aspectos considerados</b>	<b>Objetivo</b>
<i>Escenario 1</i>	<i>Beneficio económico</i> <i>Restricciones por ley</i>	Maximizar el <i>Bf</i> sujeto a los valores máximos determinados por ley.
<i>Escenario 2</i>	<i>Beneficio económico</i> <i>Restricciones por ley</i>	Maximizar el <i>Bf</i> sujeto a los valores máximos determinados por ley, considerando igual a 0 la demanda mínima de etanol.
<i>Escenario 3</i>	<i>Beneficio económico</i> <i>Restricciones por ley</i> $IASG_u$ $IAS_{lu}$	Maximizar el <i>Bf</i> sujeto a valores determinados por ley y sujeto a una tolerancia de alteración en la calidad del agua superficial.
<i>Escenario 4</i>	<i>Beneficio económico</i> $IASG_u$	Maximizar el <i>Bf</i> sujeto a una tolerancia de alteración en la calidad del agua superficial.
<i>Escenario 5</i>	<i>Beneficio económico</i> $Ip_l$	Maximizar el <i>Bf</i> cumpliendo la tolerancia existente en cada sitio para la modificación del paisaje.
<i>Escenario 6</i>	<i>Beneficio económico</i> $Ip_l$ $IASG_u$	Maximizar el <i>Bf</i> cumpliendo la tolerancia existente en cada sitio para la modificación del paisaje y de la calidad de agua superficial.

Tabla 4.7. Escenarios bajo análisis.

## 4.5 Resultados

### 4.5.1 Caso base

La configuración óptima de la CS propuesta se presenta en la Figura 4.4. Se observa que las plantas de producción se sitúan en los sitios donde se generan los troncos y residuos, conformando “clústeres”. Esta tendencia disminuye el costo de transporte de la materia prima y permite, por otro lado, reducir el costo relacionado a la generación de energía térmica, ya que los costos de funcionamiento e instalación de las calderas son compartidos entre las distintas plantas.

En el sitio 11 se instala un aserradero y una planta de tableros; ambos utilizan materia prima del sitio 11 y 13 para la elaboración de los productos. La energía térmica es abastecida mediante un horno de incineración que se alimenta en base a los subproductos generados por el aserradero. En el sitio 11 los subproductos no son destinados para la generación de energía ni para la venta.

De la Figura 4.4 se puede observar que en el sitio 13 no se instalan unidades de producción, pero la materia prima y los residuos generados se distribuyen al sitio 11 y 14 que se encuentran cercanos. En este último, tres unidades de producción son instaladas. Los subproductos del aserradero son distribuidos entre la planta de tableros y la planta de etanol; mientras que la totalidad de la corteza generada es vendida a terceros. Esto se debe a que este material no puede ser aprovechado como materia prima para ninguno de los productos elaborados en el sitio y, por otro lado, no se instalan calderas que utilicen biomasa como combustible. Otra posibilidad sería enviarla a un sitio cercano para su utilización, pero la misma no es redituable debido al costo de transporte que esto implica. La materia prima generada en 14 es utilizada por las unidades de producción de este sitio y del sitio 15, mientras que los residuos son destinados a la producción de etanol. La generación de energía térmica se realiza a partir de una caldera de fuel.

En el sitio 15 los pellets son producidos en su totalidad a partir de los residuos, mientras que los tableros utilizan los chips y el aserrín como parte de la materia prima para su producción. La corteza, al igual que en 14, se destina a la venta de terceros por el mismo motivo que se mencionó anteriormente. Los troncos utilizados provienen del sitio 15 y del sitio 14 y para la producción de energía se instala una caldera que utiliza como combustible fuel oil.

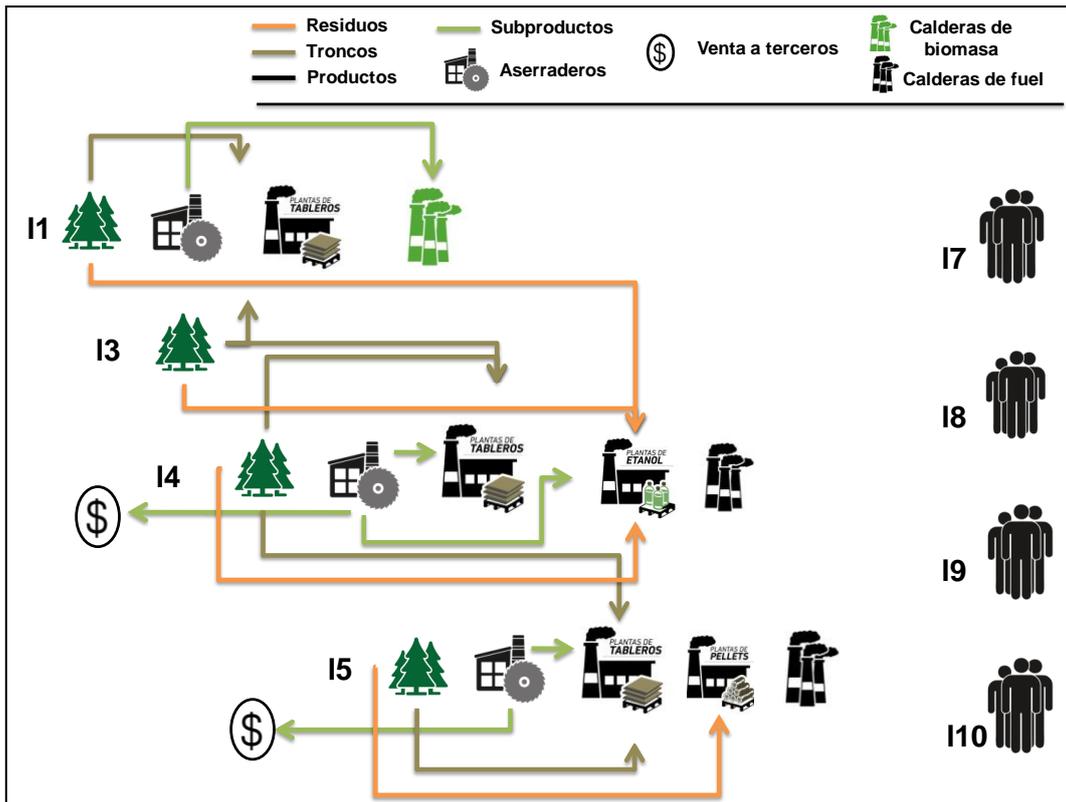


Figura 4.4. Configuración óptima del caso base.

La demanda es abastecida desde los diferentes sitios donde se instalan las distintas unidades de producción. En la Tabla 4.9 se puede ver el porcentaje de la demanda máxima de cada uno de los productos que se satisface. Es importante destacar que la cantidad producida de madera, pellets y etanol se encuentra en valores cercanos a la demanda mínima, mientras que con la producción de tableros esto no sucede, dado que éstos son más rentables.

El beneficio total anual de la CS es de M\$ 25.051. Los principales costos y las ventas se muestran en la primera columna de la Tabla 4.8. La materia prima es utilizada casi en su totalidad (Tabla 4.9), mientras que los residuos generados son totalmente agotados. Los troncos son distribuidos entre la planta de etanol, los aserraderos y las plantas de

producción de tableros, en este caso los pellets no utilizan como materia prima troncos para su elaboración.

	Caso base	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
<i>Transporte</i>	8.235	8.441	8.995	9.998	11.179	12.134
<i>Materia prima</i>	12.909	13.011	13.011	13.011	12.909	13.011
<i>Instalación</i>	24.827	20.028	20.028	24.820	24.827	23.735
<i>Producción</i>	51.081	48.542	48.542	51.756	51.081	49.287
<b>Ventas [M\$ año<sup>-1</sup>]</b>	122.103	110.020	109.910	123.638	122.390	119.782
<b>Beneficio [M\$ año<sup>-1</sup>]</b>	25.051	19.998	19.333	24.052	22.394	21.616

Tabla 4.8. Resumen económico para los diferentes escenarios.

	Caso base	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
<b>% de la demanda máxima suplida</b>						
<i>Madera</i>	34,38%	35,16%	35,16%	36,40%	34,38%	34,38%
<i>Tableros</i>	36,96%	50,70%	50,70%	37,61%	36,97%	36,96%
<i>Pellets</i>	3,67%	3,67%	3,67%	3,67%	3,67%	3,67%
<i>Etanol</i>	5,14%	0,00%	0,00%	5,17%	4,88%	5,14%
<b>% de troncos utilizados</b>	99,28%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	99,28%
<b>% de residuos utilizados</b>	95,94%	21,68%	21,68%	100,00%	100,00%	95,94%
<b>Producción</b>						
<i>Madera [m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>]</i>	76.500	78.224	78.224	810.00	76.500	76.500
<i>Tableros [m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>]</i>	225.484	309.270	309.270	229.410	225.488	228.635
<i>Pellets [T año<sup>-1</sup>]</i>	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000
<i>Etanol [T año<sup>-1</sup>]</i>	27.245	0	0	27.418	25.851	25.233

Tabla 4.9. Resultados para los diferentes escenarios.

La distribución y el tamaño de las diferentes unidades de producción se presentan en la Tabla 4.10. Como se mencionó anteriormente, se puede observar que existe una tendencia a instalar las unidades de producción formando “clusters”, ubicándolos en los

sitios de materia prima. Las plantas son de tamaño medio y grande, esto se debe a que instalar plantas de estos tamaños es más rentable por economía de escala que instalar mayor cantidad de plantas de menor tamaño.

	<b>11</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
Aserraderos	●	●	○
Plantas de tableros	○	○	○
Plantas de pellets			●
Plantas de etanol		●	
Capacidades	○ t1	● t2	● t3
<b>verde:</b> sitio de materia prima; <b>azul:</b> sitio de clientes; <b>negro:</b> sitio intermedio.			

*\*Las plantas de tamaño 14 tienen producción nula, por lo tanto no se presentan en la tabla.*

Tabla 4.10. Tamaño y distribución de las unidades de producción.

En la Tabla 4.11 se muestra los valores de DQO aguas abajo ( $ContAAb_{i,DQO}$ ) y el área total ocupada en cada sitio, calculados para el caso base. Estos valores serán utilizados más adelante para comparar los distintos escenarios planteados.

	<b>11</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
DQO [ $mg\ l^{-1}$ ]	371,50	1.929,60	371,42
ai + ap [ $m^2$ ]	370.000	520.000	650.000

Tabla 4.11. Valores del caso base.

#### **4.5.2 Escenario 1**

En este escenario se consideran las restricciones impuestas por ley sobre el caso base. Estas se encuentran en la normativa (Anexo I) y, particularmente para la DQO, se muestran en la Tabla 4.3. De las columnas de la tabla, se puede observar que el máximo valor permitido de DQO es equivalente a  $600 \text{ mg l}^{-1}$ .

En este sentido, las emisiones de las plantas de etanol superan ampliamente este rango, debido que se encuentran en el orden de  $2.000 \text{ mg l}^{-1}$  (Tabla 4.4). Luego, como resultado se obtiene que no es posible abastecer la demanda mínima requerida de etanol. Por lo tanto, la solución del programa matemático infactible dado que los límites máximos impuestos por normativa son sobre el efluente que se descarga en el sitio (Ec. 4.25); en consecuencia cualquier planta que se instale de etanol superará ampliamente esta restricción.

#### **4.5.3 Escenario 2**

Frente a la situación presentada en el escenario 1, se propone omitir la demanda mínima de etanol y optimizar el sistema considerando los valores máximos de emisión de contaminantes determinados legalmente.

En este caso, dadas las restricciones impuestas por normativa, no se instalan unidades de producción de etanol. En cuanto a la distribución de las otras plantas, la Tabla 4.12 muestra su localización y tamaño. Se advierte una diferencia al comparar con el caso base, en relación a los sitios donde se instalan y a la distribución de las mismas. Esto se debe principalmente a la restricción de las emisiones del efluente líquido sobre las unidades de producción (Tabla 4.13), en este caso sobre los efluentes provenientes de las plantas de tableros dado que no se instalan plantas de etanol. Los sitios 11, 14 y 15,

donde se instalan las plantas de tableros en el caso base, se caracterizan por tener cursos de agua superficial con caudales relativamente bajos, lo que genera que al descargar los efluentes provenientes de la producción de tableros la alteración sobre la calidad de agua sea significativa. De acuerdo al factor de dilución del caso base, el valor máximo de DQO que se puede emitir en cada sitio (11, 14 y 15) es menor al que emite cada planta, lo cual no permitiría que se instalen unidades de producción en ellos. Por este motivo se obtiene una configuración diferente, como la que se muestra en la Tabla 4.12. Existe una tendencia de instalar las unidades en los sitios donde el caudal del curso superficial es mayor. Por lo tanto, el valor de dilución aumenta, al igual que la cantidad máxima de DQO que se puede emitir.

El beneficio del sistema, comparando con el caso óptimo, disminuye, siendo igual a M\$ 19.998 por año. Esta disminución se debe, principalmente, a que la producción de etanol es nula. En la columna 2 de la Tabla 4.8 se observa el valor de los diferentes costos y ventas para este caso.

La demanda suministrada de madera y pellets se mantiene similar al caso base, mientras que la de tableros se incrementa a 51% (Tabla 4.9). Gran parte de los troncos que anteriormente se destinaba a la producción de etanol, ahora se destina para producir tableros, debido a que este último es el producto más rentable en toda la CS. Los troncos son utilizados en un 100% mientras que los residuos en un 22%. El motivo por el cual no se consume la totalidad de éstos es porque son solamente utilizados en la elaboración de pellets ya que la producción de etanol es nula. De la Tabla 4.12 puede verse que la única planta de pellets se instala en el sitio 110. Al instalar esta planta se abastece la demanda mínima de este producto.

Los subproductos del aserradero son utilizados principalmente para la producción de energía en los sitios 12, 13, 16 y 19, donde se instalan hornos de incineración que son alimentados por estos materiales, cumpliendo con la necesidad energética de estos sitios. En 110, donde es necesaria mayor cantidad de energía, se instala una caldera de fuel y los subproductos son destinados a la producción de tableros.

	12	13	16	19	110
Aserraderos	●	●	●	●	●
Plantas de tableros	○	○	○	○	○
Plantas de pellets					●
Plantas de etanol					

Capacidades ○ t1 ● t2 ● t3

verde: sitio de materia prima; azul: sitio de clientes; negro: sitio intermedio.

Tabla 4.12. Configuración de las unidades de producción del escenario 2.

	12	13	16	19	110
<b>Dilución</b>	1.330.769	1.330.769	9.615	6.923	6.923
<b>Contplanta [mg l<sup>-1</sup>]</b>	400	400	400	400	400
<b>ContAAr [mg l<sup>-1</sup>]</b>	20	145	11	8	10
<b>QAAR [l s<sup>-1</sup>]</b>	17.300.000	17.300.000	125.000	90.000	90.000
<b>Qplanta [l s<sup>-1</sup>]</b>	13	13	13	13	13
<b>Contmaxsitio [mg l<sup>-1</sup>]</b>	600	600	410	410	410

Tabla 4.13. Características del agua superficial para el escenario 2.

A partir de este escenario se puede observar la importancia de considerar las características del sitio en la localización de las distintas unidades de producción, ya que modifica significativamente la configuración de la CS y el sistema bajo análisis.

#### 4.5.4 Escenario 3

En este caso se considera la restricción establecida por la ley sobre la emisión de DQO y la demanda mínima de etanol es igual a 0, al igual que en el escenario 2, sólo que esta vez se propone una tolerancia para el indicador de la calidad de agua superficial. El valor máximo que puede tomar el  $IAS_{i,DQO}$  en cada sitio se asumió igual a 5% mientras que el  $IASG_{DQO}$  igual a un 1%. Esto implica que se admite una variación global en el valor de DQO de hasta un 1%. Se optó por estos valores para buscar que la alteración sobre la calidad de agua superficial sea baja, a lo largo del sistema, de manera de analizar cómo reacciona el mismo frente a una situación restrictiva. Además, como se podrá observar en la Tabla 4.15, el valor de  $IASG_{DQO}$  en el escenario 2 es 1,64 %, por lo tanto se optó por una tolerancia menor con el fin de analizar cómo responde el sistema frente a las diferentes exigencias.

De la Tabla 4.9 se puede observar que la demanda abastecida, como los troncos y residuos utilizados, se mantienen igual al escenario 2. El  $Bf$  se ve levemente disminuido a M\$ 19.333 por año lo que se debe principalmente al costo de transporte. Si comparamos la Tabla 4.12 con la Tabla 4.14 se puede observar que las plantas de producción mantienen su tamaño y la mayoría mantiene su localización, excepto el caso de 19 pues las unidades pasan a localizarse a 18 (Tabla 4.14). Esto se debe a que en el sitio 19 la calidad del agua es muy buena, teniendo un valor bajo de DQO, mientras que en el sitio 18 su valor es mayor y equivalente a  $180 \text{ mg l}^{-1}$ . Como el caudal en ambos sitios es igual, significa que al instalar las plantas de producción, la alteración es mayor en el sitio con menor DQO. De esta forma, al instalar las plantas en 18 se cumple la tolerancia global máxima propuesta.

	I2	I3	I6	I8	I10
Aserraderos	●	●	●	●	●
Plantas de tableros	○	○	○	○	○
Plantas de pellets					●
Plantas de etanol					

Capacidades    ○ t1       ● t2       ● t3

verde: sitio de materia prima; azul: sitio de clientes; negro: sitio intermedio.

Tabla 4.14. Configuración de las unidades de producción del escenario 2.

En la Tabla 4.15 se puede observar la variación de  $IAS_{i,DQO}$  en cada sitio y en consecuencia la de  $IASG_{DQO}$ .

	$IAS_{i,DQO}$ [%]					$IASG_{DQO}$ [%]
	<i>I2</i>	<i>I3</i>	<i>I6</i>	<i>I8</i>	<i>I9</i>	<i>I10</i>
<i>Escenario 2</i>	0,0014	0,0001	0,3677		0,7077	0,5633
<i>Escenario 3</i>	0,0014	0,0001	0,3677	0,0177		0,5633

Tabla 4.15. Valores de  $IAS_{i,DQO}$  e  $IASG_{DQO}$  para el escenario 2 y 3.

De la Tabla 4.8 se puede observar que el  $Bf$  no varía significativamente al considerar una tolerancia para el indicador global si se compara con el escenario 2. Por otro lado, la producción se mantiene constante (Tabla 4.9) variando el sitio de localización de algunas unidades productivas.

#### 4.5.5 Escenario 4

En este caso no se considera las restricciones establecidas por la ley con el fin de evaluar la instalación de plantas de etanol para cumplir con la demanda mínima propuesta en el modelo. A diferencia de los escenarios 2 y 3, sólo se considera como restricción un valor máximo de  $IASG_{DQO}$  del 2%, sin considerar el valor del indicador para cada uno de los sitios.

El beneficio económico es levemente menor al del caso base. Esto indica que considerar el  $IASG_{DQO}$  en el diseño de la CS no necesariamente implica una gran disminución del beneficio económico en este caso. En la Tabla 4.8 se observa que el  $Bf$  es M\$ 24.052 anuales.

Los troncos y residuos son utilizados en su totalidad (Tabla 4.9), los primeros se distribuyen en la producción de madera, tableros y etanol; mientras que los residuos son utilizados para la producción de pellets y etanol. Los subproductos son destinados a la producción de tableros en el sitio 15, a excepción de la corteza que es enviada para la producción de pellets, y en el sitio 14 son utilizados para la generación de energía térmica. La generación de energía se realiza a través de hornos de fuel en los sitios 13 y 15, que es donde se requiere más energía, y mediante un horno de incineración en el sitio 14.

Al comparar con el caso base se advierten modificaciones en los sitios donde se instalan las diferentes unidades de producción (Tabla 4.16):

- En el sitio 14 no se instala la planta de etanol, como en el caso base, debido a que en este sitio el valor de la DQO del agua superficial es relativamente bajo, al igual que su caudal. Por lo tanto si se instalara una planta de etanol en este sitio

la alteración sería significativa, pues modificaría mucho las condiciones iniciales del lugar respecto al valor de DQO. En la Tabla 4.17 se puede observar como varía el  $IASG_{DQO}$ .

- En el sitio 11 no se instalan unidades de producción. Si bien el valor de DQO en este sitio es relativamente alto, el caudal es bajo y la cantidad de efluente emitido por una planta de tableros generaría una alteración notable en la calidad de agua superficial del sitio en términos de DQO.
- En el sitio 13 se instala una planta de tableros y una de etanol. El caudal es elevado al igual que el valor de DQO del curso superficial. Esto implica una modificación leve por la emisión de efluentes líquidos generados por ambas industrias, dentro de los límites propuestos.
- El sitio 15 se caracteriza por tener un caudal relativamente bajo pero una DQO elevada, esto implica que al instalar la planta de tableros la alteración es casi imperceptible.

	I3	I4	I5
Aserraderos		○	○
Plantas de tableros	○	○	○
Plantas de pellets			●
Plantas de etanol	●		

Capacidades      ○ t1      ● t2      ● t3

verde: sitio de materia prima; azul: sitio de clientes; negro: sitio intermedio.

Tabla 4.16. Localización de las unidades de producción en el escenario 4.

Si se compara este caso con el escenario 2, se observa que considerar las restricciones impuestas por ley produce grandes modificaciones en el diseño de la CS (Tabla 4.12 y Tabla 4.16), principalmente en la localización de las diferentes plantas.

	<i>IAS<sub>L,DQO</sub> [%]</i>			<i>IASG<sub>DQO</sub> [%]</i>	
	<i>l1</i>	<i>l3</i>	<i>l4</i>	<i>l5</i>	
Caso base	0,087		143,566	0,087	143,739
Escenario 4		0,023	1,179	0,087	1,289

Tabla 4.17. Valores de  $IAS_{L,DQO}$  e  $IASG_{DQO}$  para el escenario 4 y el caso base.

#### 4.5.6 Escenario 5

En este escenario se considera el  $Ipl$  en el caso base, con la metodología que se presentó anteriormente.

El beneficio económico es igual a M\$ 22.394 anuales y es menor al del caso base. La cantidad elaborada de cada producto (Tabla 4.9) es similar, al igual que la configuración de las plantas. La principal diferencia está en los sitios donde se localizan las unidades de producción (Tabla 4.18).

En el caso base se instalan plantas en los sitios l1, l4 y l5, y en este caso, debido a que los sitios l1 y l5 tienen una tolerancia relativamente baja para el indicador del paisaje, no se permite la instalación de unidades de producción en los mismos.

El sitio l4 es tiene un área inicial construida de 150.000 m<sup>2</sup>. Antes se instalaban tres unidades de producción conformando un clúster para disminuir diversos costos, utilizando un área de 820.000 m<sup>2</sup>. Debido a que la tolerancia de construcción asumida para este sitio es de 0,02 del área total considerada, no se instalan las plantas, y se decide instalarlas en el sitio l3. Esta ubicación tiene un valor de tolerancia mayor, lo que permite instalar las plantas. Los demás sitios donde se instalan unidades de producción

(12 y 110) son zonas con valores elevados de tolerancia lo que no representa inconvenientes para la ubicación de las unidades productivas.

Los troncos y residuos son utilizados en su totalidad. Los subproductos tienen diferentes destinos de acuerdo al sitio y la fuente de energía. En el sitio 13 los chips y aserrín se distribuyen para la producción de etanol y tableros, mientras que la corteza se vende. En el sitio 12 la totalidad de subproductos es destinada a la generación de energía, mientras que en el 110 una parte se destina a tableros y la fracción restante es enviada al horno de incineración instalado en ese lugar. El sitio 13 es el que más energía requiere, y por lo tanto, se instala una caldera de fuel.

	12	13	110
Aserraderos	●	●	○
Plantas de tableros	○	○	○
Plantas de pellets			●
Plantas de etanol		●	

Capacidades      ○ t1      ● t2      ● t3

verde: sitio de materia prima; azul: sitio de clientes; negro: sitio intermedio.

Tabla 4.18. Configuración de las unidades de producción en el escenario 5.

#### 4.5.7 Escenario 6

En este caso se utilizan los criterios del escenario 4 y 5 para hacer un análisis sobre el hecho de considerar el  $IASG_{DQO}$  y el  $Ipl$  en el diseño de la CS bajo estudio.

Se utiliza como criterio un  $IASG_{DQO}$  menor al 2% y un  $Ipl$  que cumpla con las condiciones presentadas en la Tabla 4.5. Si se analiza el valor obtenido del  $IASG_{DQO}$  en el escenario 5 (Tabla 4.19) se puede ver que no supera el 2%, en consecuencia, al introducir esta restricción, no surgirán modificaciones en la CS con respecto al escenario 5. Los resultados serán equivalentes a los de este caso.

IAS [%]		IASG [%]	
<i>l2</i>	<i>l3</i>	<i>l10</i>	
0,001	0,013	0,563	0,577

Tabla 4.19. Valores de IAS e IASG para el escenario 5.

Por lo tanto, como el objetivo de este capítulo es analizar el funcionamiento de los indicadores propuestos, se propone una tolerancia máxima de  $IASG_{DQO}$  equivalente al 0,5% para evaluar cómo responde la configuración de la CS frente a este requisito.

En este caso, el beneficio económico del sistema es igual a M\$ 21.616 anuales, 14 % menor que el caso base (Tabla 4.8). Si se compara con el escenario 5, se puede observar que se modifica la configuración de la CS (Tabla 4.20). En el sitio l10 el valor del  $IAS_{l,DQO}$  se encuentra por encima de la tolerancia máxima para el escenario 6 (Tabla 4.19). Por ello decide instalar una planta de tableros de menor tamaño en este lugar y en l8 se instala otra del mayor tamaño posible. Este sitio tiene una tolerancia equivalente a 0,72, por lo tanto se permite utilizar los 500.000 m<sup>2</sup> necesarios para instalar el aserradero y la planta de tableros. Por otro lado, se caracteriza por contar con un caudal y un valor de DQO aguas arriba que admite una planta de tableros del mayor tamaño. Esto resulta en un valor de  $IASG_{DQO}$  para este escenario equivalente a 0,205 (Tabla 4.21).

	I2	I3	I8	I10
Aserraderos	●		●	○
Plantas de tableros	○	○	○	●
Plantas de pellets				●
Plantas de etanol		●		

Capacidades      ○ t1      ● t2      ● t3

verde: sitio de materia prima; azul: sitio de clientes; negro: sitio intermedio.

Tabla 4.20. Configuración de las unidades de producción en el escenario 6.

<b>IAS<sub>i,DOO</sub> [%]</b>				<b>IASG<sub>DOO</sub> [%]</b>
<i>I2</i>	<i>I3</i>	<i>I8</i>	<i>I10</i>	
0,001	0,013	0,018	0,173	0,205

Tabla 4.21. Valores de  $IAS_{i,DOO}$  e  $IASG_{DOO}$  para el escenario 6.

Los demás valores de las diferentes variables se presentan en la Tabla 4.9, siendo muy similares al escenario anterior.

## 4.6 Conclusiones

En este capítulo se presenta una metodología para abordar el diseño de la CS desde un punto de vista ambiental. La misma considera aspectos vinculados a la normativa existente y a la alteración de un componente desde una perspectiva empírica sobre la base de evaluaciones de expertos. Dos indicadores fueron diseñados, uno con el fin de analizar la alteración sobre el componente agua y otro con el objetivo de estudiar la modificación sobre el paisaje. Estos fueron implementados en una CS forestal con el fin de evaluar su funcionamiento e implicancias sobre el diseño de la CS.

Del análisis realizado se puede observar que la metodología propuesta es simple y factible de utilizar a la hora de implementarla en un modelo de programación

matemática. Además, es una herramienta que permite considerar condiciones del entorno ambiental donde operan las unidades productivas, evaluando sus efectos desde el punto de vista ambiental y económico, simultáneamente.

Por otro lado, los resultados obtenidos demuestran que considerar cuestiones vinculadas al ambiente genera cambios desde el punto de vista económico y desde el punto de vista ambiental. De esta manera, se demuestra que se puede preservar la calidad ambiental del entorno favoreciendo a la sociedad y a los ecosistemas.

Dado la escasez de herramientas que permitan realizar análisis considerando el impacto ambiental sobre el entorno donde operan las diferentes unidades de producción, ésta es una propuesta innovadora que permite introducir juicios de valor propios de la experiencia técnica y profesional en el diseño del sistema. Por lo tanto, es una herramienta que puede ser utilizada como soporte de toma de decisiones para lograr un diseño estratégico sustentable de la CS, a la hora de decidir el sitio donde instalar las diferentes unidades de producción.

### Bibliografía

Ahi P., Searcy C., 2015. An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 86, 360-377.

Ahi, P., Searcy, C., 2013. A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 52, 329–341.

Akan M., Dhavale D., Sarkis J., 2017. Greenhouse gas emissions in the construction industry: An analysis and evaluation of a concrete supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1.195-1.207.

Banasik A., Kanellopoulos A., Claassen G.D.H., 2017. Closing loops in agricultural supply chains using multi-objective optimization: A case study of an industrial mushroom supply chain. *Int. J. Production Economics*, 183, 409-420.

Barbosa-Povoa A., Da Silva C., Carvalho A., 2017. Opportunities and Challenges in Sustainable Supply Chain: An Operations Research Perspective. *European Journal of Operational Research*.

Barker, J.; Zabinsky, Z., 2008. Reverse logistics network design: a conceptual framework for decision making. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1, 250.

Bazan E., Jaber M., Zanoni S., 2015. Supply chain models with greenhouse gases emissions, energy usage and different coordination decisions. *Applied Mathematical Modelling*, 39, 5.131-5.151.

Beamon, B.M., 1999. Designing the green supply chain. *Logist. Inform. Manag.*, 12, 332-342.

Camero C., Sowlati T., 2014. Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives – A review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 62-73.

Carvalho H., Govindan K., Azevedo S.G., Cruz-Machado V., 2017. Modelling green and lean supply chains: An eco-efficiency perspective. *Resources, Conservation and Recycling* 120, 75-87.

De la Fuente T., Athanassiadis D., Gonzalez-García S., Nordfjell T., 2017. Cradle-to-gate life cycle assessment of forest supply chains: Comparison of Canadian and Swedish case studies. *Journal of Cleaner Production*, 143, 866-881.

Deepa M., Angappa G., Thanos P., Benjamin H., 2017 Green supply chain performance measures: A review and bibliometric analysis. *Sustainable Production and Consumption*, 85-99.

Duarte A., Sarache W., Costa Y., 2016. Biofuel supply chain design from Coffee Cut Stem under environmental analysis. *Energy*, 100, 321-331.

- Eskandapour M., Dejax P. , Miemczyk J., Péton O., 2015. Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega*, 54, 11-32.
- Estevan M. T., 1983. *Análisis de Impacto Ambiental. Principios, procedimientos y metodologías*. Buenos Aires.
- Fernández-Vítora V., 2010. *Guía metodológica para la Evaluación de Impacto Ambiental*. 4ta Edición. Madrid, España.
- García-Durañoma L., Farreny R., Navarro P., Boschmonart-Rives J., 2016. Life Cycle Assesment of coniferous wood supply chain for pallet production in Catalonia, Spain. *Journal of Cleaner Production*, 137, 178-188.
- Glossary of Environment Statistics, 1997. *Studies in Methods, Series F, No. 67*, United Nations, New York.
- Goedkoop M., Effting S., Collignon M., 1999. *Manual para diseñadores*. PRÉ-consultants B.V.
- Gómez Orea D., Gómez Villarino M. T., 2013. *Evaluación de Impacto Ambiental*. Mundi-Prensa Libros.
- Hervani A.A., Helms M.M., Sarkis J., 2005. Performance measurement for green supply chain management. *Benchmarking An International Journal* 12, 330-353.
- Hiloidhari M., Baruah D.C. , Singh A, Katakai S., Medhi K., Kumari S. , Ramachandra T.V. , Jenkins B.M , Thakur I., 2017. Emerging role of Geographical Information System (GIS), Life Cycle Assessment (LCA) and spatial LCA (GIS-LCA) in sustainable bioenergy planning. *Bioresource Technology*, 242, 218-226.
- Liu W., Lin Ch., Yeh T., 2017. Supply chain optimization of forest biomass electricity and bioethanol coproduction. *Energy*, 139, 630-645.
- Miranda-Ackerman M.A., Azzaro-Pantel C., Aguilar-Lasserre A.A., 2017. A green supply chain network design framework for the processed food industry: Application to the orange juice agro food cluster. *Computers & Industrial Engineering*, 109, 369-389.

- Mirkouei A., Haapala K., Sessions J., Murthy G., 2017. A mixed biomass-based energy supply chain for enhancing economic and environmental sustainability benefits: A multi-criteria decision making framework. *Applied Energy*, 206, 1.008-1.101.
- Modaka N., Ghoshb D., Pandac S., Sana S., 2014. Managing green house gas emission cost and pricing policies in a two-echelon supply chain. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*.
- Murillo-Alvarado P.E., Guillén-Gosálbez G. , Ponce-Ortega J.M., Castro-Montoya A.J., Serna-González M., Jiménez L., 2015. Multi-objective optimization of the supply chain of biofuels from residues of the tequila industry in Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 108, 422-441.
- Pacto Mundial de la ONU y Negocio para Responsabilidad Social, 2010. *Sustentabilidad para la CS: una guía práctica para la mejora continua*.
- Pieragostini C., Mussati M., Aguirre P., 2012. On process optimization considering LCA methodology. *Journal of Environmental Management*, 96, 43-54.
- Santibañez-Aguilar J., González-Campos J., Ponce-Ortega J., Serna-González M., El-Halwagi M., 2014. Optimal planning and site selection for distributed multiproduct biorefineries involving economic, environmental and social objectives. *Journal of Cleaner Production*, 65, 270-294.
- Santibañez-Aguilar J., Morales-Rodriguez R., Gonzalez-Campos J., Ponce-Ortega J., 2016. Stochastic design of biorefinery supply chains considering economic and environmental objectives. *Journal of Cleaner Production*, 136, 224-245.
- Soleimani H., Govindan K., Saghafi H., Jafari H., 2017. Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 109, 191-203.
- Zhu, Q., Cote, R., 2004. Integrating green supply chain management into an embryonic eco-industrial development: a case study of the Guitang Group. *Journal of Cleaner Production*, 12, 1.025–1.035.

## **5 Consideraciones del entorno social en el diseño y optimización de la CS.**

*“El peligro radica en que nuestro poder para dañar el ambiente, o al prójimo aumenta a mayor velocidad que nuestra sabiduría en el uso de ese poder.”*

*Stephen Hawking*

## 5.1 Introducción

Analizar los sistemas productivos desde una perspectiva integral, que no considere solamente aspectos económicos sino también otros elementos que se encuentran en el medio que los rodea, está cobrando relevancia en los últimos tiempos (Ashby y otros, 2.012; Yakoleva y otros, 2.012). El medio natural y social en el cual se lleva adelante la actividad productiva, demanda compromiso en preservar y mejorar sus componentes por parte de los diferentes participantes y niveles de un sistema productivo. El Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la República Argentina, por ejemplo, demuestra su preocupación sobre este tema declarando que las nuevas tecnologías deben ser orientadas a impulsar un modelo basado en el desarrollo inclusivo, a través del fomento a los sistemas tecnológicos sociales, que son un modo de desarrollar e implementar tecnologías (de producto, proceso y organización), orientadas a la generación de dinámicas de inclusión social y económica, y desarrollo sustentable (Plan Argentina Innovadora 2.020).

Existen muchos trabajos que hablan del concepto de sustentabilidad y de las tres dimensiones o pilares que involucra el mismo: social, económica y del medio natural (Valenzuela y otros, 2.016; Seuring, 2.013; Searcy y otros, 2.016). En este contexto existe un énfasis en considerar el aspecto económico de los sistemas productivos, siendo la dimensión social sobre la que menos se trabaja (Searcy y otros, 2.016).

Considerar simultáneamente estas tres dimensiones en el diseño de un sistema de producción no es tarea fácil. Una de las dificultades más importantes es disponer de herramientas que logren medir y evaluar apropiadamente el sistema bajo estudio desde cada punto de vista. Los indicadores sociales nos permiten medir niveles, distribución y cambios en el bienestar social, así como identificar, describir y explicar relaciones

relevantes entre distintas variables referidas al bienestar de las personas. Por este motivo, los indicadores son instrumentos fundamentales para las políticas sociales (Pardo, 2.003).

La investigación en este campo se encuentra todavía en sus principios, y muchas veces estos indicadores están ausentes en los diferentes estudios sobre los sistemas productivos (Seuring, 2.013; Seuring y Muller, 2.008; Gold y otros, 2.010). Esto, sumado a que la dimensión social es la más difícil de evaluar (Popovic y otros, 2.014; Winter y Knemeyer, 2.013), son los principales motivos por los que, de los tres aspectos de sustentabilidad mencionados, sea el menos estudiado. Además, muchas de las variables sociales son difícilmente cuantificables (Valenzuela y otros, 2.016, Mota y otros, 2.015). Por otro lado, el hecho de que no hayan sido profundamente estudiados se debe también a que ha pesado mucho más el aspecto económico, situación que paulatinamente se está revirtiendo a partir del concepto de sustentabilidad.

En el campo del diseño de la CS también prevalece una preferencia por considerar aspectos económicos, mientras que la perspectiva social ha estado ausente en este tipo de trabajos (Chen y otros, 2.014). Si bien existen pocos casos en los cuales se hayan tenido en cuenta indicadores sociales, en lo que respecta al diseño de la CS, la mayoría de ellos no están orientados a evaluar desde una perspectiva estratégica que considere cuestiones sociales relacionadas con el espacio geográfico donde operan (Mota y otros, 2.015).

Entre los indicadores sociales considerados en el diseño de la CS, la generación de empleos es utilizada por varios autores (Cambero y Slowati, 2.014). En este punto es importante aclarar que los empleos generados por un sistema productivo se dividen en tres tipos: directos, indirectos e inducidos. Los primeros son fáciles de cuantificar dado

que se trata de las personas que tienen una relación laboral directa con la empresa objeto de análisis. Los empleos indirectos son los de aquellas empresas, personas, instituciones que prestan servicios de manera directa a la empresa original; mientras que los inducidos son los que se generan por las inversiones que realizan los empleados, directos e indirectos, con los ingresos que perciben por su trabajo. En este contexto, en el trabajo de Yue y otros (2.014), se analiza una cadena de generación de electricidad a partir de materiales celulósicos donde se incluye el aspecto social. Para analizarlo, los autores utilizan el modelo de impacto de desarrollo económico y social (JEDI) desarrollado por National Renewable Energy Laboratory (NREL), perteneciente al Departamento de Energía de Estados Unidos. En el mismo se consideran los empleos directos, indirectos e inducidos que se generan a lo largo de toda la cadena. El problema se formula mediante un programa de optimización mixto entero fraccional lineal (MILFP).

Camero y Slowati (2.016) analizan el diseño de una CS de generación de biocombustible y bioenergía a partir de biomasa forestal. Se consideran aspectos sociales, donde el beneficio social se estima a través de una suma ponderada de las nuevas fuentes de trabajo que son creadas. Estos trabajos son traducidos a horas de trabajo hombre que se realizan tanto en la recolección y generación de biomasa, como en las etapas de construcción y operación de las biorrefinerías. Se considera este beneficio social en un modelo MILP del tipo multiobjetivo, el cuál involucra el beneficio social, el valor presente neto para la perspectiva económica de la CS bajo estudio y las emisiones de gases de efecto invernadero del sistema para la evaluación ambiental. En el trabajo de Miret y otros (2.015) se introducen las tres perspectivas de sustentabilidad en un modelo de optimización MILP multiobjetivo de una CS de generación de bioetanol. La dimensión social considera los trabajos directos, indirectos

e inducidos generados por las unidades de producción. Branca y otros (2.016) analizan la generación de empleos en la cadena de biocombustible calculando el número de pequeños productores que se involucran en la obtención de materia prima para la producción de etanol y biodiesel a partir de diferentes fuentes. Considera los aspectos económicos y sociales mediante una metodología que utiliza una hoja de cálculo para estimar la rentabilidad de la producción de biocombustibles líquidos y el número de pequeños productores involucrados. En este trabajo se concluye que el número de empleos se encuentra íntimamente relacionado con los pequeños productores en este tipo de sistema de producción, y que la producción de biocombustibles puede mejorar la economía rural de los mismos.

En otros casos se han utilizado otras variables para medir el aspecto social. Bhing y otros (2.014) trabajan sobre el diseño de una CS considerando, como indicador en este campo, la seguridad y salud tanto de los trabajadores como de las comunidades donde se instalarán las diferentes unidades de producción. El mismo fue implementado en un proceso de manufactura, que puede realizarse en diferentes ubicaciones del mundo. Se implementa una optimización multiobjetivo que considera los tres pilares de la sustentabilidad, los cuales se suman en una única función objetivo con adecuados pesos de ponderación para cada uno. Para ello, los autores los normalizan con valores entre 0 y 1.

Cambero y Slowati (2.014), haciendo referencia a la inexistencia de indicadores sociales, proponen uno para ser utilizado en el diseño de una CS general. El mismo está relacionado con la cantidad de empleos generados y un factor regional que puede ser variable de acuerdo a las intenciones con la que se quiera estudiar la CS: de desempleo, distribución de la población, ingresos, otros. En el caso de estudio, en particular, distribuyen los empleos generados en sitios con menor densidad de población. El

problema se modela mediante un modelo MILP multiobjetivo. Se genera una curva de Pareto considerando el aspecto social y el económico.

En relación a los antecedentes mostrados anteriormente, se puede observar que la mayoría de los indicadores utilizados por los autores consideran, principalmente, el empleo generado, sin tener en cuenta características del medio donde se instalan. En este punto es importante destacar que, como excepción a lo anterior, Cambero y Slowati (2014) consideran aspectos del medio mediante un factor adimensional, que relaciona una característica de una determinada región con la del país.

En función de esto, este capítulo tiene como objetivo considerar la dimensión social en el diseño de la CS analizando aspectos del entorno donde se ubican las unidades productivas, que cuenta con características sociales particulares que lo diferencian de otros. En este sentido, es importante tener en cuenta el impacto e implicancias que tendrá la ubicación de las industrias en una determinada región geográfica. Por ejemplo, el impacto social no será el mismo si se instala una planta de producción o un polo productivo en un sitio con una población de 1.000 habitantes que en uno con 10.000 habitantes; tampoco será lo mismo instalarla en un lugar donde no existe el desempleo que en un lugar donde si existe. Estas cuestiones son importantes de tener en cuenta a la hora de diseñar una CS, ya que la forma en que se distribuyan las diferentes unidades de producción dentro de las posibles ubicaciones va a afectar al entorno de cada unidad productiva y a los diferentes niveles de la CS.

Uno de los principales problemas en Argentina, así como también en otros países de América Latina, es la ausencia de fuentes de trabajo, lo cual genera desempleo. Se trata de un problema social muy amplio, ya que acarrea un sin fin de otros problemas como: pobreza, exclusión social, desnutrición, condiciones insalubres de vivienda, necesidades

básicas insatisfechas, entre otros. En este sentido, se establece que la continuidad del crecimiento económico es una condición necesaria para reducir las graves dificultades sociales que aún prevalecen en Argentina (UNICEF-CEPAL, 2.005). Una responsabilidad del Estado es traducir este crecimiento en un aumento acelerado del empleo. Una mayor disponibilidad de oportunidades de trabajo, y el consecuente aumento de los ingresos de las personas, puede mejorar las condiciones económicas, disminuir el desempleo y, por lo tanto, la pobreza de una determinada región (OIT, 2.003).

En relación a la descentralización o desconcentración urbana, en la Política Nacional de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PNDOT) propuesta por el gobierno de Argentina, se listan cinco políticas donde dos de ellas: “acceder a los bienes y servicios esenciales, posibilitando el desarrollo personal y colectivo y una elevada calidad de vida en todos los rincones del país”, y “alcanzar el progreso económico según sus capacidades y proyectos personales sin necesidad de abandonar su región de origen”, implican indirectamente desarrollar fuentes de trabajo en regiones donde la actividad productiva es prácticamente nula o de baja intensidad. Esto permitirá no seguir recargando las regiones con mayor actividad económica que, generalmente, son las más pobladas, generando problemas de hacinamiento, mayor impacto sobre el ambiente, etc. Se trata además de evitar situaciones de migraciones internas que no favorecen el desarrollo homogéneo del país.

A partir de estos dos aspectos se propone un indicador social que permita analizar la ubicación de las diferentes unidades de producción en el diseño de la CS considerando cuestiones vinculadas al entorno donde se ubican, con el fin de responder a la metodología de EIA propuesta en el capítulo previo. De esta manera se busca dar una respuesta a la falta de indicadores sociales y la necesidad de considerarlos en el diseño

de los sistemas productivos, teniendo en cuenta que los mismos deben ser factibles de ser incluidos en una formulación matemática que permita la toma de decisiones en un programa de optimización.

Este indicador es implementado en un modelo multiobjetivo resuelto con la metodología  $\varepsilon$ -constraint, donde se consideran los objetivos económico y social. Este enfoque se utiliza para analizar la CS forestal presentada en los capítulos previos.

Es importante aclarar qué, dado que no existen normativas vinculadas al componente social, en función de la metodología de EIA propuesta, en este capítulo sólo se trabajará con el indicador.

## **5.2 Metodología**

En primer lugar se describen los fundamentos para el cálculo del indicador social propuesto en esta tesis. Para esto se requiere conocer una serie de conceptos que se utilizan en su definición, extraídos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC), que se exponen en la Tabla 5.1.

El indicador tiene como objetivo ponderar características específicas de la región geográfica para decidir en qué sitios es preferible instalar las unidades de producción, sin relativizar los valores de acuerdo a un valor promedio de una región o país, como la hacen Cambero y Slowati (2014), y con la posibilidad de considerar más de una característica del entorno.

<i>Términos</i>	<i>Definición</i>
<b>Tasa de Desocupación Abierta (TDA)</b>	Porcentaje de la población desocupada con respecto al total de la población económicamente activa.
<b>Población Económicamente Activa (PEA)</b>	La integran las personas que tienen una ocupación o que sin tenerla la están buscando activamente. Está compuesta por la población ocupada más la población desocupada.
<b>Población Ocupada (PO)</b>	Se incluye a quienes trabajaron aunque sea una hora en la semana inmediata anterior al relevamiento, percibiendo un pago en dinero o en especie por la tarea que realizaron. También a quienes realizan tareas regulares de ayuda en la actividad de un familiar, reciban o no una remuneración por ello, y a quienes se hallan en uso de licencia por cualquier motivo.
<b>Población Desocupada (PD)</b>	Se refiere estrictamente a personas que, no teniendo ocupación están buscando activamente trabajo. No incluye por lo tanto otras formas de precariedad laboral (también relevadas por la Encuesta Permanente de Hogares) tales como las referidas a las personas que realizan trabajos transitorios mientras buscan activamente una ocupación, a aquellas que trabajan jornadas involuntariamente por debajo de lo normal, a los desocupados que han suspendido la búsqueda por falta de oportunidades visibles de empleo, a los ocupados en puestos por debajo de la remuneración mínima o en puestos por debajo de su calificación, etcétera.

Tabla 5.1. Glosario de términos.

Para la construcción del indicador social global ( $I_{sg}$ ) se tuvieron en cuenta dos aspectos principales: el desarrollo de regiones productivas, evitando las migraciones internas y favoreciendo el desarrollo de las poblaciones más pequeñas y postergadas en detrimento de las más grandes, y, por otro lado, la disminución del desempleo. Para esto se consideran diferentes parámetros de los sitios y del sistema bajo análisis: la TDA, la cantidad de habitantes de una determinada región, la PEA y los empleos generados por las unidades de producción.

Con todos estos elementos, se define un indicador  $I_{s_l}$  para cada sitio  $l$ :

$$I_{s_l} = fm \frac{\lambda_l Eg_l}{Hab_l PEA_l - \omega_l Hab_l PEA_l TDA_l} \quad \forall l \quad (5.1)$$

y un indicador social global para todo el sistema ( $I_{sg}$ ):

$$I_{sg} = \sum_l I_{s_l} \quad (5.2)$$

$Hab_l$ ,  $PEA_l$  y  $TDA_l$  son parámetros conocidos del modelo y representan la cantidad de habitantes, la población económicamente activa y la tasa de desempleo, respectivamente, para cada sitio  $l$ , y  $fm$  es un factor de normalización utilizado por cuestiones de escala numérica, con valor 1.000 en esta presentación.

$\lambda_l$  y  $\omega_l$  son parámetros propuestos por el evaluador que corresponden a factores de ponderación para cada  $l$ . Éstos, permiten ponderar, de acuerdo al criterio del decisor, a los desempleados y a los empleos directos en algún sitio por alguna cuestión particular, por ejemplo aspectos políticos o económicos puntuales. Puede afectar a poblaciones

que, pese a tener perfiles similares en los parámetros, se desea tratarlas de distinto modo. Por ejemplo una ciudad que, más allá de sus características sociales, es beneficiada por el gobierno mediante créditos y facilidades para la instalación de industrias. En la sección de resultados se muestra un ejemplo de estas situaciones para cada factor, con el objetivo de comprender mejor su finalidad.

$E_{tl}$  son los empleos generados por las unidades productivas del tipo  $f$  y tamaño  $t$  en el sitio  $l$ . En este punto se pueden considerar tanto empleos directos como indirectos, lo cual queda a criterio del evaluador, y se calcula como muestra la Ec. (5.3).

$$E_{tl} = \sum_{tf} w_{l_{tf}} E_{tf} \quad \forall l \quad (5.3)$$

donde  $E_{tf}$  es un dato conocido y representa los empleos generados por la unidad de producción del tipo  $f$  y tamaño  $t$ .  $w_{l_{tf}}$  es la variable binaria definida en los capítulos previos. En este capítulo se optó por trabajar solamente con los empleos directos.

Con el fin de beneficiar a la población local, se asume en la definición del  $I_{sl}$  que si en un sitio se genera un número mayor de empleos que la cantidad de desempleados existentes, el exceso de puestos de trabajo se cubre con personas provenientes de otras localidades, a las cuales se denomina *Inmigrantes<sub>l</sub>*. En este enfoque del problema, se asume que los *Inmigrantes<sub>l</sub>* no aportan al valor del indicador  $I_{sg}$ . Pero esto no impide que en otros abordajes del problema sean considerados con un tratamiento diferente, e incluso incorporados al  $I_{sg}$  con una ponderación apropiada al caso de estudio. Por lo tanto, se define una nueva variable que se denomina  $E_{gl}$  y representa la cantidad de empleos que son cubiertos por los habitantes del sitio  $l$ .  $E_{tl}$  queda definido como se

muestra en la Ec. (5.4). Mediante la restricción que se presenta en la Ec. (5.5) se logra que los puestos de trabajo que aportan al valor del  $Isg$ , sean como máximo igual a la cantidad de desempleados de ese sitio.

$$Et_l = Eg_l + Inmigrantes_l \quad \forall l \quad (5.4)$$

$$Eg_l \leq Hab_l PEA_l TDA_l \quad \forall l \quad (5.5)$$

El uso del concepto de  $Inmigrantes_l$  se debe a que, como se mencionó anteriormente, el indicador busca distribuir los empleos generados por las empresas con el fin de mejorar la condición social, evaluada por el  $Isg$ . El objetivo es favorecer a las poblaciones pequeñas con un alto índice de desempleo. Este enfoque tiene en cuenta que no es lo mismo incorporar 100 puestos de trabajo en un sitio con 50 desempleados que con 200. Por otro lado, desde el punto de vista social, si en un lugar se asignan más puestos de trabajo que la cantidad de desempleados existentes en el mismo, en cierta manera, se pierde la oportunidad de mejorar la situación social en otro lugar.

De la Ec. (5.2) se puede deducir que el  $Isg$  es adimensional, y para cada sitio el valor máximo que puede tomar el  $Isl$  varía de acuerdo a las condiciones sociales del lugar. Cuanto más grande sea el valor del  $Isg$ , mejor es el desempeño social del sistema. Al consistir en un cociente, cuanto mayor sea el numerador y menor el denominador, será superior el valor de  $Isg$ . El numerador será más grande cuando se generen la mayor cantidad de empleos posibles. En cuanto al denominador, puede observarse que está compuesto por dos términos. El primero de ellos corresponde a la cantidad de habitantes que se encuentran económicamente activos en ese sitio mientras que el segundo a la

cantidad de desempleados. Por lo tanto, cuanto mayor sea la cantidad de desempleados en un sitio, menor será el denominador.

De esta manera, se trata de lograr que con este indicador sea posible ubicar las plantas de modo de promover el desarrollo local, generar fuentes de trabajo en regiones donde existe mayor TDA y fomentar la actividad industrial en sitios con menor PEA, que, generalmente, son las que tienen menor desarrollo industrial. En la sección de resultados se realizan mayores análisis sobre el funcionamiento del *Isg*, que permiten tener una mejor interpretación del mismo.

### 5.2.1 Modelo matemático

Para introducir la perspectiva social a través del *Isg* en el programa matemático de optimización, se utiliza un modelo multiobjetivo, el cual se resuelve mediante la metodología  $\varepsilon$ -constraint descrita en el capítulo 3. En este caso, nuevamente, se utiliza como función objetivo el *Bf* y como restricción paramétrica el *Isg*.

Se agrega una restricción relacionada con la producción, donde lo que produzca la planta tiene que ser al menos el 75% de su capacidad instalada. Se fija esa cota para evitar que instale plantas de mayor capacidad con el fin de incrementar empleos y no de usar su capacidad de producción.

$$\sum_{(p,f) \in \overset{p}{V}(p,f)} Prod_{lfp} \leq 0,75Plmax_{lf} w_{lf} \quad \forall l, f, t \in T_f \quad (5.6)$$

El modelo matemático incluye las ecuaciones (2.1)-(2.7), (2.11), (2.13), (2.15), (2.16), (2.18), (2.19), las (3.1)-(3.11) y aquellas presentadas en la sección anterior (5.1)-(5.6).

Por lo tanto el modelo matemático utilizado en este capítulo quedaría representado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} & \max_{x,y} Bf(x, y) \\ \text{sujeto a: } & \text{ec. (2.1-2.7, 2.11, 2.13, 2.15, 2.16,} \\ & \quad \text{2.18, 2.19, 3.1-3.11, 5.1-5.6)} \\ & \quad Isg \geq \varepsilon \\ & \quad x \in \mathfrak{R}, y \in \{0,1\} \end{aligned}$$

### 5.3 Caso de estudio

El caso de estudio es el mismo presentado en el capítulo 4. Para poder analizar el aspecto social se introducen parámetros vinculados a esta dimensión, los mismos se presentan en las Tabla 5.2 y 5.3.

<i>Sitio</i>	<i>Habitantes</i>	<i>TDA [%]</i>	<i>PEA [%]</i>	$\lambda$	$\omega$
<i>l1</i>	10.000	8,2	47	1	1
<i>l2</i>	11.000	11,0	43	1	1
<i>l3</i>	9.000	8,0	55	1	1
<i>l4</i>	25.000	5,8	46	1	1
<i>l5</i>	20.000	6,9	61	1	1
<i>l6</i>	3.000	8,7	58	1	1
<i>l7</i>	15.600	7,0	47	1	1
<i>l8</i>	21.000	9,0	45	1	1
<i>l9</i>	85.000	8,3	55	1	1
<i>l10</i>	12.000	9,5	63	1	1
<i>l11</i>	3.200	11,0	65	1	1
<i>l12</i>	1.500	15,0	70	1	1

Tabla 5.2. Características sociales de los diferentes sitios.

<i>Capacidades</i>	<i>Unidades productivas</i>			
	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f3</i>	<i>f4</i>
<i>t1</i>	200	160	100	180
<i>t2</i>	120	120	75	150
<i>t3</i>	60	80	40	120

Tabla 5.3. Empleos directos generados por las unidades de producción.

A partir de estos datos se resuelve el modelo matemático y se describen los resultados en la sección siguiente donde se busca, mediante diferentes análisis, comprobar la viabilidad del indicador propuesto y su capacidad para poder evaluar apropiadamente, desde el punto de vista social, el desempeño de una solución.

## **5.4 Resultados**

Esta sección se divide en tres partes. En la primera de ellas se analiza la sensibilidad del  $I_{sg}$ , modificando algunos parámetros presentados en la Tabla 5.2 con el fin de estudiar cómo el indicador reacciona a variaciones en los valores de TDA y PEA. En la segunda se utiliza la formulación multiobjetivo para estudiar los compromisos existentes entre la perspectiva económica y social; además se varía el valor de  $\lambda$  y  $\omega$  para analizar cómo responde el modelo frente a estos cambios. En la última parte de esta sección se compara el indicador propuesto con el indicador social más utilizado por otros autores: empleos generados.

### **5.4.1 Desempeño del $I_{sg}$**

Para verificar el comportamiento del indicador social se propone modificar los parámetros del caso de estudio en dos situaciones extremas: en la primera el porcentaje de desempleados es igual en todos los sitios (escenario 1), con el objetivo de analizar cómo funciona el  $I_{s_l}$  y el  $I_{sg}$  en relación a la PEA; y en la segunda la cantidad de habitantes y el PEA son constantes (escenario 2), para así analizar cómo influye el TDA en el indicador.

En la Tabla 5.4 se observan los resultados de maximizar el  $I_{sg}$  en el escenario 1. Como se expuso anteriormente, la cantidad de habitantes y la PEA influyen en el denominador

de  $I_{s_l}$  y se presentan como una diferencia ( $Hab_l PEA_l - \omega_l PEA_l TDA_l$ ). Al ser  $\omega_l$  y  $\lambda_l$  igual a 1 para todos los sitios y la TDA tener un valor constante, cuánto menor sea el valor de esta diferencia mayor va a ser el valor de  $I_{sg}$  para la misma cantidad de empleos directos. Esto ocurre cuando el valor de los habitantes económicamente activos del sitio es menor, situación que se observa en los resultados expuestos en la tabla.

Al maximizar  $I_{sg}$  se observa una tendencia a generar empleos directos en los sitios con menor PEA, hasta agotar el número de desempleados disponibles. Dado que existe una restricción de capacidad mínima de producción en una unidad instalada (Ec. (5.6)), y además una cota máxima en la cantidad de materia prima disponible, no puede instalar unidades de producción en todos los sitios. Por lo tanto el modelo decide ubicar mayor cantidad de unidades de producción en los sitios de menor valor de PEA, mientras que en los sitios con mayor PEA se instalan menos unidades o, como ocurre en el sitio de mayor PEA, directamente no se instala nada.

Sitio	Hab.	TDA [%]	PEA [%]	TDA [hab]	PEA [hab]	Max $I_{sg}$						
						Empleos directos	Inmi-grantes	Isg	Configuración de las plantas			
									Aserra-deros	Table-ros	Pellets	Etanol
11	10.000	8	47	376	4.700	375		87	t3	t2	t2	t3
12	11.000	8	43	378	4.730	315		72	t2	t2	t2	
13	9.000	8	55	396	4.950	396	4	87	t2	t2	t3	t3
14	25.000	8	46	920	11.500	180		17	t3	t2		
15	20.000	8	61	976	12.200	140		12	t3	t3		
16	3.000	8	58	140	1.740	140	1	87	t3	t3		
17	15.600	8	47	587	7.332	315		47	t2	t2	t2	
18	21.000	8	45	756	9.450	315		36	t2	t2	t2	
19	85.000	8	55	3.740	46.750							
110	12.000	8	63	605	7.560	315		45	t2	t2	t2	
111	3.200	8	65	166	2.080	166	14	87	t3	t2		
112	1.500	8	70	84	1.050	84	16	87	t3		t3	
Total						2.741	35	664				

Tabla 5.4. Resultados escenario 1.

En el escenario 2 se mantienen constantes los valores de PEA y habitantes, lo cual permite observar cómo influye la TDA en el *Isg* en relación a la localización y generación de los empleos. Cuanto mayor sea el valor de TDA, a igual cantidad de PEA, menor será el valor del denominador, esto implicará un valor más grande de *Isg*. Por lo tanto se puede observar en la Tabla 5.5 una tendencia a generar mayor cantidad de empleos directos en los sitios con mayor porcentaje de desempleo.

Sitio	Hab	TDA [%]	PEA [%]	TDA [hab]	PEA [hab]	Max <i>Isg</i>						
						Empleos directos	Inmi-grantes	Is	Configuración de las plantas			
									Aserra-deros	Table-ros	Pellets	Etanol
11	10.000	8.2	45	369	4.500	180		44	t3	t2		
12	10.000	11	45	495	4.500	255		64	t3	t2	t2	
13	10.000	8	45	360	4.500	180		43	t3	t2		
14	10.000	5.8	45	261	4.500	180		42	t3	t2		
15	10.000	6.9	45	310	4.500	180		43	t3	t2		
16	10.000	8.7	45	391	4.500	180		43	t3	t2		
17	10.000	7	45	315	4.500	180		43	t3	t2		
18	10.000	9	45	405	4.500	220		54	t3	t2	t3	
19	10.000	8.3	45	373	4.500	180		44	t3	t2		
110	10.000	9.5	45	427	4.500	255		63	t3	t2	t2	
111	10.000	11	45	495	4.500	435		108	t2	t2	t2	t3
112	10.000	15	45	675	4.500	435		114	t2	t2	t2	t3
Total						2.860		705				

Tabla 5.5. Resultados del escenario 2.

De esta forma se puede concluir de los resultados de las Tablas 5.4 y 5.5 que el  $Isg$  definido en esta tesis favorece instalar las unidades de producción en los sitios con menor PEA y con mayor TDA. En ambos escenarios puede observarse que se instalan unidades productivas de tamaño medio o pequeñas con el fin de generar mayor cantidad de fuentes de trabajo y distribuir las en los diferentes sitios. Desde el punto de vista social no conviene aprovechar las ventajas económicas de la escala de producción.

#### **5.4.2 Función económica vs función social**

En esta sección se resuelve la formulación multiobjetivo, analizando los compromisos existentes entre  $Bf$  y  $Isg$ , a través de la generación de la frontera de Pareto mediante la metodología  $\varepsilon$ -constraint. Se utiliza el modelo multiobjetivo presentado anteriormente con un valor  $h=5$ , para implementar la metodología. En este caso los datos de las características sociales utilizados son aquellos presentados en la Tabla 5.2. Con este valor de  $h$  y la diferencia entre el valor máximo y mínimo de  $Isg$ , se obtienen las diferentes restricciones de  $Isg$  para cada punto:  $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5$  de la Tabla 5.6; siendo  $p_1$  el de menor valor para  $Isg$  y  $p_5$  el de mayor valor. Como se ha aclarado previamente, cuanto mayor sea el  $Isg$  mejor será el desempeño desde la perspectiva social del sistema.

A lo largo de los diferentes puntos se observa como varía el empleo directo generado por las industrias en cada sitio. En primer lugar, sorprende que no exista una tendencia a aumentar significativamente la cantidad de empleos generados a medida que aumenta el valor de  $Isg$ . Esto se debe a que se puede mejorar redistribuyendo la cantidad de

empleos generados en diferentes sitios, favoreciendo las diferentes características sociales del entorno donde se instalan las unidades productivas, las cuales son tenidas en cuenta en el *Isg*. Por ejemplo, del punto 1 al punto 2, los empleos generados disminuyen mientras que el *Isg* aumenta; esto es el resultado de generar fuentes de trabajos en sitios con mayor TDA y menor PEA.

Por otro lado, al observar los empleos generados en los diferentes puntos, se nota una tendencia a distribuirlos en diferentes sitios y no centralizarlos en unos pocos, como sucede en el punto de máximo *Bf*. Como resultado de la economía de escala, es más beneficioso desde el punto de vista económico, instalar las unidades productivas conformando "clústers", con plantas de tamaño medio a grande, reduciendo el costo de transporte e instalación. Desde la perspectiva social, utilizar esta configuración implica centralizar los empleos en pocas ubicaciones. Por otro lado, la economía de escala funciona de manera inversa que desde el punto de vista económico ya que las plantas más pequeñas, por cuestiones de tecnología, tienden a demandar mayor cantidad de mano de obra.

En cuanto a la variación del *Bf*, a medida que se suceden los diferentes puntos, es posible mejorar el *Isg* sin necesidad de sufrir importantes recortes y pérdidas en el mismo. Por ejemplo, comparando los valores de Max *Bf* y el punto 3, *Bf* disminuye un 12%, pero el valor de *Isg* es 3,3 veces mayor. Esto permite afirmar que pequeñas pérdidas en la rentabilidad del sistema permiten alcanzar importantes mejoras desde el punto de vista social. Esto también se reafirma al observar la curva de Pareto (Figura 5.1), pues entre los primeros 4 puntos de la curva (de izquierda a derecha) se puede notar una pendiente poco pronunciada, lo cual indica que si bien mejora notablemente el *Isg*, el *Bf* disminuye muy poco.

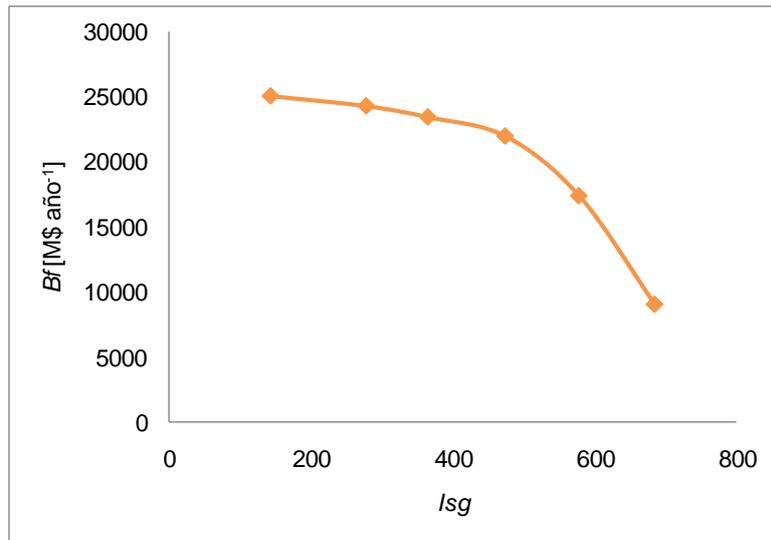


Figura 5.1. Curva de Pareto modelo multiobjetivo.

Sitio	Hab.	TDA [%]	PEA [%]	TDA [hab]	PEA [hab]	Empleos directos					Inmigrantes					Isg							
						Max Bf	p1	p2	p3	p4	p5	Max Bf	p1	p2	p3	p4	p5	Max Bf	p1	p2	p3	p4	p5
<i>l1</i>	10.000	8,2	47	385	4.700	280	280		60	120	240						65	65		14	28	56	
<i>l2</i>	11.000	11	43	520	4.730			360	60	430	435								86	14	102	103	
<i>l3</i>	9.000	8	55	396	4.950					120	280										26	61	
<i>l4</i>	25.000	5,8	46	1450	11.500	430	430	430	430								40	40	40	40			
<i>l5</i>	20.000	6,9	61	842	12.200	435	315	295	355								38	28	26	31			
<i>l6</i>	3.000	8,7	58	151	1.740		60	60	120	120	151					29		38	38	76	76	95	
<i>l7</i>	15.600	7	47	513	7.332						180											26	
<i>l8</i>	21.000	9	45	850	9.450																		
<i>l9</i>	85.000	8,3	55	3880	46.750																		
<i>l10</i>	12.000	9,5	63	718	7.560		280			355	300							41			52	44	
<i>l11</i>	3.200	11	65	228	2.080				228	220	228				52	12				123	119	123	
<i>l12</i>	1.500	15	70	157	1.050		60	157	157	157	157			23	23	23	3		67	176	176	176	
<b>Total</b>						<i>1.145</i>	<i>1.425</i>	<i>1.302</i>	<i>1.410</i>	<i>1.522</i>	<i>1.971</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>23</i>	<i>75</i>	<i>23</i>	<i>44</i>	<i>143</i>	<i>278</i>	<i>365</i>	<i>474</i>	<i>578</i>	<i>685</i>
<b>Isg</b>						143	278	365	474	578	685												
<b>Bf [M\$ año<sup>-1</sup>]</b>						25.051	24.277	23.428	21.956	17.354	8.984												

*\*p1, p2, p3, p4, p5 son puntos de la curva de Pareto.*

Tabla 5.6. Resultados del modelo multiobjetivo.

Mejorar el *Isg* implica, por un lado, descentralizar la producción: las soluciones pasan de instalar plantas de producción en tres sitios (*Max Bf*), a instalarlas en ocho sitios (por ejemplo p3 y p5). En el contexto de esta tesis, se puede afirmar que esta acción genera un impacto positivo muy importante desde el punto de vista social, situación que sería interesante evaluar también desde una perspectiva económica más amplia: por ejemplo, analizar qué impacto tiene instalar las unidades productivas en cada sitio dado que podría reactivar y/o aumentar la actividad económica generando mayor cantidad de trabajos inducidos e indirectos.

Por otro lado, esta situación disminuye la TDA promedio de los sitios donde se instalan plantas en la solución obtenida (Tabla 5.7). Esta es una de las capacidades importantes del indicador propuesto, ya que podría ser utilizado con el fin de disminuir el desempleo medio de una región.

Sitio	Valor inicial	TDA [%]					
		Max <i>Bf</i>	p 1	p 2	p 3	p 4	p 5
<i>l1</i>	8,2	2,2	2,2	8,2	6,9	5,6	3,1
<i>l2</i>	11	11,0	11,0	3,4	9,7	1,9	1,8
<i>l3</i>	8	8	8	8	8	5,6	2,3
<i>l4</i>	5,8	2,1	2,1	2,1	2,1	5,8	5,8
<i>l5</i>	6,9	3,3	4,3	4,5	4,0	6,9	6,9
<i>l6</i>	8,7	8,7	5,3	5,3	1,8	1,8	0
<i>l7</i>	7	7	7	7	7	7	4,5
<i>l8</i>	9	9,0	9,0	9,0	9,0	9	9
<i>l9</i>	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
<i>l10</i>	9,5	9,5	5,8	9,5	9,5	4,8	5,5
<i>l11</i>	11	11,0	11,0	11,0	0	0,4	0
<i>l12</i>	15	15,0	9,3	0	0	0	0
<b>Promedio</b>	9,0	7,9	6,9	6,4	5,5	4,8	4,0

Tabla 5.7. Variación de la TDA media en cada solución.

En cuanto a la producción, se observa que no hay variaciones notables en la cantidad generada de cada producto, pero existe una tendencia a instalar mayor cantidad de unidades de producción de menor tamaño para disponer de cantidades similares de capacidad instalada (Tabla 5.8). Al instalar plantas más pequeñas se requiere mayor número de empleados en comparación con las más grandes para generar la misma cantidad de producto, debido a la economía de escala.

		Aserraderos [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]	Tableros [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]	Pellets [T año <sup>-1</sup> ]	Etanol [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]	
Tamaños	<i>t1</i>	1	3			<b>Max Bf</b>
	<i>t2</i>	2		1	1	
	<i>t3</i>					
	<i>Producción</i>	76.499	225.485	9.000	27.245	
	<i>Cap. Instalada</i>	90.000	240.000	9.000	30.000	
Tamaños	<i>t1</i>		3			<b>punto 3</b>
	<i>t2</i>	4	1	1	1	
	<i>t3</i>	3				
	<i>Producción</i>	76.500	223.602	6.750	26.770	
	<i>Cap. Instalada</i>	93.000	265.000	9.000	30.000	
Tamaños	<i>t1</i>		2			<b>punto 5</b>
	<i>t2</i>	4	6	1		
	<i>t3</i>	3			2	
	<i>Producción</i>	76.500	246.737	6.750	24.300	
	<i>Cap. Instalada</i>	93.000	310.000	9.000	30.000	

Tabla 5.8. Variación en la producción en el modelo multiobjetivo.

Para comprender las implicancias del *Isg* en el diseño de la CS, se compara la configuración de la misma entre dos puntos: máximo *Bf* y el punto 3.

La principal diferencia entre ambos son los tamaños de cada unidad productiva: de la Tabla 5.8 se observa que se instalan mayor cantidad de aserraderos de menor tamaño en el p3 y se agrega una planta de tableros. Además los sitios donde se instalan las unidades varían para favorecerlos desde la perspectiva social (Tabla 5.6).

En cuanto a la producción, no existen grandes variaciones en las cantidades totales de cada producto (Tabla 5.8). En el p3 aumenta la capacidad instalada y disminuye levemente la producción. Esto sucede porque se permite un uso parcial de las unidades instaladas (75%).

En los costos, la variación más notable se da en el de transporte, el cual se incrementa 25% en el punto 3 comparado con el punto máximo *Bf*. Esto está estrechamente relacionado con la distribución de las unidades de producción: al encontrarse más dispersas es necesario recorrer mayor distancia para vincular los diferentes sitios. Respecto a los otros costos no se presentan variaciones significativas.

#### **5.4.2.1 Modificaciones en los valores de $\lambda$ y $\omega$**

En este apartado se presentan variaciones en los valores de  $\lambda$  y  $\omega$  para mostrar su utilidad y funcionamiento. El primer parámetro se utiliza para potenciar el valor de los puestos de trabajo creados, por ejemplo, en sitios que estuvieron mucho tiempo sin inversión por parte del mercado privado; mientras que el segundo sirve para beneficiar algún lugar en particular por alguna característica, por ejemplo, para enfatizar que los desempleados son mano de obra calificada en ese rubro, por la zona en que se encuentran, o la trayectoria industrial del lugar.

En la Tabla 5.9 y Tabla 5.10 se presentan modificaciones en los valores de  $\lambda_l$  y  $\omega_l$  respectivamente. Las modificaciones se hacen con el objetivo de comparar con la configuración de la CS presentada en la Tabla 5.6. En esta instancia cabe aclarar que los valores presentados para estos parámetros se proponen a modo de ejemplo y que en un

caso real debería realizarse una justificación detallada sobre los valores elegidos a partir de la situación específica de cada sitio  $l$ .

Se modifican los valores de  $\lambda_l$  para el sitio 13, 110 y 111. Si comparamos los resultados obtenidos con aquellos mostrados en la Tabla 5.6 se advierte que en este caso existe una preferencia en generar empleos en estos sitios. En 13 se instalan unidades productivas a partir del punto 1, mientras que antes no lo hacía. En 110 y 111 también existe una tendencia similar. Al pesar estos sitios con un valor mayor de  $\lambda_l$  se observa que, por ejemplo, el sitio 112 dejó de tener el peso que tenía anteriormente y por este motivo prefiere generar empleos en otras ubicaciones en los primeros puntos; con los sitios 11 y 12 sucede lo mismo.

En general existe una tendencia a redistribuir los empleos generados en los diferentes sitios para mejorar el  $Isg$ . A diferencia del caso general, se necesita menor cantidad de empleos para lograr mejores valores del indicador, lo cual es lógico dado que en algunos sitios los empleos directos equivalen al doble de su valor real por el factor  $\lambda_l$ .

Los valores de  $\omega_l$  fueron modificados en dos sitios, 13 y 111, donde sucede algo similar a lo explicado con el valor de  $\lambda_l$ . Nuevamente, al comparar con los resultados mostrados en la Tabla 5.6, se observa que en el sitio 13 se generan empleos a partir del punto 3 y en el sitio 111 a partir del punto 2, situación que antes no sucedía.

Sitio	$\lambda$	Habitantes	TDA [%]	PEA [%]	TDA [Hab]	PEA [hab]	Empleos directos					Inmigrantes						
							Max Bf	p1	p2	p3	p4	p5	Max Bf	p1	p2	p3	p4	p5
<i>l1</i>	1	10.000	8.2	47	385	4.700	280					60						
<i>l2</i>	1	11.000	11	43	520	4.730						280						
<i>l3</i>	2	9.000	8	55	396	4.950		360	60	280	396	360					34	
<i>l4</i>	1	25.000	5.8	46	1450	11.500	430	370	430	370								
<i>l5</i>	1	20.000	6.9	61	842	12.200	435	315	315	355								
<i>l6</i>	1	3.000	8.7	58	151	1.740			60	60	120	151						29
<i>l7</i>	1	15.600	12	47	513	7.332						60						
<i>l8</i>	1	21.000	11.1	45	850	9.450												
<i>l9</i>	1	85.000	10.2	55	3880	46.750												
<i>l10</i>	2	12.000	9.5	63	718	7.560		280	280		280	475						
<i>l11</i>	2	3.200	11	65	228	2.080			228	228	228	228			52	12	52	12
<i>l12</i>	1	1.500	15	70	157	1.050				120	157	157					158	23
<b>Total</b>							1.145	1.325	1.373	1.413	1.181	1.771	0	0	52	12	244	64
<b>Isg</b>							143	302	460	607	754	904						
<b>Bf [M\$ año<sup>-1</sup>]</b>							25.051	24.421	23.343	22.349	20.331	12.431						

Tabla 5.9. Resultados para el caso con valores de  $\lambda_i$  modificados.

Sitio	$\omega$	Habitantes	TDA [%]	PEA [%]	TDA [Hab]	PEA [hab]	Empleos directos					Inmigrantes						
							Max Bf	p1	p2	p3	p4	p5	Max Bf	p1	p2	p3	p4	p5
11	1	10.000	8.2	47	385	4.700	280	280	60	60	60	280						
12	1	11.000	11	43	520	4.730				120	280	280						
13	4	9.000	8	55	396	4.950			60	396	370	375					34	
14	1	25.000	5.8	46	1.450	11.500	430	430	430	60								
15	1	20.000	6.9	61	842	12.200	435	315	355		355							
16	1	3.000	8.7	58	151	1.740		60	120	120	120	151						29
17	1	15.600	12	47	513	7.332						180						
18	1	21.000	11.1	45	850	9.450												
19	1	85.000	10.2	55	3.880	46.750												
110	1	12.000	9.5	63	718	7.560		280		355	295	300						
111	2	3.200	11	65	228	2.080			228	228	228	228				52	12	12
112	1	1.500	15	70	157	1.050		60	157	157	157	157			23	23	3	23
<b>Total</b>							1.145	1.425	1.410	1.496	1.865	1.951	0	0	23	75	49	64
<b>Isg</b>							143	278	495	609	657	726						
<b>Bf [M\$ año]</b>							25.051	24.277	23.282	21.949	18.079	10.094						

Tabla 5.10. Resultados para el caso con los valores de  $\omega_1$  modificados.

### 5.4.3 Indicador $I_{seg}$ vs empleos generados

Como se mencionó en la introducción del presente capítulo, uno de los indicadores más utilizados para analizar la dimensión social es la cantidad de empleos generados, que para esta sección se lo denomina  $I_{seg}$ . El objetivo es comparar cómo se comporta el caso de estudio si se utiliza como indicador social la cantidad de empleos generados, el cual ha sido utilizado por otros autores (Yue y otros, 2014; Branca y otros, 2016). En este caso estamos frente a un modelo multiobjetivo similar al planteado anteriormente, con la diferencia que la perspectiva social utiliza el indicador  $I_{seg}$ :

$$I_{seg} = \sum_{l_{if}} w_{l_{if}} E_{l_{if}} \quad (5.7)$$

Nuevamente se utiliza la metodología  $\varepsilon$ -constraint para obtener la curva de Pareto con un valor  $h=5$ , donde el valor de  $I_{seg}$  va aumentando en cada uno de los puntos.

En la Tabla 5.11 se presenta el  $I_{seg}$  y el  $B_f$  obtenido en los diferentes puntos. En cuanto a los empleos que se generan a lo largo de la CS, existe una tendencia a aumentarlos en cada punto de la curva. Al exigir un valor mínimo para el  $I_{seg}$  en las diferentes iteraciones, es necesario instalar mayor cantidad de plantas y de menor tamaño, dado que éstas requieren, por una cuestión de escala, mayor cantidad de puestos de trabajo. A medida que se suceden los puntos, los tamaños de las plantas instaladas son menores y la capacidad utilizada también es menor. En la última iteración ésta llega a ser del 75% (cota mínima impuesta para esta variable) para todos los casos, a excepción del etanol, debido al agotamiento de la disponibilidad de materia prima. En el caso de las plantas de etanol influye también el tamaño de las plantas, dado que para producir el 75% de la

más pequeña es necesaria gran cantidad de materia prima, y como este tipo de unidad productiva genera menos empleos que las otras, decide no instalar más plantas.

La curva de Pareto (Figura 5.2) en este caso, tiene una pendiente pronunciada en los últimos puntos. Esto implica que mejorar el valor del *Iseg* repercute notablemente en el beneficio económico de la CS, disminuyendo notablemente el mismo. Si se compara con la Figura 5.1, se observa que la pendiente es mucho mayor en el caso en que se considera el *Iseg*.

<b>Empleos generados</b>						
Sitio	Max Bf	p1	p2	p3	p4	p5
<i>l1</i>	280	280	280	280	240	240
<i>l2</i>		60	60	60	240	240
<i>l3</i>		60	300	300	300	180
<i>l4</i>	430	430	355	355	355	315
<i>l5</i>	435	315	300	300	300	180
<i>l6</i>		60	60	240	180	240
<i>l7</i>						180
<i>l8</i>					140	180
<i>l9</i>			60	180	180	180
<i>l10</i>		280	280	180	180	300
<i>l11</i>			60	60	180	180
<i>l12</i>				60		180
<b><i>Iseg</i></b>	1.145	1.485	1.755	2.015	2.295	2.595
<b><i>Bf</i> [M\$ año<sup>-1</sup>]</b>	25.051	23.892	19.138	14.113	7.470	-524

Tabla 5.11. Empleos generados en los diferentes puntos de análisis.

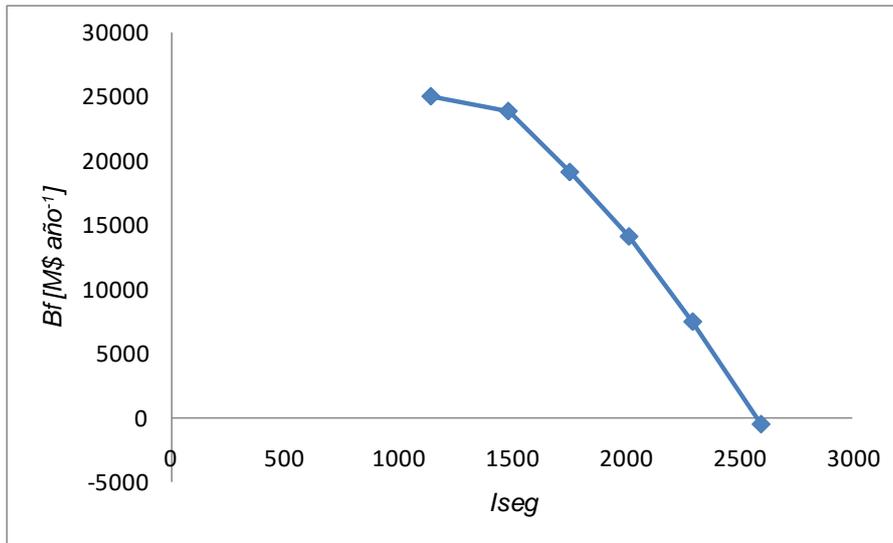


Figura 5.2. Curva de Pareto *Iseg*

En cuanto a los productos generados, en la Tabla 5.12 se presenta la cantidad para cada punto. Para comprender lo que sucede es importante saber que la producción de tableros y etanol son las de mayor rentabilidad económica, mientras que la de pellets es la de menor. Por otro lado, la producción de madera es la que requiere mayor cantidad de mano de obra por tonelada de materia prima procesada, mientras que la de etanol es la que requiere menor cantidad.

Respecto a la producción de madera existe una tendencia a aumentarla a lo largo de los sucesivos puntos, mientras que la producción de etanol disminuye, con el objetivo de enviar la materia prima utilizada para generar este producto a otro tipo de unidad productiva y así generar más fuentes de trabajo.

	<i>Max Bf</i>	<i>p1</i>	<i>p2</i>	<i>p3</i>	<i>p4</i>	<i>p5</i>
Madera [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]	76.500	77.853	76.500	80.735	77.250	82.500
Tableros [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]	225.485	225.000	264.288	243.796	248.758	225.000
Pellets [T año <sup>-1</sup> ]	9.000	6.750	6.809	6.750	6.750	6.750
Etanol [m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ]	27.245	26.160	24.300	24.300	24.300	24.300

Tabla 5.12. Producción en los diferentes puntos del análisis de *Iseg*.

En todos los casos la generación de empleos se ve acotada por la disponibilidad de materia prima, dado que siempre agota los recursos disponibles.

Si se comparan ambos indicadores se puede concluir que el primero de ellos permite distribuir los empleos y las unidades de producción de acuerdo a las características de la región, con una tendencia a localizar las mismas en sitios con menor PEA y mayor TDA.

Al observar los primeros cuatro puntos de ambas curvas de Pareto (Figura 5.1 y Figura 5.2), se puede afirmar que un mejor desempeño del *Isg* no implica una modificación notable del beneficio económico de la CS bajo análisis; pero no sucede lo mismo con el *Iseg*. Esto también puede afirmarse al analizar las Tabla 5.6 y Tabla 5.11, comparando los resultados obtenidos para el punto 3, por ejemplo. En la primera de ellas se observa que la cantidad de empleos generados es equivalente a 1.410 con un *Bf* de M\$ 21.956 año<sup>-1</sup> mientras que en la segunda es igual a 2.015 empleos con *Bf* de M\$ 14.113 año<sup>-1</sup>. Esto implica que al utilizar el *Iseg* en el análisis multiobjetivo, éste influye de manera más negativa que el *Isg* en la perspectiva económica.

Por otro lado, para el *Isg* generar mayor cantidad de empleos no es una condición necesaria para obtener un mejor valor de este indicador. Solamente con redistribuirlos en zonas con menor población y/o mayor porcentaje de desempleados se logra una mejora. Al medir la perspectiva social mediante el *Iseg*, existe una tendencia a instalar plantas en todos los sitios posibles con el objetivo de generar empleos. Esto sucede porque no importan las características del entorno de cada ubicación, como es el caso del *Isg*.

## **5.5 Conclusiones**

Frente a la falta de indicadores o metodologías que consideren la perspectiva social en el diseño de la CS, en este capítulo se desarrolló un indicador con el fin de suplir estas deficiencias. El objetivo principal de este indicador es introducir aspectos del entorno a la hora de considerar el análisis social en la localización de las unidades productivas en el diseño de la CS. Fue implementado en el análisis de la CS forestal, mediante un modelo multiobjetivo.

El *Isg* propuesto es una herramienta de sencilla aplicación. Por un lado utiliza datos que fácilmente se obtienen para una localidad, región, entre otros, y que, en general, se encuentran disponibles en diferentes bibliografías o informes presentes en Internet. Por ejemplo en Argentina los genera el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC) y se encuentran al alcance de todos en su página web. Por otro lado, es una expresión matemática simple que no requiere de cálculos complejos a la hora de implementarlo.

A través de este indicador se busca localizar las unidades de producción en sitios con mayor TDA y menor PEA, con el fin de descentralizar la localización de las industrias. Los resultados muestran que se puede lograr a través de *Isg*.

Al aplicar la perspectiva social en el diseño de la CS se observa que se modifica su configuración y características, por lo que tiene importantes repercusiones. De acuerdo a los resultados obtenidos, al utilizar el *Isg* se puede mejorar el desempeño social notablemente sin disminuir abruptamente el beneficio económico. Esta es una consecuencia que no se alcanza si se implementan otros indicadores, por ejemplo *Iseg*.

Con todo esto se puede afirmar que, desde el punto de vista social, considerar las características del entorno a la hora de instalar una industria tiene un impacto significativo.

### Bibliografía

Ashby A., Leat M., Hudson-Smith M., 2012. Making connections: A review of supply chain management and sustainability literature. *Supply Chain Management*, 17, 497-516.

Bhinge R., Moser R., Moser E., Lanza G., Dornfeld D., 2014. Sustainability Optimization for Global Supply Chain Decision-making. *Procedia CIRP*, 26, 323-8.

Branca G., Cacchiarelli L., Maltoglou I., Rincon L., Sorrentino A., Valle S., 2016. Profits versus jobs: Evaluating alternative biofuel value-chains in Tanzania. *Land Use Policy*, 57, 229-40.

Camero C., Sowlati T., 2014. Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives - A review of literature. *Renew Sustain Energy Rev*, 36, 62-73.

Cambero C., Sowlati T., 2016. Incorporating social benefits in multi-objective optimization of forest-based bioenergy and biofuel supply chains. *Appl Energy*, 178, 721-35.

Chen L., Olhager J., Tang O., 2014. Manufacturing facility location and sustainability: A literature review and research agenda. *Int J Prod Econ*, 149, 154-63.

Glosario INDEC. n.d. <http://www.indec.gov.ar/glosario.asp>. Última visita: enero de 2017.

Gold S., Seuring S., Beske P., 2010. The constructs of sustainable supply chain management - A content analysis based on published case studies. *Prog Ind Ecol*, 7, 114-37.

Ministerio de Planificación Federal IP y S, 2004. Política y Estrategia Nacional de Desarrollo y Ordenamiento Territorial.

Miret C., Chazara P., Montastruc L., Negny S., Domenech S., 2016. Design of bioethanol green supply chain: Comparison between first and second generation biomass concerning economic, environmental and social criteria. *Comput Chem Eng*, 85, 16-35.

Mota B., Gomes M., Carvalho A., Barbosa-Póvoa A., 2015. Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning. *J Clean Prod*, 105, 14-27.

Oficina Internacional del Trabajo, 2003. Superar la pobreza mediante el trabajo, memoria del Director General. Ginebra.

Pardo M., 2003. Estudios estadísticos y prospectivos. Reseña de programas sociales para la superación de la pobreza en América Latina. CEPAL, octubre de 2003.

Popovic T., Kraslawski A., Heiduschke R., Repke J-U., 2014. Indicators of Social Sustainability for Wastewater Treatment Processes. *Proc 8Th Int Conf Found Comput Process Des*, 34, 723-8.

Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, 2013. Argentina Innovadora 2020.

Searcy C., Dixon S.M., Patrick Neumann W., 2016. The use of work environment performance indicators in corporate social responsibility reporting. *J Clean Prod*, 112, 2.907-21.

Seuring S., Muller M., 2008. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *J Clean Prod*, 16, 1.699-710.

Seuring S., 2013. A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. *Decis Support Syst*, 54, 1.513-20.

UNICEF-CEPAL, 2005. Efectos de la crisis en Argentina. Las políticas del Estado y sus consecuencias para la infancia.

Valenzuela-Venegas G., Salgado JC., Díaz-Alvarado F., 2016. Sustainability indicators for the assessment of eco-industrial parks: classification and criteria for selection. *J Clean Prod*, 133, 99-116.

Winter M., Knemeyer A. M., 2013. Exploring the integration of sustainability and supply chain management: Current state and opportunities for future inquiry. *Int J Phys Distrib Logist Manag*, 43, 18-38.

Yakovleva N., Sarkis J., Sloan T., Taylor P., Yakovleva N., Sarkis J., 2012. Sustainable benchmarking of supply chains : the case of the food industry. *Int J Prod Res*, 50, 37-41.

Yue D., Slivinsky M., Sumpter J., You F., 2014. Sustainable design and operation of cellulosic bioelectricity supply chain networks with life cycle economic, environmental, and social optimization. *Ind Eng Chem Res*, 53, 4.008-29.

**6 Consideraciones del entorno natural y social aplicados al diseño y optimización de la CS, en el contexto de la metodología de EIA.**

*“Usted no puede esperar construir un mundo mejor sin mejorar a las personas. Cada uno de nosotros debe trabajar para su propia mejora.”*

*Marie Curie*

## 6.1 Introducción

En este capítulo se implementa la metodología de EIA propuesta en el capítulo 4 teniendo en cuenta el medio natural y social en el análisis de la CS forestal. El objetivo es estudiar cómo influye considerar ambos medios en el diseño del sistema bajo estudio a través de los diferentes indicadores propuestos, con el fin de lograr un diseño de la CS con mayor sustentabilidad. En capítulos previos quedó demostrada la importancia que tiene introducir consideraciones vinculadas a los diferentes medios y las modificaciones que se producen en el diseño de la CS.

## 6.2 Metodología y caso de estudio

La metodología aplicada es igual a la que se utilizó en el capítulo 4, donde se busca maximizar el  $Bf$  considerando valores máximos para el  $IASG$  e  $Ip_l$  y un valor mínimo para el  $Isg$ . En este caso no se considera la normativa dado que, como se comprobó previamente, la solución sería infactible. Esto no excluye la posibilidad de incluirlo en otro caso.

El modelo matemático incluye las ecuaciones (2.1-2.7, 2.11, 2.13, 2.15, 2.16, 2.18, 2.19), las (3.1-3.11), las (4.1-4.35) y las (5.1-5.5); considerando un valor mínimo para el  $Isg$ , quedando expresado de la siguiente manera.

$$\begin{aligned} & \max_{x,y} Bf(x, y) \\ \text{sujeto a: ec. } & (2.1-2.7, 2.11, 2.13, 2.15, 2.16, \\ & 2.18, 2.19, 3.1-3.11, \\ & 4.1-4.35, 5.1-5.5) \\ & Isg \geq Isgmin \\ & x \in \mathfrak{R}, y \in \{0,1\} \end{aligned}$$

El caso de estudio es el mismo que se describió en los capítulos 4 y 5.

### **6.3 Resultados**

Para analizar cómo responde el modelo formulado y los indicadores propuestos se asume un valor máximo de *IASG* igual a 2%, para el *Ip* se utilizan los criterios expuestos en el capítulo 4 y para el *Isg* se asume un valor mínimo igual a 36, valor equivalente a la segunda iteración del análisis multiobjetivo de *Bf* vs *Isg* realizado en el capítulo 5. Por una cuestión práctica al caso que se estudia en este capítulo, se lo denomina "escenario 7" con el fin de dar una continuación lógica de acuerdo a la numeración presentada en el capítulo 4. Los valores que se utilizan como restricciones en el modelo son a modo de ejemplo, pero los mismos pueden ser modificados fácilmente de acuerdo a criterios del diseñador.

Si se observa la Tabla 6.1 y se compara el escenario 7 con el caso base del capítulo 4, se puede notar que no existe gran variación en la cantidad total de productos generados y la materia prima utilizada. En cuanto al *Bf*, al considerar los diferentes indicadores, disminuye un 18% siendo para el escenario 7 equivalente M\$ 20.647 anuales. En la Figura 6.1 se muestra la configuración adoptada.

	<b>Caso base</b>	<b>Escenario 7</b>
<b>% de la demanda máxima suplida</b>		
<i>Madera</i>	34,38%	34,38%
<i>Tableros</i>	36,96%	36,71%
<i>Pellets</i>	3,67%	3,63%
<i>Etanol</i>	5,14%	4,58%
<b>% de troncos utilizados</b>	99,28%	96,02%
<b>% de residuos utilizados</b>	95,94%	100%
<b>Producción</b>		
<i>Madera [m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>]</i>	76.500	76.500
<i>Tableros [m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>]</i>	225.484	223.914
<i>Pellets [T año<sup>-1</sup>]</i>	9.000	8.904
<i>Etanol [T año<sup>-1</sup>]</i>	27.245	24.300
<b>Beneficio [M\$ año<sup>-1</sup>]</b>	25.051	20.647

Tabla 6.1. Resultados caso base vs escenario 7.

Al comparar la Tabla 6.2 con la Tabla 4.10 se puede observar que existe una tendencia de distribuir las unidades de producción en mayor cantidad de sitios, disminuyendo su capacidad instalada y su producción. Así, por ejemplo, si comparamos con el caso base, se puede ver que no se instalan aserraderos de la capacidad mayor, sino de mediana y pequeña escala con el objetivo de redistribuir los empleos en diferentes sitios.

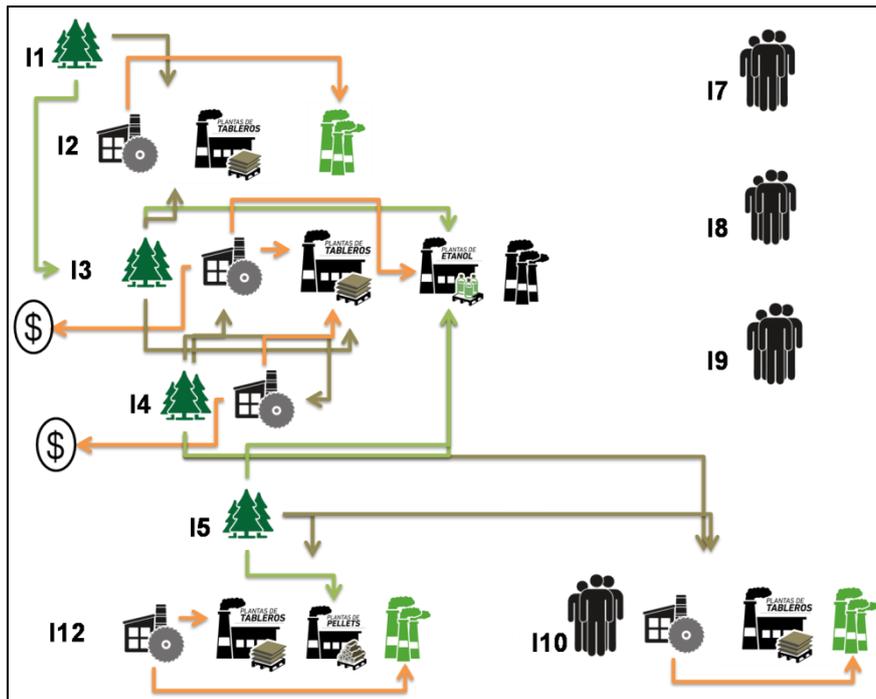


Figura 6.1. Configuración del escenario 7.

Las unidades de producción se instalan en cinco sitios, con el fin de maximizar el  $Bf$  y cumplir con los valores requeridos para los indicadores.

En el sitio 12 se ubican un aserradero y una planta de tableros. Como se mencionó anteriormente, si bien el valor de DQO del curso de agua en este sitio es bajo, el caudal es alto; esto hace que la modificación sobre la calidad de agua sea despreciable. En cuanto al aspecto social es un sitio con cantidad de población media pero con una TDA relativamente alta, lo cual implica que sea atractivo producir en este sitio.

En el sitio 13 se conforma un clúster en el cuál se instalan 3 tipos de plantas: aserraderos, tableros y etanol. Es un sitio de materia prima con una tolerancia que permite instalar una gran superficie. Además el gran caudal que posee el curso de agua genera una alteración despreciable en este. La cantidad de habitantes es relativamente baja y la TDA es alta, lo que hace que sea un sitio atractivo socialmente.

El sitio I4 es un sitio de materia prima que se encuentra en un punto estratégico, ya que está cercano a las zonas de demanda y a otros sitios. Si bien no es atractivo desde el punto de vista social, sí lo es económicamente.

El sitio I10 y I12 tienen en común que se caracterizan por tener baja cantidad de habitantes y una alta TDA; además ambos tienen gran tolerancia en la cantidad de m<sup>2</sup> a instalar, debido a los m<sup>2</sup> construidos inicialmente. Por otro lado se caracterizan por contar con un curso de agua de gran caudal, lo que hace despreciable la alteración sobre su calidad. En cuanto al aspecto social, ambos son atractivos pero el sitio I12 tiene menor cantidad de habitantes que el I10, por lo que se decide aumentar los puestos de trabajo en I12 instalando mayor cantidad de unidades de producción (Tabla 6.2).

	I2	I3	I4	I10	I12
Aserraderos	●	●	●	●	●
Plantas de tableros	○	○		○	●
Plantas de pellets					●
Plantas de etanol		●			
Capacidades			○ t1	● t2	● t3
verde: sitio de materia prima; azul: sitio de clientes; negro: sitio intermedio.					

Tabla 6.2. Tamaño y distribución de las unidades de producción en el escenario 7.

	I1	I4	I5
Aserraderos	●	●	○
Plantas de tableros	○	○	○
Plantas de pellets			●
Plantas de etanol		●	
Capacidades	○ t1	● t2	● t3
verde: sitio de materia prima; azul: sitio de clientes; negro: sitio intermedio.			

\*Las plantas de tamaño t4 tienen producción nula, por lo tanto no se presentan en la tabla.

Tabla 6.3. Tamaño y distribución de las unidades de producción en el caso base.

De la Tabla 6.4 se puede observar los diferentes valores para *IAS* e *Is* para cada sitio, en concordancia con lo que se explicó previamente.

	12	13	14	110	112	<b>Total</b>
<b><i>IAS [%]</i></b>	0,001	0,001	0	0,6	0	0,603
<b><i>Is</i></b>	66,5	86,95	5,5	40,9	176,5	376,35

Tabla 6.4. Valores de IAS e IS para el escenario 7.

La principal variación del *Bf* al comparar el caso base y el escenario 7 está dada por el costo de transporte (Tabla 6.5), especialmente debido a las distancias entre las unidades de producción y de suministro de materia prima. El siguiente motivo es el costo de instalación, ya que ahora se produce una cantidad similar pero en más unidades productivas y más pequeñas.

	<b>Caso base</b>	<b>Escenario 7</b>
<i>Transporte</i>	8.239	11.960
<b>Costos</b> <i>Materia prima</i>	12.909	12.909
<b>[M\$ año<sup>-1</sup>]</b> <i>Instalación</i>	24.827	25.740
<i>Producción</i>	51.081	51.081
<b>Ventas [M\$ año<sup>-1</sup>]</b>	122.103	122.337
<b><i>Bf</i> [M\$ año<sup>-1</sup>]</b>	25.051	20.647

Tabla 6.5. Costos y ventas del caso base y el escenario 7.

En la Figura 6.2 se muestra un gráfico donde se puede ver la variación de los diferentes costos, y el beneficio a lo largo de los diferentes escenarios, estudiados en el capítulo 4 y 6.

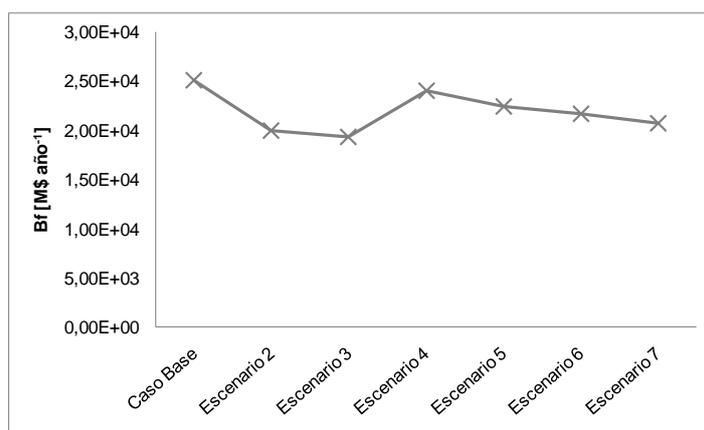


Figura 6.2.  $Bf$  para los diferentes escenarios analizados.

Se puede observar que no existen diferencias significativas en los valores de los puntos representados, a excepción del escenario 2 y 3 donde no se permite la instalación de plantas de etanol debido a las restricciones impuestas por la normativa, y el beneficio disminuye por ser esta una producción rentable. Esto demuestra que considerar las variables del entorno del sitio donde se pueden instalar las distintas unidades de producción tiene una consecuencia significativa en la configuración de la CS, y modifica su beneficio económico

## 6.4 Conclusiones

En este capítulo se implementó la metodología propuesta en el capítulo 4, considerando criterios para el medio natural y social en el diseño de la CS forestal.

De los resultados obtenidos, se puede concluir que considerar criterios de ambos medios en el diseño de la CS es relevante a la hora de decidir los sitios dónde instalar las

diferentes unidades productivas con el fin de disminuir las alteraciones en el medio natural y potenciar el impacto en el medio social.

La metodología propuesta y el conjunto de indicadores que fueron diseñados para ser utilizados en ésta, demuestran ser herramientas fáciles de implementar en un modelo matemático de programación. Las mismas permiten introducir el conocimiento empírico y su subjetividad a la hora de tomar decisiones sobre los sitios donde instalar las unidades productivas de una CS.

En respuesta a la falta de metodologías que consideren diferentes elementos y criterios en relación a los componentes del ambiente, la propuesta realizada en los capítulos 4, 5 y 6 demuestra ser un aporte al campo vinculado con la evaluación ambiental en el diseño de CS.

## 7 Conclusiones

*“Un hombre que se atreve a perder una hora no ha descubierto el valor de la vida”*

*Charles Darwin*

En esta tesis se presentó un enfoque que permite abordar el problema de la toma de decisiones en el diseño, a nivel estratégico, de la CS forestal. En el mismo se consideraron aspectos económicos, del entorno natural y social de los sitios donde se instalan las diferentes unidades productivas.

A partir del desarrollo de la presente tesis se logró concluir sobre dos aspectos relevantes vinculados a la industria forestal. Por un lado, quedó expuesta la importancia del uso de los residuos y subproductos como materia prima o como fuente de energía para lograr una mayor eficiencia en el sistema. Por otro lado, los resultados mostraron la relevancia que tiene considerar aspectos del entorno del medio natural y social en el diseño de la CS forestal.

En relación a los residuos y subproductos se demostró que, para lograr un uso eficiente de estos materiales, que implique mayor sustentabilidad en el diseño del sistema, es necesario considerarlos de manera integral, teniendo en cuenta los diferentes niveles y actores que componen la CS. El hecho de no tener en cuenta su reúso como alternativa implica una disminución en el rendimiento económico del sistema, y desde un punto de vista del entorno natural, desmejora la calidad de los suelos donde quedan depositados.

Con el fin de incluir una medida inicial de sustentabilidad en la CS forestal, en una primera instancia se implementó el indicador de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), muy utilizado por diversos autores para las industrias forestales. Al contabilizar las emisiones de GEI producidas por el sistema se observó la importancia que tiene considerarlas de manera desagregada dependiendo de la fuente de emisión de las mismas, dado que varían en magnitud. Además, una reducción importante de las emisiones no implica una reducción notable del beneficio económico de la CS. Sin embargo, si bien el indicador es una herramienta útil a la hora de analizar el Potencial

de Calentamiento Global (PCG) de un sistema de producción, no considera aspectos específicos vinculados al entorno al cual afecta, tornándolo un instrumento parcial para la perspectiva ambiental. Su aplicación se reduce a considerar el PCG. Otra cuestión es que, en general, todos los aportes de GEI de las diferentes actividades y procesos del sistema bajo análisis son llevados a una sola unidad en la optimización de la CS, mediante la suma de dichos valores. Esto hace que muchas veces se pierda la noción de los efectos particulares que tiene cada una de ellas sobre el sistema global.

Respecto a cuestiones vinculadas al entorno natural y social en el diseño de CS forestal, se planteó un enfoque diferente a aquellos existentes actualmente en la bibliografía. Se utilizó la metodología de EIA, donde se consideraron, por un lado, aspectos relacionados a la normativa y, por otro lado, indicadores que permiten incluir el conocimiento empírico de los evaluadores en el análisis. Esto permitió tener en cuenta las características particulares del ambiente de cada ubicación, con el objetivo de disminuir el impacto ambiental que provocan las unidades productivas en ellos. A partir de su implementación se obtuvieron diferentes soluciones, de las cuáles se pudo observar la importancia de considerar aspectos del medio natural y social en el diseño de la CS forestal.

Con el objetivo de tener en cuenta el entorno natural vinculado a las unidades productivas de la CS forestal, se consideraron dos componentes del ambiente: agua superficial y paisaje. Aplicando la metodología, se observó que se pueden lograr configuraciones que impliquen mayor sustentabilidad en el sistema y esto repercute en el beneficio económico del mismo. Implementar estas herramientas demostró ser una propuesta innovadora que permite introducir criterios propios de la experiencia técnica y profesional en el diseño del sistema. Además el enfoque propuesto es de simple uso y fácilmente extensible a otro tipo de indicadores.

En relación al medio social, se generó un indicador social (*Isg*) que permite determinar la ubicación de las industrias de la CS forestal considerando particularidades de las posibles ubicaciones. Al aplicarlo en el diseño de la CS, se observa que se modifica su configuración y características, mejorando el desempeño social notablemente sin disminuir significativamente el beneficio económico. Este indicador fue comparado con otro utilizado normalmente en el diseño de la CS que no considera cuestiones del entorno: empleos generados (*Iseg*). Se observó que a diferencia del *Isg*, mejorar su performance requiere de una disminución mayor en el beneficio económico del sistema. Esta situación refuerza la importancia que tiene considerar cuestiones vinculadas al medio a la hora de decidir los sitios donde ubicar las unidades productivas y el uso de indicadores apropiados.

A lo largo del desarrollo de la tesis, el enfoque de CS y los programas de optimización mostraron ser instrumentos válidos para analizar y plantear alternativas en el diseño de CS considerando la perspectiva económica, del medio natural y social.

Los resultados obtenidos en la tesis permiten concluir que al considerar el entorno en el diseño de la CS, teniendo en cuenta los diferentes componentes del medio social y natural que lo conforman, se pueden lograr configuraciones que beneficien a los diferentes actores involucrados. El sitio donde se ubican las diferentes unidades productivas en la red bajo estudio es relevante, tanto para el ambiente como para los diferentes niveles que conforman la CS. A partir de la decisión de su localización se puede alcanzar diseños más sustentables sin necesidad de perjudicar, en algunos casos, notoriamente la rentabilidad de la CS.

La necesidad de preservar la sustentabilidad del ambiente, situación que se ha tornado un requerimiento de la sociedad y los gobiernos para con las empresas o grupos

empresarios, lleva a considerar como un requisito significativo las cuestiones vinculadas directamente al entorno donde operan las unidades productivas. En este sentido, las herramientas propuestas en esta tesis buscan dar una respuesta a esta problemática y a la escasez de instrumentos que consideren el entorno a la hora de optimizar la CS.

Los enfoques y herramientas utilizadas en esta tesis pueden ser fácilmente implementados para realizar otros análisis, extendiendo los aportes del presente trabajo. Desde el punto de vista de la CS forestal se pueden incluir mayor cantidad de alternativas en las opciones de diseño de la misma como: otro tipo de transporte (ej.: barco, tren), otro tipo de industrias (ej.: celulosa, papel), diferentes tipos de materia prima, entre otros. Por otro lado, se puede realizar un análisis sobre la manera que influye el precio de la energía vendida a la red y el precio del fuel en la decisión de instalar calderas de biomasa o fuel.

A partir de la metodología de EIA se pueden considerar otros componentes del medio a través de la normativa existente y la creación de nuevos indicadores con el fin de evaluar de mejor manera la sustentabilidad en el diseño del sistema. Por otro lado, las herramientas propuestas en esta tesis podrían ser implementadas en otros sistemas productivos con el fin de estudiar su aplicabilidad y el efecto que tiene sobre los mismos considerar cuestiones del entorno.

Finalmente, la posibilidad de incorporar el uso de modelos de programación matemática en la toma de decisiones de problemas de evaluación de impacto ambiental, ha probado ser un enfoque adecuado y promisorio para encarar este tipo de estudios.

## Nomenclatura

<b>Índices</b>	
$f \in F$	tipos de unidades de producción
$g \in G$	gases de efecto invernadero
$inter \in I$	intervalos de dilución
$l \in L$	sitios
$p \in P$	productos
$q \in Q$	subproductos
$r \in R$	tipo de materia prima
$t \in T_f$	capacidades de las unidades de producción
$ta \in T_{f1}$	capacidades de los aserraderos
$te \in T_{f4}$	capacidades de las plantas de etanol
$tp \in T_{f3}$	capacidades de las plantas de pellets
$ttab \in T_{f2}$	capacidades de las plantas de tableros
$u \in U$	medidas del grado de contaminación del agua
<b>Parámetros</b>	
$aas_{ta}$	área utilizada por el aserradero de tamaño $ta$ [m <sup>2</sup> ]
$aet_{te}$	área utilizada por la planta de etanol de tamaño $te$ [m <sup>2</sup> ]
$ai_l$	área inicial construida en el sitio $l$ en el radio determinado por el evaluador [m <sup>2</sup> ]
$ape_{tp}$	área utilizada por la planta de pellets de tamaño $tp$ [m <sup>2</sup> ]
$at_l$	área total del sitio $l$ en el radio considerado por el evaluador [m <sup>2</sup> ]
$atab_{tab}$	área utilizada por la planta de tableros de tamaño $ttab$ [m <sup>2</sup> ]
$Bypprice_q$	precio de venta del subproducto $q$ [\$ T <sup>-1</sup> ]
$CCF_{ft}$	factor de inversión de capital para la unidad $f$ de capacidad $t$
$cc_q$	capacidad calorífica de los distintos subproductos $q$ [kJ T <sup>-1</sup> ]

$ccp$	capacidad calorífica de los pellets [ $\text{kJ T}^{-1}$ ]
$cfuel$	costo de adquisición del fuel [ $\$ \text{T}^{-1}$ ]
$ContAAR_{lu}$	grado de contaminación $u$ que tiene el curso de agua superficial antes de la descarga del efluente líquido en el sitio $l$ [ $\text{mg l}^{-1}$ ]
$contas_{u,ta}$	medida del grado de contaminación $u$ emitida por el aserradero de tamaño $ta$ [ $\text{mg l}^{-1}$ ]
$contet_{u,te}$	medida del grado de contaminación $u$ emitida por la planta de etanol de tamaño $te$ [ $\text{mg l}^{-1}$ ]
$conttab_{u,tab}$	medida del grado de contaminación $u$ emitida por la planta de tableros de tamaño $tab$ [ $\text{mg l}^{-1}$ ]
$contpell_{u,tp}$	medida del grado de contaminación $u$ emitida por la planta de pellets de tamaño $tp$ [ $\text{mg l}^{-1}$ ]
$conbyp_q$	factor de conversión de tronco a subproducto $q$ [ $\text{T T}^{-1}$ ]
$contmax_{u,inter}$	valor máximo admitido de la medida de contaminación $u$ de acuerdo al intervalo $inter$ en que se encuentra la dilución [ $\text{mg l}^{-1}$ ]
$conv_{pr}$	factor de conversión materia prima de tipo $r$ a productos $p$ ( $[\text{m}^3 \text{T}^{-1}]$ o $[\text{T T}^{-1}]$ )
$Cprod_{ptf}$	costo de producción del producto $p$ en la planta $f$ de tamaño $t$ ( $[\$ \text{m}^{-3}]$ o $[\$ \text{T}^{-1}]$ )
$Crm_{rl}$	costo de adquisición de la materia prima $r$ en el sitio $l$ [ $\$ \text{T}^{-1}$ ]
$Ctp_p$	costo de transporte del producto $p$ ( $[\$ (\text{T km})^{-1}]$ o $[\$ (\text{m}^3 \text{km})^{-1}]$ )
$Ctres$	costo de transporte de los residuos y subproductos [ $\$ (\text{T km})^{-1}$ ]
$Ctrm$	costo de transporte de la materia prima [ $\$ (\text{T km})^{-1}$ ]
$dl_{ll'}$	distancia del sitio $l$ a $l'$ [ $\text{km}$ ]
$Dlmax_{lp}$	demanda máxima anual del producto $p$ en el sitio $l$ ( $[\text{T}]$ o $[\text{m}^3]$ )
$Dlmin_{lp}$	demanda mínima anual del producto $p$ en el sitio $l$ ( $[\text{T}]$ o $[\text{m}^3]$ )

$ed$	cantidad de energía necesaria por volumen de madera secada [kJ m <sup>-3</sup> ]
$ef$	cantidad de energía necesaria por volumen de etanol producido [kJ m <sup>-3</sup> ]
$enec_p$	energía necesaria para la elaboración del producto $p$ ([kJ T <sup>-1</sup> ] o [kJ m <sup>-3</sup> ])
$Eprice$	venta de energía a la red eléctrica [\$ kJ <sup>-1</sup> ]
$Eb_{ng}$	factor de emisión del gas $g$ de la energía generada a partir de las calderas de biomasa de tipo $n$ [T kJ <sup>-1</sup> ]
$Ef_g$	factor de emisión del gas $g$ de la energía generada en las calderas de fuel [T kJ <sup>-1</sup> ]
$Eq_g$	factor de conversión de gas del tipo $g$ a CO <sub>2</sub> equivalente [T CO <sub>2</sub> T <sup>-1</sup> ]
$Et_g$	cantidad de emisiones del gas tipo $g$ generadas por unidad de distancia recorrida [T km <sup>-1</sup> ]
$E_{tf}$	empleos generados por la unidad de producción del tipo $f$ y tamaño $t$ [empleos]
$fconv$	factor de conversión de MW a kJ
$fm$	factor de escala
$fres$	factor de conversión de troncos-residuos [T T <sup>-1</sup> ]
$h$	número de soluciones a obtener en la curva de Pareto
$Hab_l$	cantidad de habitantes en el sitio $l$ [hab]
$IASGmax_u$	tolerancia máxima global, a lo largo de todo el sistema, del grado de contaminación de la medida $u$
$IASmax_{lu}$	tolerancia máxima del grado de contaminación de la medida $u$ en cada uno de los sitios $l$
$Ipmax_l$	valor de $Ip_l$ máximo admitido para el sitio $l$ [m <sup>2</sup> ]
$Maxrm_{lr}$	disponibilidad máxima anual del tipo de tronco $r$ en el sitio $l$ [T año <sup>-1</sup> ]

$PEA_l$	población económicamente activa del sitio $l$ [%]
$Plmax_{if}$	máxima capacidad de producción de la planta $f$ con capacidad $t$ ( $[m^3 \text{ año}^{-1}]$ o $[T \text{ año}^{-1}]$ )
$Pmaxcb_{nm}$	capacidad máxima de la caldera de biomasa de tamaño $m$ y tipo $n$ [MW]
$Pmaxcf_m$	capacidad máxima de la caldera de fuel de tamaño $m$ [MW]
$QAAR_l$	caudal del curso de agua del sitio $l$ [ $l \text{ s}^{-1}$ ]
$Qas_{ta}$	caudal de efluente generado por el aserradero de tamaño $ta$ [ $l \text{ s}^{-1}$ ]
$Qet_{te}$	caudal de efluente generado por la planta de etanol de tamaño $te$ [ $l \text{ s}^{-1}$ ]
$Qpell_{tp}$	caudal de efluente generado por la planta de pellets de tamaño $tp$ [ $l \text{ s}^{-1}$ ]
$Qtab_{ttab}$	caudal de efluente generado por la planta de tableros de tamaño $ttab$ [ $l \text{ s}^{-1}$ ]
$Sle_p$	precio de venta del producto $p$ ( $[\$ \text{ T}^{-1}]$ o $[\$ \text{ m}^{-3}]$ )
$TDA_l$	tasa de desocupación abierta [%]
$tol_l$	fracción máxima de área que se puede utilizar para construir
$yby_{pq}$	factor de conversión del subproducto $q$ al producto $p$ ( $[m^3 \text{ T}^{-1}]$ o $[T \text{ T}^{-1}]$ )
$yres_p$	factor de conversión de residuos al producto $p$ ( $[m^3 \text{ T}^{-1}]$ o $[T \text{ T}^{-1}]$ )
$vmin_{inter}, vmax_{inter}$	valor mínimo y máximo de dilución para el intervalo $inter$
$\alpha_f, \beta_f$	coeficientes de costo
$ab_n, \beta b_n$	coeficientes de costos de la caldera de biomasa y fuel
$\lambda_l, \omega_l$	factores de ponderación para el sitio $l$

### **Variables binarias**

$as_{l,ta}$	indica si se instala el aserraderos de tamaño $ta$ en el sitio $l$
$et_{l,te}$	indica si se instala la planta de tableros de tamaño $te$ en el sitio $l$
$ms_{l,ta,ttab,tp,te}$	indicar el tipo y tamaño de unidad que se instala en el sitio $l$
$pell_{l,tp}$	indica si se instala la planta de pellets de tamaño $tp$ en el sitio $l$
$rango_{l,inter}$	indica el intervalo $inter$ de dilución para el sitio $l$
$tab_{l,ttab}$	indica si se instala la planta de tableros de tamaño $ttab$ en el sitio $l$
$w_{l,tf}$	indica si la unidad de tipo $f$ se instala en el sitio $l$ con capacidad $t$
$y_{b,nml}$	indica si se instala la caldera de biomasa de tipo $n$ y tamaño $m$ en el sitio $l$
$y_{f,ml}$	indica si se instala la caldera de fuel de tamaño $m$ en el sitio $l$

### **Variables continuas**

$ap_l$	área utilizada por las plantas de producción en el sitio $l$ [ $m^2$ ]
$B_f$	beneficio económico anual [ $\$ \text{año}^{-1}$ ]
$By_{pboil,l,q}$	subproducto $q$ que se destina a la caldera del aserradero localizado en el sitio $l$ [ $T \text{año}^{-1}$ ]
$By_{p,l,q}$	subproducto $q$ generado en el sitio $l$ [ $T \text{año}^{-1}$ ]
$By_{pr,m,l,q,fp}$	subproducto $q$ que se genera en el sitio $l'$ y se destina a la unidad de producción $f$ de capacidad $t$ localizada en $l$ [ $T \text{año}^{-1}$ ]
$ContAAb_{lu}$	medida del grado de contaminación $u$ aguas abajo de la instalación de las unidades de producción en el sitio $l$ [ $mg \text{ l}^{-1}$ ]
$contfinalsitio_{lu}$	medida del grado de contaminación $u$ emitida por las plantas en el sitio $l$ [ $mg \text{ l}^{-1}$ ]
$Contmaxsitio_{lu}$	valor máximo de la medida del grado de contaminación del tipo $u$ , de acuerdo a la normativa, que se puede emitir en el curso de

$d_1$	salto para las emisiones provenientes del transporte
$d_2$	salto para las emisiones provenientes de las calderas
$Dilequivalente_{l,inter}$	coeficiente adimensional de dilución en el sitio $l$ que se relaciona con el intervalo $inter$ de dilución de la normativa
$Dilución_l$	coeficiente adimensional de dilución en el sitio $l$
$E_{biom}_{nml}$	energía total generada, a partir de biomasa forestal, en el sitio $l$ por las calderas de dimensión $m$ y tipo $n$ [ $\text{kJ año}^{-1}$ ]
$E_{biom}l_l$	energía térmica utilizada en el sitio $l$ [ $\text{kJ año}^{-1}$ ]
$E_{cald}l_l$	energía necesaria en un sitio $l$ [ $\text{kJ año}^{-1}$ ]
$E_c$	costo de adquisición del fuel [ $\text{\$ año}^{-1}$ ]
$E_{fuel}_{ml}$	energía generada por las calderas de fuel en el de dimensión $m$ en el sitio $l$
$E_{mcald}$	emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de las calderas [ $\text{T año}^{-1}$ ]
$E_{mtrans}$	emisiones de gases de efecto invernadero provenientes del transporte [ $\text{T año}^{-1}$ ]
$E_{t_l}$	empleos generados en el sitio $l$ [empleos]
$\varepsilon_1$	valor máximo permitido de emisiones de transporte para una determinada iteración
$\varepsilon_2$	valor máximo permitido de emisiones de calderas para una determinada iteración
$\varepsilon_{1min}$	cantidad mínima de emisiones que puede generar el sistema provenientes del transporte [ $\text{T año}^{-1}$ ]
$\varepsilon_{2min}$	cantidad mínima de emisiones que puede generar el sistema provenientes de las calderas [ $\text{T año}^{-1}$ ]

$\mathcal{E}_{1max}$	cantidad de emisiones genera el sistema en el caso base provenientes del transporte [T año <sup>-1</sup> ]
$\mathcal{E}_{2max}$	cantidad de emisiones que genera el sistema en el caso base provenientes de las calderas [T año <sup>-1</sup> ]
$I$	ingresos por ventas [\$ año <sup>-1</sup> ]
$IAS_{lu}$	indicador de agua superficial para el sitio $l$ de la medida del grado de contaminación $u$
$IASG_u$	indicador de agua superficial para la medida del grado de contaminación $u$
$Ic$	costo de instalación de las unidades de producción [\$ año <sup>-1</sup> ]
$Inmigrantes_l$	exceso de empleos generados en el sitio $l$ [empleos]
$Iseg$	indicador social empleos generados [empleos]
$Isg$	indicador social
$l_f$	cantidad de fuel adquirido en el sitio $l$ [T año <sup>-1</sup> ]
$MPc$	costo total de adquisición de la materia prima [\$ año <sup>-1</sup> ]
$Pc$	costo total de producción[\$ año <sup>-1</sup> ]
$pellboil_{l'}$	pellets generados en el sitio $l'$ enviados a la caldera ubicada en $l$ [T año <sup>-1</sup> ]
$Prod_{l'fp}$	cantidad del producto $p$ producido en el sitio $l$ mediante la planta $f$ de capacidad $t$ ([m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> ] o [T año <sup>-1</sup> ])
$Qh_{l'fp}$	flujo de materia prima $r$ desde el sitio $l'$ a la planta $f$ localizada en $l$ para producir $p$ [T año <sup>-1</sup> ]
$Qpe_{l'}$	flujo de pellets del sitio $l'$ que se destinan a la caldera de la planta de etanol localizada en $l$ [T año <sup>-1</sup> ]

$Q_{pl'pf}$	flujo de productos $p$ generados por la planta $f$ del sitio $l'$ al sitio $l$ ( $[m^3 \text{ año}^{-1}]$ o $[T \text{ año}^{-1}]$ )
$Q_{red_l}$	energía enviada a la red eléctrica desde el sitio $l$ $[Kj \text{ año}^{-1}]$
$Q_{res_{l'fp}}$	flujo de residuos generados en $l$ enviados a la planta $f$ para producir $p$ en el sitio $l'$ $[T \text{ año}^{-1}]$
$T_c$	costo total del transporte $[\$ \text{ año}^{-1}]$



**Anexo I. Decreto 1089, Santa Fe.**

## RESOLUCIÓN N° 1089/82

### **REGLAMENTO PARA EL CONTROL DEL VERTIMIENTO DE LÍQUIDOS RESIDUALES**

El presente Reglamento establece las condiciones a que deberá ajustarse el efluente y el proyecto, construcción, reparación, modificación, mantenimiento y contralor de funcionamiento de las instalaciones de que debe dotarse a aquellos inmuebles cuyos líquidos residuales requieran un tratamiento previo para alcanzar las condiciones de vuelco aceptables para su descarga a los cuerpos receptores ;

Que los objetivos del sistema que se establece son los siguientes :

a) Obtener que los efluentes no contengan sustancias contaminantes, tendiendo fundamentalmente a asegurar : 1) El saneamiento integral de las poblaciones 2) La no contaminación de las aguas en general.

b) Orientar las tareas inherentes al proyecto y construcción de las instalaciones internas de carácter industrial y de las instalaciones para la conducción del efluente, no participando en la aprobación de planos. Quedando como únicos responsables del proyecto y construcción de las obras el propietario del establecimiento y el matriculado, exigiéndose solamente la presentación de planos esquemáticos y de la documentación mínima indispensable.

Las facultades fueron conferidas oportunamente a la ex DIRECCION PROVINCIAL DE OBRAS SANITARIAS por el artículo 4° inciso 15 ) de la LEY ORGANICA N° 8711/80 , en la actualidad competencia de la SUBSECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y ECOLOGIA emergente de la Ley N° 11.220/94 y Decreto N° 1.550/96.-

### **CAPITULO I**

#### **AMBITO DE APLICACIÓN - FACULTADES**

ART. 1 : Las disposiciones del presente REGLAMENTO son de aplicación a todos los inmuebles ubicados en el territorio de la Provincia de Santa Fe, destinados total o parcialmente a usos industriales (fábricas, talleres, etc.), a usos comerciales (hoteles, restaurantes, estaciones de servicio, etc.), o a usos especiales (hospitales, escuelas, clubes, etc.) cuyos LIQUIDOS RESIDUALES no satisfagan CONDICIONES DE VUELCO exigidas para su descarga al CUERPO RECEPTOR.

ART. 2 : Queda prohibido construir, alterar, remover o modificar cualquier parte de las INSTALACIONES declaradas, sin previa autorización. La ejecución de nuevos trabajos que impliquen alteración, remoción o modificación de las INSTALACIONES se ajustará a las disposiciones del REGLAMENTO que rigen para la construcción de obra nueva.

ART. 3 : Se podrá disponer la clausura del DESAGÜE DEL ESTABLECIMIENTO cuyo propietario no diera cumplimiento a las disposiciones que se impongan en virtud de lo establecido en el REGLAMENTO.

ART. 4 : Todos los plazos que se establecen en el Reglamento deben ser computados en día hábiles administrativos.

ART. 5 : Se resolverán en forma particular las situaciones que no estén contempladas en el REGLAMENTO, teniendo en cuenta las circunstancias particulares de cada caso.

## **CAPITULO II**

### **REQUISITOS PARA LAS INSTALACIONES**

ART. 6 : Los ESTABLECIMIENTOS a que se alude en el Art. 1 deben ser dotados de las correspondientes INSTALACIONES DE TRATAMIENTO para que los EFLUENTES cumplan las CONDICIONES DE VUELCO establecidas por SMAE, salvo que resulten innecesarias por :

a) Cumplir con las condiciones de vuelco. b) Mejor administración técnica. c) Optimización del proceso. d) Recirculación. e) Sustitución de materia prima. f) Cambio de proceso.

ART. 7 : Todo ESTABLECIMIENTO tendrá sus INSTALACIONES completas e independientes a los fines del REGLAMENTO, salvo que en dos o más de ellos la SMAE resuelva consentir, en las condiciones que en cada caso fije, la existencia de INSTALACIONES en común, a solicitud de la totalidad de los PROPIETARIOS DE LOS ESTABLECIMIENTOS interesados. ART. 8° : Las INSTALACIONES PARA LA CONDUCCION DEL EFLUENTE desde la salida del ESTABLECIMIENTO hasta el CUERPO RECEPTOR fijado de conformidad con los Artículos 18° y 19°, cuando éste no se encuentre contiguo a aquel, deberán ser fijadas por la SMAE. Los planos para este tipo de obras podrán tramitarse en forma separada de aquellos correspondientes a las INSTALACIONES DE TRATAMIENTO, salvo indicación en contrario de la SMAE, siendo por cuenta del PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO la obtención de los permisos necesario para el emplazamiento de dichas INSTALACIONES PARA LA CONDUCCION DEL EFLUENTE en la vía pública o en predios de propiedad privada.

ART. 9° : Se establece como punto de enlace de las INSTALACIONES DE TRATAMIENTO o de PROCESO con las INSTALACIONES PARA LA CONDUCCION DEL EFLUENTE el punto de su trazado en coincidencia con la línea demarcatoria del límite de la propiedad.

ART. 10° : Todas las INSTALACIONES deberán estar dotadas de una cámara para extracción de muestras y medición de caudales, según las especificaciones vigentes. Dicha cámara deberá hallarse ubicada en el predio privado, sobre la línea municipal o próxima a ella, y con libre acceso desde la vía pública.

ART. 11° : Cuando el EFLUENTE sea de naturaleza corrosiva, será obligatoria la instalación de un tubo testigo, en la forma y del material que establecen las disposiciones vigentes en SMAE. La cámara respectiva deberá hallarse ubicada en las inmediaciones de la indicada en el Artículo 10°.

## **CAPITULO III**

### **OBLIGACIONES Y RESPONSABILIDADES**

ART. 12° : EL PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO será responsable exclusivo ante la SMAE :

a) por la calidad del EFLUENTE que concurre al CUERPO RECEPTOR. b) por la eficiencia del tratamiento ; c) por el sistema utilizado para la depuración de los LIQUIDOS RESIDUALES. d) Por el cumplimiento de las obligaciones que estén a cargo del matriculoso según el presente REGLAMENTO.

Ello no enerva los derechos que pudieran corresponder frente al MATRICULADO.

ART. 13° : EL PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO es responsable del funcionamiento y conservación de las INSTALACIONES, las que deberán mantenerse permanentemente en condiciones óptimas de funcionamiento y eficiencia, acorde con el fin al que se las destina.

ART. 14° : EL PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO es responsable por los daños o perjuicios que pudieran ocasionarse a terceros o a los CUERPOS RECEPTORES directos o indirectos con motivo de la conducción o del volcamiento de los EFLUENTES.

ART. 15° : La disposición final de los residuos retenidos en las operaciones integrantes del proceso productivo y/o del tratamiento de los LIQUIDOS RESIDUALES, si son desechables, deberá ser realizada en sitios o lugares determinados por las autoridades competentes o por la SMAE, según corresponda, con el fin de impedir la contaminación del ambiente.

ART. 16° : Cuando se proyecte la construcción, modificación o adecuación de las INSTALACIONES con el objeto de que los EFLUENTES se encuadren dentro de las CONDICIONES DE VUELCO establecidas en el ANEXO II, el PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO deberá designar un MATRICULADO, quien tomará a su cargo la responsabilidad profesional para el proyecto y eficiencia del mismo, en un todo de acuerdo con lo dispuesto en el REGLAMENTO. Todo cambio de MATRICULADO deberá ser comunicado a la SMAE inmediatamente de producido.

ART. 17° : EL PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO, personalmente o por medio del MATRICULADO, según corresponda, están obligados a suministrar toda la información que la SMAE considere necesaria durante el proyecto, construcción y funcionamiento del ESTABLECIMIENTO y de sus INSTALACIONES, siendo responsable por las inexactitudes en que incurran.

## **CAPITULO IV**

### **TRAMITE DE DOCUMENTACION**

ART. 18° : A solicitud escrita del PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO, y dentro del ámbito de su competencia, la SMAE otorgará la FACTIBILIDAD DE

VERTIMIENTO de los EFLUENTES a los CUERPOS RECEPTORES que especificará en cada caso. Dicha FACTIBILIDAD DE VERTIMIENTO sólo podrá ser autorizada cuando la capacidad y las condiciones de funcionamiento así lo permitan, y no autorizará la descarga del EFLUENTE al CUERPO RECEPTOR. Para ser volcados a dicho CUERPO RECEPTOR, los EFLUENTES deberán cumplir en forma permanente las CONDICIONES DE VUELCO fijadas por la SMAE para permitir estas descargas.

ART. 19° : Cuando se proyecte evacuar EFLUENTES a un CUERPO RECEPTOR cuya conservación y control hidráulico estén a cargo de otro Organismo, sea éste Nacional, Provincial, Municipal o privado, el PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO gestionará ante aquél la correspondiente FACTIBILIDAD DE VERTIMIENTO. El comprobante de iniciación de ese trámite deberá ser presentado ante la SMAE a fin de gestionar la autorización de volcamiento, la que estará supeditada al otorgamiento de esa FACTIBILIDAD DE VERTIMIENTO.

Art. 20° : Los líquidos provenientes de condensación, refrigeración y otros usos del agua en los que no se altere la calidad de la misma deberán ser vertidos a conducto pluvial o a curso de agua superficial. Sólo por excepción se podrá autorizar su volcamiento a colectora, cuando la capacidad y las condiciones de funcionamiento de ésta lo permitan. A tales efectos, deberá tramitarse la FACTIBILIDAD DE VERTIMIENTO en las condiciones establecidas en los Artículos 18° y 19°.

ART. 21° : EL PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO está obligado a presentar con carácter de declaración jurada, dentro de los plazos que al efecto fije la SMAE, una solicitud de AUTORIZACION PRECARIA DE VOLCAMIENTO, conjuntamente con la siguiente documentación :

I. FACTIBILIDAD DE VERTIMIENTO acordada por la SMAE conforme al Artículo 18°, o el comprobante de iniciación de su trámite ante el Organismo competente, de acuerdo con el Artículo 19°.

II. Memoria descriptiva y de cálculo que comprenda:

a) Proceso productivo. b) Sistema de tratamiento de los LIQUIDOS RESIDUALES y su justificación. c) Calidad de los EFLUENTES. d) Caracterización del volumen de los EFLUENTES. e) Destino de los barros y residuos producidos de acuerdo al Artículo 18°. Para el cumplimiento de este punto, la SMAE entregará un Formulario al que deberá responder el PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO.

III. CRONOGRAMA DE TRABAJO, indicando en un diagrama tareas-tiempo, cada una de las etapas para la construcción, modificación o adecuación de las INSTALACIONES con el objeto de que los EFLUENTES se encuadren dentro de las CONDICIONES DE VUELCO establecidas en el ANEXO II.

IV. Planos de los dispositivos de testificación, muestreo y aforo.

V. Plano de planta de escala, indicando los puntos de descarga y sus características hidráulicas.

Toda la presentación deberá estar firmada por el PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO y por el MATRICULADO quien será en adelante, hasta tanto la SMAE otorgue la AUTORIZACIÓN CONDICIONAL DE VOLCAMIENTO, el único ocurrente. La SMAE tomará conocimiento de dicha documentación y aceptará u observará el CRONOGRAMA DE TRABAJO propuesto.

ART. 22° : Si la documentación presentada según el Artículo 21° no reuniera las condiciones exigidas, o resultara incompleta o inadecuada a juicio de SMAE, se citará al MATRICULADO, quien deberá presentarse dentro de los cinco (5) días de su notificación para recibir las indicaciones que corresponda. La documentación observada será devuelta por el MATRICULADO con las correcciones correspondientes a las indicaciones formuladas plazo que a tal efecto le fijará la SMAE en función de la magnitud de las mismas. El incumplimiento de estas obligaciones será sancionado en la forma establecida en el Decreto respectivo.

ART, 23° : En caso de no merecer observaciones la documentación presentada, o corregidas las que se hubieren formulado, UNO (1) de los ejemplares del plano será devuelto al MATRICULADO, con una copia de la restante documentación indicada en el artículo 21°, otorgando la SMAE la AUTORIZACION PRECARIA DE VOLCAMIENTO. El otro ejemplar de toda la documentación quedará en la SMAE a los efectos que pudieran corresponder. Esta presentación deberá ser previamente visada por el Colegio Profesional Provincial que corresponda en el cual se encuentre inscripto el profesional actuante responsable del diseño del proyecto.

ART. 24° : Las autorizaciones de volcamiento que se concedan conforme lo establecido en el REGLAMENTO, serán de carácter precario o condicional, y la SMAE podrá disponer su cancelación, o el cambio de destino del EFLUENTE cuando las condiciones de éste o del CUERPO RECEPTOR así lo hagan necesario.

ART. 25° : La SMAE otorgará la AUTORIZACION CONDICIONAL DE VOLCAMIENTO una vez terminada la construcción de las INSTALACIONES DE TRATAMIENTO, y siempre que los EFLUENTES se ajusten a las CONDICIONES DE VUELCO que corresponda en cada caso. Dicha autorización se otorgará por el solo cumplimiento de las CONDICIONES DE VUELCO en los casos en que las INSTALACIONES DE TRATAMIENTO no sean necesarias, tal como se indica en el Artículo 6°.

ART. 26° : Si una vez expedida la AUTORIZACION CONDICIONAL DE VOLCAMIENTO se comprobara que los EFLUENTES no cumplen con las CONDICIONES DE VUELCO establecidas por la SMAE, el PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO estará obligado a realizar las correcciones que sean necesarias para obtener que los EFLUENTES reúnan dichas condiciones, en el plazo que le fije la SMAE.

La falta de cumplimiento de lo dispuesto precedentemente motivará la aplicación de las sanciones establecidas en la Norma respectiva, al PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO.

## **CAPITULO V**

### **EJECUCION DE OBRAS**

ART. 27° : Una vez retirada de la SMAE la documentación, con el CRONOGRAMA DE TRABAJOS aceptado, el PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO asume el compromiso de ejecutar las obras proyectadas dentro de los plazos fijados en dicho cronograma. El plazo para la iniciación de los trabajos contemplados comenzará a computarse a partir de los QUINCE (15) días de la notificación de la resolución administrativa.

La falta de cumplimiento de lo dispuesto precedentemente motivará la aplicación de las sanciones establecidas en la Norma respectiva, pudiendo alcanzar la cancelación de la AUTORIZACION PRECARIA DE VOLCAMIENTO oportunamente acordada.

ART. 28° : Si se cubriera cualquier parte de las INSTALACIONES, cuando sea obligatoria su inspección previa, el MATRICULADO tendrá la obligación de descubrirla para ser inspeccionada, a cargo del propietario .

ART. 29° : EL PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO está obligado a desagotar, desinfectar, cegar y cubrir debidamente los pozos de agua pozos absorbentes o cualquier otro receptáculo análogo que exista en el inmueble cuyo uso no haya sido expresamente autorizado por la SMAE, cumpliendo las instrucciones que un cada caso aquella imparta, y dentro del plazo que se le fije. Se hará lo mismo con los aljibes, salvo que se hicieran estancos y se les destinara para otros fines autorizados por la SMAE.

ART. 30° : Cuando lo crea oportuno, la SMAE podrá disponer las investigaciones necesarias para localizar la existencia de pozos de cualquier naturaleza . Si la SMAE descubriera la existencia de pozos no denunciados, y comprobara que ha existido ocultamiento o mala fe del PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO, se le aplicarán las sanciones previstas en la Norma respectiva.

## **CAPITULO VI**

### **INSPECCIONES**

ART. 31° : Las inspecciones a practicar en las INSTALACIONES contempladas en el REGLAMENTO , en construcción o existentes, serán las siguientes :

a) Inspecciones Obligatorias : Debe solicitarlas al MATRICULADO, en término y con carácter de obligatorio. Serán las de : 1. Enlace del DESAGÜE. 2. Cegado de pozos. 3. Final de funcionamiento.

b) Inspecciones de Control :

Serán dispuestas por la SMAE y realizadas sin aviso previo, con el fin de verificar :

1. Si se cumple el CRONOGRAMA DE TRABAJO aceptado. 2. Si las INSTALACIONES se ajustan al proyecto presentado. 3. Si los materiales que se utilizan reúnan las condiciones exigibles por la SMAE 4. El correcto funcionamiento,

mantenimiento, conservación e higiene de las INSTALACIONES. 5. La calidad del EFLUENTE, y su caudal.

En todos los casos deberá labrarse el ACTA DE FISCALIZACION respectiva, suscripta por un representante de la empresa y un funcionario de SMAE.

ART. 32° : Inspección de enlace del DESAGÜE :

Se verificará visualmente si la ejecución del trabajo ha sido correctamente realizada, debiendo asimismo dejarse constancia de la fecha de enlace en el acta respectiva.

ART. 33° : Inspecciones de cegado de pozos:

a) Para extraer agua : se verificará que la obturación del pozo se realice de acuerdo con las disposiciones vigentes en la SMAE. b) Absorbentes : deberá comprobarse que el pozo ha sido agotado. En el caso de pozo negro se ordenará arrojar en él, para su desinfección, CINCUENTA (50) Kilogramos de cal viva, verificándose se cumplimiento ; se constatará el relleno del pozo y ejecución de losa o bóveda.

ART. 34° : INSPECCION FINAL DE FUNCIONAMIENTO

Una vez cumplido satisfactoriamente el requisito previsto en el Artículo 39°, y a pedido del MATRICULADO, se practicará esta inspección para verificar : a) Si las INSTALACIONES funcionan en forma normal, y se encuentran en buen estado de conservación y mantenimiento. b) Si los dispositivos de testificación y muestreo concuerdan con el plano presentado ante la SMAE. c) En las INSTALACIONES el las que fuere necesario intercalar tubo testigo, se comprobará que el mismo esté colocado en su respectiva cámara la que deberá mantenerse precintada en forma permanente. Finalizada la inspección, debe constatarse el sellado de las cámaras de inspección , bocas de acceso y de inspección, etc.

ART. 35° : Inspecciones de control : a) Se comprobará, si el estado de la obra lo permite, si las INSTALACIONES se encuentran de acuerdo al proyecto presentado ante la SMAE. b) Se verificará el cumplimiento del CRONOGRAMA DE TRABAJO aceptado por la SMAE. c) Se comprobará se los dispositivos de testificación necesarios para el control ulterior de los EFLUENTES (tubo testigo, cámara para extracción de muestras, medición de caudales, etc.) se ajustan al plano presentado, y si dichos dispositivos están ubicados en lugar accesible, conforme lo establece el REGLAMENTO en sus Artículos 10° y 11°. d) Se verificará si los materiales que se utilizan reúnen las condiciones exigibles por la SMAE. e) Se comprobará mediante rigurosas pruebas de funcionamiento adecuadas a tal efecto, que las cañerías para provisión de agua de fuentes propias (pozos, ríos, etc.) se hallen totalmente incomunicadas, e independizadas de las que suministren agua potable. f) Se verificará que el agua proveniente de fuentes propias sea destinada exclusivamente para los usos autorizados por la SMAE. g) Se comprobará que en las cañerías no existan derivaciones que puedan impedir que la totalidad de los LIQUIDOS RESIDUALES que requieran ser tratados, concurra a las plantas de tratamiento, o que los EFLUENTES concurra los dispositivos de testificación y muestreo, previamente a su volcamiento en el CUERPO RECEPTOR. h) Se verificará el correcto funcionamiento, mantenimiento, conservación e higiene de las INSTALACIONES. i) Se comprobará mediante la toma de muestra y

correspondiente análisis, la calidad del EFLUENTE. j) Se determinará el caudal del EFLUENTE. k) Se constatará el precintado de las cámaras de inspección y para tubo testigo.

ART. 36° : El personal autorizado por la SMAE tendrá libre acceso a las fincas para:

a) Inspeccionar la ejecución de las INSTALACIONES que se estuviesen realizando.

b) Comprobar el funcionamiento y uso de las mismas.

c) Controlar los LIQUIDOS RESIDUALES o los EFLUENTES. d) Dar cumplimiento a cualquier otra disposición del REGLAMENTO.

EL PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO está obligado a facilitar la entrada en forma inmediata, y a mantener actualizada ante la SMAE una nómina del personal para su atención. Las operaciones de inspección de funcionamiento o de uso de las INSTALACIONES, y las de contralor de los LIQUIDOS RESIDUALES o de los EFLUENTES, se practicarán en horarios que resulten adecuados a juicio de la SMAE, en función de la operatividad del ESTABLECIMIENTO.

ART. 37° : Cuando se opusiere resistencia a la realización de las Inspecciones, los empleados autorizados harán documentar el hecho por autoridad policial, labrando seguidamente el acta correspondiente en la Comisaría de jurisdicción ; luego será solicitado el auxilio de la fuerza pública. Para evitar este último procedimiento, podrá citarse previamente al PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO quien, para hacer innecesaria la intervención de la fuerza pública, deberá comparecer ante la SMAE dentro del término que se le señale y desistir efectivamente de su oposición.

## **CAPITULO VII**

### **TERMINACION DE LAS OBRAS**

ART . 38° : Finalizada la ejecución de las INSTALACIONES, y cumplidos los requisitos pertinentes establecidos en el REGLAMENTO, el MATRICULADO deberá solicitar la INSPECCION FINAL DE FUNCIONAMIENTO, con una anticipación no menor de CINCO (5) días de la fecha para la cual solicita su realización.

ART . 39° : Para solicitar la INSPECCION FINAL DE FUNCIONAMIENTO será indispensable que el análisis del EFLUENTE, practicado por la SMAE previo al pedido de la mencionada inspección, acuse resultado satisfactorio cumpliéndose las CONDICIONES DE VUELCO establecidas.

ART . 40° : Una vez aprobada la INSPECCION FINAL DE FUNCIONAMIENTO, SMAE expedirá la MATRICULADO la CONSTANCIA DE FUNCIONAMIENTO, concediéndosele simultáneamente al PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO la AUTORIZACION CONDICIONAL DE VOLCAMIENTO a que se refiere el Artículo 25°.

ART . 41° : La construcción de las obras se considerará terminada una vez expedida por la SMAE la CONSTANCIA DE FUNCIONAMIENTO.

ART .42° : La SMAE llevará un Registro de Matrículas en el que podrán inscribirse los interesados, que cumplan las siguientes condiciones : a) Ser profesional inscripto, y con domicilio actualizado en la Provincia de Santa Fe. b) Determinar como títulos profesionales habilitados para la realización de proyectos de unidades de tratamiento de efluentes industriales, aquellos que tengan asignadas incumbencias en la materia conforme a lo dispuesto por las instituciones universitarias que lo expidan en cada caso. c) Encontrarse habilitado por el Colegio Profesional que corresponda en el cual se encuentre inscripto el profesional.

ART . 43° : El MATRICULADO está obligado a comunicar de inmediato a la SMAE cualquier cambio de domicilio, y a cumplir estrictamente las disposiciones del REGLAMENTO y demás normas y resoluciones que se dicten en concordancia con el mismo.

ART . 44° : El MATRICULADO está habilitado para actuar en el proyecto, reparación , modificación y mantenimiento y operación de funcionamiento de las INSTALACIONES, así como en toda relación entre el ESTABLECIMIENTO y la SMAE. Toda documentación que el MATRICULADO presente ante la SMAE, deberá ser previamente liquidada y visada por el Colegio Profesional correspondiente.

ART . 45° : Tanto el PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO como el MATRICULADO deben comunicar el eventual cambio de MATRICULADO a la SMAE en el momento en que se produzca.-

## **ANEXO I**

### **DEFINICIONES GENERALES**

Adóptanse las siguientes definiciones para los términos utilizados en el presente REGLAMENTO :

**ACTA DE FISCALIZACION** : Es un formulario oficial para registrar el resultado de determinadas inspecciones.

**ACUIFERO** : Es el curso natural de agua subterránea (capa freática o capas confinadas) al que descargan los EFLUENTES volcados en los pozos

**AUTORIZACION CONDICIONAL DE VOLCAMIENTO** : Es la autorización que acuerda la SMAE al PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO para el volcamiento de los efluentes en el CUERPO RECEPTOR una vez expedida la CONSTANCIA DE FUNCIONAMIENTO. Tiene carácter condicional, y su vigencia se mantendrá mientras los efluentes cumplan con las CONDICIONES DE VUELCO para el respectivo CUERPO RECEPTOR.

**AUTORIZACION PRECARIA DE VOLCAMIENTO** : Es la autorización que acuerde la SMAE al PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO para iniciar el volcamiento efectivo del EFLUENTE al CUERPO RECEPTOR, durante el período en que se realiza la construcción de las INSTALACIONES, modificación de los procesos, etc., tendientes a la adecuación de los EFLUENTES en los plazos aceptados en el CRONOGRAMA DE TRABAJOS.

Tiene carácter precario y, por lo tanto, podrá ser cancelada en cualquier oportunidad por decisión fundamentada de la SMAE.

**CONDICIONES DE VUELCO** : Es el conjunto de las normas de calidad físicas y químicas límite fijadas por la SMAE que debe cumplir el EFLUENTE y el caudal máximo autorizado para el mismo, que permite acordar la respectiva AUTORIZACION CONDICIONAL DE VOLCAMIENTO y mantener su vigencia.

**CONSTANCIA DE FUNCIONAMIENTO** : Es el formulario oficial que expide SMAE al MATRICULADO tras la aprobación de la INSPECCION FINAL DE FUNCIONAMIENTO.

**CRONOGRAMA DE TRABAJO** : Es el plan de trabajo (diagrama tarea-tiempo) con indicación de las fechas de iniciación y terminación de la obra a ejecutar, y de cada una de las etapas fijadas para la construcción hasta su finalización.

**CUERPO RECEPTOR** : Es la cañería colectora o conducto cloacal ; la cañería o conducto pluvial ; el canal abierto ; el curso superficial de agua ; el lago o laguna ; el pozo absorbente ; o el pozo excavado o perforado hasta cualquier manto natural de agua, en que se produce la descarga primaria de los EFLUENTES.

**CURSO RECEPTOR FINAL**: Es el curso natural de agua superficial (río, arroyo, lago, laguna) al que concurren los efluentes luego de su conducción en las cañerías cloacales o en los conductos pluviales cerrados o abiertos ; que actúan como CUERPO RECEPTOR.

**DESAGÜE**: Es el dispositivo físico destinado al volcamiento de los EFLUENTES en el CUERPO RECEPTOR.

**DILUCION (d)**: Es el valor adimensional que resulta como cociente entre el caudal del CURSO RECEPTOR FINAL y el caudal del EFLUENTE. Como caudal del CURSO RECEPTOR FINAL se tomará aquél que en un período de registros sea superado en el 90% del tiempo considerado. La extensión de esta serie de observaciones deberá cubrir como mínimo cinco años, excepto si la estación hidrométrica no cubriera este requisito, en cuyo caso se adoptará un caudal en forma métrica no cubriera este requisito, en cuyo caso se adoptará un caudal en forma provisional, con un registro de datos de por lo menos un año. Este valor se corregirá al cabo de los cinco años de observaciones. Como caudal del EFLUENTE se tomará el caudal medio horario. El régimen de desagüe del EFLUENTE debe ser tal que el caudal máximo sea hasta 1,5 veces el caudal medio horario. En el caso de no ser factible operativamente, se considerará, a los efectos del cálculo de la dilución, el caudal medio igual a 0,66 del caudal máximo.

**SMAE** : Es la SUBSECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y ECOLOGIA de la Provincia de Santa Fe.

**DISTANCIA A LAS INSTALACIONES DE TOMA (D)** : Es la distancia entre el punto de volcamiento de los líquidos al CURSO RECEPTOR FINAL, y el punto en que se ubica la primera obra de toma para el servicio de provisión de agua para bebida e higiene de comunidades urbanas, aguas abajo de aquél, medida a lo largo del eje del cauce.

**EFLUENTES** : Son los LIQUIDOS RESIDUALES que han sido o no sometidos al tratamiento de corrección, y que escurren desde la salida del ESTABLECIMIENTO hasta el CUERPO RECEPTOR.

**ESTABLECIMIENTO** : Es el inmueble destinado total o parcialmente a usos industriales, o usos comerciales, o a usos especiales cuyos LIQUIDOS RESIDUALES requieren un tratamiento previo para alcanzar las condiciones físicas y químicas aceptables para su descarga a los CUERPOS RECEPTORES. Incluye el conjunto de instalaciones en que se realiza el PROCESO y los edificios en que las mismas se ubican.

**FACTIBILIDAD DE VERTIMIENTO** : Es el documento mediante el cual se determina el lugar en que se puede proyectar el vertimiento de los EFLUENTES, expedido solamente en función del caudal a desaguar y de las condiciones hidráulicas del CUERPO RECEPTOR ; no significa autorización para el volcamiento efectivo de los EFLUENTES al CUERPO RECEPTOR.

**INSPECCION FINAL DE FUNCIONAMIENTO** : Es la que se realiza para la comprobación final del correcto funcionamiento de las INSTALACIONES.

**INSTALACIONES** : Significa el conjunto de las INSTALACIONES DE PROCESO, INSTALACIONES DE TRATAMIENTO e INSTALACIONES PARA LA CONDUCCION DEL EFLUENTE al CUERPO RECEPTOR.

**INSTALACIONES PARA LA CONDUCCION DEL EFLUENTE** : Son las cañerías, cámaras, bocas de acceso o inspección y todo otro dispositivo complementario para la conducción del EFLUENTE, desde la salida del ESTABLECIMIENTO hasta el CUERPO RECEPTOR.

**INSTALACIONES DE TRATAMIENTO** : Es el conjunto de elementos para el tratamiento de corrección de los LIQUIDOS RESIDUALES provenientes del ESTABLECIMIENTO, e incluye las cañerías, cámaras, accesos, tubos testigos y todo otro dispositivo complementario ubicados dentro del ESTABLECIMIENTO.

**LIQUIDOS RESIDUALES** : Son los líquidos provenientes del PROCESO que se realiza en el ESTABLECIMIENTO, en las condiciones en que se encuentran antes de ser sometidos el tratamiento de corrección.

**MATRICULADO** : Es el profesional inscripto en el REGISTRO de MATRICULAS que, designado por el PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO, tiene a su cargo la responsabilidad técnica por el proyecto, reparación, modificación, mantenimiento y eficiencia de las INSTALACIONES en el ESTABLECIMIENTO , y la relación del ESTABLECIMIENTO con la SMAE.

**PROCESO** : Es el conjunto de operaciones y procesos unitarios que se realizan en el ESTABLECIMIENTO para el cumplimiento de la actividad específica a que está destinado.

**PROPIETARIO DEL ESTABLECIMIENTO** : Es la persona física o jurídica que resulta ser titular del dominio de las instalaciones físicas en que se realiza el proceso, y de este

último ; puede o no ser titular del dominio del inmueble en que se encuentran ubicadas dichas instalaciones.

**REGISTRO DE MATRICULAS** : Es el Registro que llevará la SMAE en el que deberán inscribirse los Profesionales Universitarios que a tal fin autorice y habilite el Consejo de Ingenieros de la Provincia de Santa Fe. Se renovará anualmente entre el 1° y 31 de Diciembre de cada año.

**REGLAMENTO** : Es el conjunto de disposiciones que integran el presente "Reglamento para el Control del Vertimiento de Líquidos Residuales". En el articulado del REGLAMENTO, los términos tienen las definiciones indicadas precedentemente cuando se los consigna en letras mayúsculas.

## **ANEXO II**

**CONDICIONES FISICAS Y QUIMICAS** a que deben ajustarse los efluentes para su descarga en los cuerpos receptores.

### **CRITERIOS GENERALES**

Los EFLUENTES, además de cumplir con las **CONDICIONES DE VUELCO** establecidas a continuación, no deberán conferir al **CURSO RECEPTOR FINAL** características en desacuerdo con los criterios de calidad de agua, adecuados a los diversos usos previstos para ese **CURSO RECEPTOR FINAL**.

### **TITULO A - DESAGÜE A COLECTORA**

Límites para EFLUENTES que se vuelquen a colectora cloacal

1. pH : deberá estar comprendido entre 6,5 y 8,5.
2. ACEITES Y GRASAS : 200 mg/l.
3. SULFUROS : 2 mg/l.
4. TOTAL DE SOLIDOS SUSPENDIDOS: - secado 105 °C - 500 mG/l.
5. DEMANDA BIOLOGICA DE OXIGENO : - 20 °C sin nitrificación - 300 mg/l.
6. DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO : - dicromato potacio - 375 mg/l.
7. FENOLES: 500 ug/l C6H5OHJ.
8. HIDROCARBUROS TOTALES : 100 mg/l
9. CIANURO : 100 ug/l.
10. DETERGENTES SINTETICOS : 5 mg/l.
11. CROMO : 200 ug/l.

12. CADMIO : 200 ug/l.

13. PLOMO : 500 ug/l.

14. MERCURIO : 5 ug/l.

15. ARSENICO : 500 ug/l.

#### TITULO B - DESAGÜE CONDUCTO PLUVIAL CERRADO

Los EFLUENTES que se vuelquen a conducto pluvial cerrado, o a sus afluentes, deberán cumplir con las siguientes CONDICIONES DE VUELCO :

1. pH : Deberá estar comprendido entre 5,5 y 10,0.

2. SUSTANCIAS SOLUBLES EN FRIO EN ETER ETILICO : A. Sustancias grasas polares : su concentración deberá ser inferior a 100 mg/l. B. Aceites minerales : su concentración deberá ser inferior a 10 mg/l.

3. SULFUROS : Su cantidad deberá ser inferior a 1 mg/l.

4. SOLIDOS SEDIMENTABLES EN 10 MINUTOS DE NATURALEZA COMPACTA : No debe contener.

5. SOLIDOS SEDIMENTABLES EN 2 HORAS : Su cantidad deberá ser inferior a 1 ml/l. y se exigirá su eliminación en los siguientes casos :

5.1. Cuando por las características del conducto o por la naturaleza del sedimento puedan causar inconvenientes en aquél ; 5.2. Cuando sea aconsejable por las características físicas o por el estado higiénico del CUERPO RECEPTOR FINAL en que desemboca el conducto ; 5.3. Cuando sea aconsejable por el uso a que se destina el agua del CURSO RECEPTOR FINAL en las inmediaciones de la descarga.

6. TEMPERATURA : Deberá ser inferior a 45° C.

7. DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO :

7.1. Cuando la DISTANCIA A LAS INSTALACIONES DE TOMA (D), sea menor de 8 Km. : su valor deberá ser inferior a 50 mg/l. ;

7.2. Cuando la DISTANCIA A LAS INSTALACIONES DE TOMA (D), sea igual o superior a 8 Km. : su valor deberá ser inferior a los siguientes valores límites indicados en el cuadro, según la DILUCION (d) ;

DILUCION (d) MENOR de 360 ENTRE 361 y 1300 ENTRE 1301 y 5000 ENTRE 5001 y 20.000 MAYOR de 20.000

D.B.O (mg/l)

50

125

180

275

400

8. DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO :

8.1. Cuando la DISTANCIA A LAS INSTALACIONES DE TOMA (D) es menor de 8 Km. ; su valor deberá ser inferior a 75 mg/l. ;

8.2. Cuando la DISTANCIA A LAS INSTALACIONES DE TOMA (D) es igual o mayor de 8 K, ; su valor deberá ser inferior a los siguientes valores límites indicados en el cuadro, según la DILUCION (d) :

DILUCION (d) MENOR DE 360 ENTRE 361 y 1300 ENTRE 1300 y 5000 ENTRE 5001 y 20.000 MAYOR de 20.000

D.Q.O. (mg/l)

75

190

270

410

600

9. DEMANDA DE CLORO : Si por la naturaleza o el origen de los LIQUIDOS RESIDUALES se considere necesario, se podrá exigir la cloración del EFLUENTE hasta satisfacer su demanda de cloro :

10. LIQUIDOS COLOREADOS o DE OLOR OFENSIVO. No se permitirá la descarga de EFLUENTES intensamente coloreados o de olor ofensivo.

11. GASES TOXICOS O MALOLIENTES, o SUSTANCIAS CAPACES DE PRODUCIRLOS : No debe contener.

12. SUSTANCIAS QUE PUEDAN PRODUCIR GASES INFLAMABLES : No debe contener.

13. RESIDUOS CAPACES DE PRODUCIR OBSTRUCCIONES : No debe contener.

14. SUSTANCIAS QUE POR SUS PRODUCTOS DE DESCOMPOSICION o COMBINACION PUEDAN PRODUCIR OBSTRUCCIONES, INCRUSTACIONES O CORROSIONES :No debe contener.

15. RESIDUOS PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE LOS LIQUIDOS RESIDUALES : No se admitirán.

16. SUSTANCIAS TOXICAS ;SUSTANCIAS QUE INTERFIERAN LOS PROCESOS DE AUTODEPURACION DEL CURSO RECEPTOR FINAL ; SUSTANCIAS CAPACES DE PRODUCIR OLOR O SABOR EN PLANTAS DE POTABILIZACION DE AGUA O QUE INTERFIERAN EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE CONSUMO HUMANO : No debe contener en concentraciones superiores a las admisibles para aguas de bebida humana, con la sólo excepción de las sustancias que se indican en los cuadros siguientes, para las que se tolerarán valores inferiores a los límites consignados en cada caso :

16.1. Para DISTANCIA A LAS INSTALACIONES DE TOMA (D) entre UNO (1) y OCHO (8) Kilómetros :

SUSTANCIAS VALORES LIMITES ( en mg/l.)

DILUCION (d) ENTRE 100 a 360

361 a 1300 Mayor de 1300 Arsénico 0,20 0,35 0,50 Cadmio 0,020 0,030 0,050  
Cianuros 0,20 0,25 0,30 Cobre 0,40 0,60 0,80 Cromo hexavalente 0,10 0,15 0,20 Cromo  
trivalente 1,00 1,50 2,00 Detergentes biodegradables 1,00 1,00 1,50 Fenoles 0,020  
0,035 0,050 Hierro 2,50 3,00 3,50 Plomo 0,10 0,10 0,15 Zinc 5,00 5,00 7,00 Estroncio  
90 100 micro micro curie /litro, en todos los casos. Radio 226 3 micro micro curie/l, en  
todos los casos Radiaciones Beta 1000 micro micro curie/l, en todos los casos.

16.2. Para DISTANCIA A LAS INSTALACIONES DE TOMA (D) mayores de OCHO (8) Kilómetros. SUSTANCIAS

VALORES LIMITES (en mg/l) DILUCION (d) entre 100 a 360 361 a 1300 1301 y  
5000 Mayor de 5000 Arsénico 0,50 1,00 1,50 1,50 Cadmio 0,05 0,07 0,10 0,15  
Cianuros 0,20 0,25 0,30 0,45 Cobre 0,40 0,60 0,80 1,50 Cromo hexavalente 0,25 0,50  
0,70 1,00 Cromo trivalente 1,00 2,00 3,00 4,00 Detergentes biodegradables 2,00 3,00  
4,50 7,00 Fenoles 0,05 0,10 0,30 0,45 Hierro 3,00 3,65 4,35 5,00 Plomo 0,20 0,30 0,45  
0,45 Zinc 5,00 5,00 7,00 10,00 Estroncio 90 100 micro micro curie/l, en todos los casos  
Radio 226 3 micro micro curie/l, en todos los casos Radiaciones Beta 1000 micro micro  
curie/l, en todos los casos

16.3. Para DISTANCIA A LAS INSTALACIONES DE TOMA (D) menores de 1 Km. ,  
o para DILUCIONES (d) menores 100 no se admitirá la presencia en los efluentes de  
ninguna de las sustancias antes indicadas en concentraciones superiores a las admisibles  
para aguas de bebida humana. Para el parámetro HIERRO, su valor deberá ser inferior a  
2,00 mg/l.-

16.4. Cuando el EFLUENTE contenga más de TRES (3) sustancias de las indicadas en  
los cuadros de los puntos 16.1 ó 16.2. , aún cuando cada una de ellas se encuentre por

debajo de las tolerancias fijadas no se admitirá su descarga cuando los efectos potenciales entre ellas hagan recomendable su eliminación, a juicio de SMAE. 16.5. Las características del vertido deberán , además , ser tales que la concentración de sustancias tóxicas a 50 metros aguas abajo del punto vertido : ? . no provoquen la muerte de peces. ? . no se detecten por medio de bioensayos apropiados. ? no superen los criterios de calidad definidos para aguas de bebida.

## TITULO C -DESAGUE A CONDUCTO PLUVIAL ABIERTO

### O A CURSO DE AGUA SUPERFICIAL

Los EFLUENTES que se vuelquen a conducto pluvial abierto o directamente a curso de agua superficial, con excepción de cuenca cerrada, deberán cumplir con los siguientes límites de VOLCAMIENTO.

1. pH : Deberá estar comprendido entre el 5,5 y 10,0.
2. SUSTANCIAS SOLUBLES EN FRIO EN ETER ETILICO :100 mg/l A. Sustancias grasas polares: Su concentración deberá ser inferior a 100 mg/l. B. Aceites minerales: Su concentración deberá ser inferior a 10 mg/l.
3. SULFUROS : Su cantidad deberá ser inferior a 1 mg/l.
4. SOLIDOS SEDIMENTABLES EN 10 MINUTOS DE NATURALEZA COMPACTA : Su cantidad deberá ser inferior a 0,5 ml/l.
5. MATERIA EN SUSPENSION TOTAL :
  - 5.1. Cuando la DISTANCIA A LAS INSTALACIONES DE TOMA (D) sea menor a 8 Km. : su valor deberá ser inferior a 30 mg/l.
  - 5.2. Cuando la DISTANCIA A LAS INSTALACIONES DE TOMA (D) sea igual o superior a 8 Km. : su valor deberá ser inferior a los siguientes valores límites indicados en el cuadro, según la DILUCION (d) ;

DILUCION (d) MENOR de 360 ENTRE 361 y 1300 ENTRE 1301 y 5000 ENTRE 5001 y 20.000 MAYOR de 20.000

(mg/l)

30

50

100

150

200

6. TEMPERATURA : Deberá ser inferior a 45° C.

7. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO :

7.1. Cuando la DISTANCIA A LAS INSTALACIONES DE TOMA (D) sea menor de 8 Km. : su valor deberá ser inferior a 50 mg/l. ;

7.2. Cuando la DISTANCIA A LAS INSTALACIONES DE TOMA (D) sea igual o superior a 8 Km. : su valor deberá ser inferior a los siguientes valores límites indicados en el cuadro, según DILUCION (d) :

DILUCION (d) MENOR de 360 ENTRE 361 y 1300 ENTRE 1301 y 5000 ENTRE 5001 y 20.000 MAYOR de 20.000

D.B.O (mg/l)

50

125

180

275

400

8. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO :

8.1. Cuando la DISTANCIA A LAS INSTALACIONES DE TOMA (D) sea menor de 8 Km. : su valor deberá ser inferior a 75 mg/l.

8.2. Cuando la DISTANCIA A LAS INSTALACIONES DE TOMA (D) sea igual o mayor de 8 Km.: su valor deberá ser inferior a los siguientes valores límites indicados en el cuadro, según la DILUCION (d) ;

DILUCION (d) MENOR DE 360 ENTRE 361 y 1300 ENTRE 1300 y 5000 ENTRE 5001 y 20.000 MAYOR de 20.000 D.Q.O. (mg/l)

75

190

270

410

600

9. DEMANDA DE CLORO : Si por la naturaleza o el origen de los LIQUIDOS RESIDUALES se considera necesario, se podrá exigir la cloración del EFLUENTE hasta satisfacer su demanda de cloro.

10. LIQUIDOS COLOREADOS O DE OLOR OFENSIVO : No se permitirá la descarga de EFLUENTES intensamente coloreados o de olor ofensivo.

11. GASES TOXICOS O MALOLIENTE O SUSTANCIAS CAPACES DE PRODUCIRLOS : No debe contener.

12. SUSTANCIAS QUE PUEDAN PRODUCIR GASES INFLAMABLES : No debe contener.

13. RESIDUOS CAPACES DE PRODUCIR OBSTRUCCIONES : No debe contener.

14. SUSTANCIAS QUE POR SUS PRODUCTOS DE DESCOMPOSICION O COMBINACION PUEDAN PRODUCIR OBSTRUCCIONES, INCRUSTACIONES O CORROSIONES : No debe contener.

15. RESIDUOS PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE LIQUIDOS RESIDUALES : No se admitirán.

16. SUSTANCIAS TOXICAS ; SUSTANCIAS QUE INTERFIERAN LOS PROCESOS DE AUTODEPURACION DEL CURSO RECEPTOR FINAL ; SUSTANCIAS CAPACES DE PRODUCIR OLOR O SABOR EN PLANTAS DE POTABILIZACION DE AGUA O QUE INTERFIERAN EL TRATAMIENTO DE AGUAS PARA CONSUMO HUMANO : No debe contener en concentraciones superiores a las admisibles para aguas de bebida humana, con la sola excepción de las sustancias que se indican en los cuadros siguientes, para las que se tolerarán valores inferiores a los indicados en cada caso.

16.1. Para DISTANCIA A LAS INSTALACIONES DE TOMA (D) entre UNO (1) y OCHO (8) Kilómetros.

#### SUSTANCIAS

VALORES LIMITES.(en mg/l) DILUCION (d) entre

100 a 360 361 a 1300 Mayor de 1300 Arsénico 0,20 0,35 0,50 Cadmio 0,02 0,03 0,05  
Cianuros 0,20 0,25 0,30 Cobre 0,40 0,60 0,80 Cromo hexavalente 0,10 0,15 0,20 Cromo  
trivalente 1,00 1,50 2,00 Detergentes biodegradables 1,00 1,00 1,50 Fenoles 0,02 0,035  
0,05 Hierro 2,50 3,00 3,50 Plomo 0,10 0,10 0,15 Zinc 5,00 5,00 7,00 Estroncio 100  
micro micro curie/l, en todos los casos Radio 226 3 micro micro curie /litro, en todos  
los casos Radiaciones Beta 1000 micro micro curie/l, en todos los casos

16.2. Para DISTANCIA A LAS INSTALACIONES DE TOMA (D) mayores de OCHO (8) Kilómetros : SUSTANCIAS

VALORES LIMITES (en mg/l) DILUCION (d) entre 100 a 360 361 a 1300 1301 y  
5000 Mayor de 5000 Arsénico 0,50 1,00 1,50 1,50 Cadmio 0,05 0,07 0,10 0,15

Cianuros 0,20 0,25 0,30 0,45 Cobre 0,40 0,60 0,80 1,50 Cromo hexavalente 0,25 0,50 0,70 1,00 Cromo trivalente 1,00 2,00 3,00 4,00 Detergentes biodegradables 2,00 3,00 4,50 7,00 Fenoles 0,05 0,10 0,30 0,45 Hierro 3,00 3,65 4,35 5,00 Plomo 0,20 0,30 0,45 0,45 Zinc 5,00 5,00 7,00 10,00 Estroncio 90 100 micro curie/l, en todos los casos Radio 226 3 micro curie/l, en todos los casos Radiaciones Beta 1000 micro curie/l, en todos los casos

16.3. Para DISTANCIA A LAS INSTALACIONES DE TOMA (D) menores de UN (1) Kilómetro, o para DILUCIONES (d), menores de 100 no se admitirá la presencia en el EFLUENTE de ninguna de las sustancias antes indicadas en concentraciones superiores a las admisibles para aguas de bebida humana.

16.4. Cuando el EFLUENTE contenga más de TRES (3) sustancias de las incluídas en los cuadros de los puntos 16.1. ó 16.2., aún cuando cada una de ellas se encuentre por debajo de las tolerancias fijadas, no se admitirá su descarga cuando los efectos potenciantes entre ellas hagan recomendable su eliminación, a juicio de SMAE.

16.5. Las características del vertido deberán, además, ser tales que la concentración de sustancias tóxicas a 50 metros aguas abajo del punto de vertido : . no provoquen la muerte de peces. . no se detecten por medio de bioensayos apropiados, . no superen los criterios de calidad definidos para aguas de bebida.

#### TITULO D - DESAGUE A POZOS o A CAMPOS DE DRENAJE

No se admitirá la descarga de EFLUENTES a pozos excavados o perforados conectados a cualquier ACUIFERO libre o confinado, con excepción de los casos singulares que excepcionalmente autorice la SMAyE. En estos casos, las condiciones de los estudios, del diseño, de la construcción y del mantenimiento , y los métodos de contralor, así como las CONDICIONES DE VUELCO admisibles, serán fijadas por la SMAyE al acordarse la autorización de uso.

Los EFLUENTES que se vuelquen a pozos negros o a campos de drenaje no conectados a ningún ACUIFERO (libre ni confinado) deberán cumplir las siguientes CONDICIONES DE VUELCO :

1. pH : Deberá estar comprendido entre 5,5 y 10,0.
2. SUSTANCIAS SOLUBLES EN FRIO EN ETER ETILICO : A. Sustancias grasas polares. Su concentración deberá ser inferior a 100 mg/l. B. Aceites minerales : no debe contener.
3. SULFUROS : Su cantidad deberá ser inferior a 1 mg/l..
4. SOLIDOS SEDIMENTABLES EN 10 MINUTOS DE NATURALEZA COMPACTA : Su cantidad deberá se inferior a 0,5 ml/l..
5. SOLIDOS SEDIMENTABLES EN 2 HORAS : Su calidad deberá ser inferior a 1 ml/l..
6. TEMPERATURA : No se exigirá la corrección de este parámetro en el EFLUENTE.

7. DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO : Su valor deberá ser inferior a 200 mg/l..
8. DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO : Su valor deberá ser inferior a 350 mg/l.
9. LIQUIDOS COLOREADOS O DE OLOR OFENSIVO : No se permitirá la descarga de EFLUENTES intensamente coloreados o de olor ofensivo.
10. GASES TOXICOS O MALOLIENTES, O SUSTANCIAS CAPACES DE PRODUCIRLOS : No debe contener.
11. SUSTANCIAS QUE PUEDAN PRODUCIR GASES INFLAMABLES : No deben contener.
12. RESIDUOS PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE LOS LIQUIDOS RESIDUALES : No se admitirán en concentraciones superiores a las admisibles para aguas de bebida humana.-
13. SUSTANCIAS TOXICAS ; SUSTANCIAS QUE POR INFILTRACION PUEDAN INTERFERIR LOS PROCESOS DE AUTODEPURACION DE ACUIFEROS ; SUSTANCIAS CAPACES DE PRODUCIR OLOR O SABOR EN EL AGUA PARA CONSUMO HUMANO O CON LOS AGREGADOS QUIMICOS EN EL TRATAMIENTO DE POTABILIZACION, O QUE INTERFIERAN DICHO TRATAMIENTO : No debe contener, en concentraciones superiores a las admisibles para aguas de bebida humana. Para el parámetro HIERRO, el valor límite deberá ser de 2,50 mg/l.-.
14. SUSTANCIAS NO CONTEMPLADAS QUE POR INFILTRACION PUEDAN AFECTAR EL ACUIFERO O LAS CAPAS IMPERMEABLES SUBTERRANEAS : No debe contener.

#### TITULO E - DESAGUE A CUENCA ELEMENTAL CERRADA

Cuando los EFLUENTES se vuelquen a lagos, lagunas, etc. que no están unidos a la red hidrográfica de la corriente principal, las condiciones de vuelco serán establecidas por el SUBSECRETARIO de MEDIO AMBIENTE Y ECOLOGÍA en función de las características particulares del cuerpo receptor.

#### TITULO F - DESAGÜE A CURSOS DE AGUA NO PERMENENTE

Cuando los EFLUENTES se vuelquen a canales, cañadas, cunetas o cualquier otro curso de régimen no permanente las condiciones de vuelco serán establecidas por el SUBSECRETARIO DE MEDIO AMBIENTE Y ECOLOGÍA en función de las características particulares del caso.

### ANEXO III

#### CONSERVACION, ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS Y TIPO DE ENVASE

#### DETERMINACION ENVASE CONSERVACION Y ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS

Salinidad

Vidrio

Analizar inmediatamente o usar un recipiente sellado hifráulicamente con vaselina.  
Sílice P

Sulfatos P.V. Refrigerador.

Sulfitos P.V.

Analizar inmediatamente

Sulfuros P.V.

Agregar 4 gotas de acetato de cinc 2N/100 ml de muestra.

Temperatura

Inmediatamente.

Turbiedad - P.V

Analizar en el día. Almacenar en la oscuridad

Metales P.V Para metales disueltos, separar inmediatamente por filtración. Agregar 5 ml de NO<sub>3</sub>H conc/l. Aluminio P.V. No es necesario preservar. Lavar los frascos con ácido clorhídrico 1 :1 y enjuagar rápidamente con agua destilada

Arsénico P.V.

Adicionar ácido nítrico concentrado hasta pH 2.

Plomo P.V Adicionar ácido nítrico concentrado hasta pH 2.

Cianuro

P.V Adicionar solución concentrada de hidróxido de sodio hasta pH 12.

Cobre

V Adicionar ácido nítrico concentrado hasta pH 2.

## DETERMINACION ENVASE CONSERVACION Y ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS

Cromo . V Adicional ácido nítrico concentrado hasta pH 2.

Mercurio

P.V. Adicionar solución de ácido nítrico concentrado y dicromato de potasio en la proporción de 5 ml por 300 ml de muestra (preparar una solución de 300 ml de ácido nítrico conc. y 30 g de dicromato de potasio completando el volumen de 1000 ml con agua destilada).

Níquel P.V. Adicionar ácido nítrico concentrado hasta pH 2.

Potasio

P.V. Adicionar ácido nítrico concentrado hasta pH 2.-

Zinc P.V. Adicionar ácido nítrico concentrado hasta Ph 2

Acidez

P.V. (b) 24 hs., refrigerada

Alcalinidad P.V. (b) 24 hs., refrigerada TERMINACION ENVASE CONSERVACION Y ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS D.B.O. P.V. 6 horas. Carbono orgánico V (caramelo Analizar ráp., refrigerando o agregae. CIH hasta pH 2 CO<sub>2</sub> P.V Analizar rápidamente D.Q.O P.V. Analizar inmediatamente, ageg. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hasta pH 2. Color V

Cianuros P.V 24 hs. agregar Na(OH) pH=12 Refrigerar.

Fluoruros P

Aceites y grasas V (boca ancha) Agregar CIH hasta pH = 2 Iodo P.V Analizar inmediatamente Amoníaco P.V Analizar rápidamente. Agregar 0,8 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc/lt.Refrigerar. Nitratos P.V Analizar rápidamente. Agregar 0,8 0,8 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc/lt. Refrigerar Nitritos P.V Analizar los más rápido posible. Agregar 40 mg/l de HgCl<sub>2</sub> y congelar a -20°C Nitrógeno Org P.V. Analizar rápidamente. Agregar 0,8 0,8 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc/lt . Refrigerar Olor V Analizar los más rápido posible. Refrigerar Oxígeno disuelto V Analizar inmediatamente o agregar 1 ml c/250 ml de muestra de sulfato manganoso Pesticidas (Org.) V Lavar con solvente orgánico el envase a utilizar. pH P.V. (b)

Fenol V 24 hs. Agregar PO<sub>4</sub>H<sub>3</sub> hasta pH 4 y 1 g/l de SO<sub>4</sub>Cu.% H<sub>2</sub>O. Refrigerar

Fosfatos V Para fosfatos disueltos separe por filtración inmediatamente congele a -10°C y/o adicione 40 mg/l de CIHg. Residuo P.V. (b)

Observaciones : P : plástico (polietileno o polipropileno) - V : vidrio - (b) : borosilicato.

## ANEXO IV

### TECNICAS ANALITICAS

#### PARAMETRO METODOLOGIA TECNICA ANALITICA

MIN. DETECTABLE Cadmio Espectrofotometría absorción atómica ASTM (T.31-79) 50 ug/lt Cromo total a) Espectrofotometría absorción atómica ASTM (T.31-79) 50 ug/lt Cromo VI b) Colorimetría - Mét. 1,5 difenilcarbazida Std. Methods (14 th. E) 10 ug/lt Cobre Espectrofotometría absorción atómica ASTM (T.31-79) 1 mg/lt Mercurio Absorción atómica ASTM (T.31-79) 0,4 ug/lt Plomo a) Espectrofotometría absorción atómica b) Colorimetría - Mét. difenilcarbazida ASTM (T.31-79)

Std. Methods (14 th.E) 50 ug/lt

10 ug/lt Zinc Espectrofotometría absorción atómica ASTM (T.31-79) 0,5 mg/lt Arsénico Colorimetría - Mét. di- etilditiocarbonato de Ag Std. Methods (14 th.E) 50 ug/lt Aluminio Espectrofotometría absorción atómica ASTM (T..31-79) 0,3 mg/lt

Cianuros Titulometría - Mét. 4 aminobenzol rodamina Std. Methods (14 th.E) 20 ug/lt

Detergentes Colorimétrico, Sust. ac- tivas al azul de metileno Std. Methods (14 th.E) 50 ug/lt Sustancias fenólicas a) Cromatografía en fase gaseosa b) Espectrofotometría Met. 4 amino antipirina EPA (604)

Std. Methods (14 th E) 5 ug/lt

5 ug/lt Sust. grasas totales Método gravimétrico APNOR 90203/79

Hidrocarburos totales I.R.

Hidrocarburos Cromatografía en fase gaseosa

Aceites vegetales Cromatografía en fase gaseosa IRAM 5650/1

Sulfuros totales a) Colorimetría - Mét. azul de metileno b) destilación

Std. Methods (14 th E) 0,1 mg/lt PARAMETRO METODOLOGIA TECNICA ANALITICA

MIN. DETECTABLE Cloro residual Colorimetría - Met. de la ortotolodina Std. Methods. (14 th.E) 10 ug/lt

Demanda de cloro Colorimetría - Determ. de cloro residual Std. Methods. (14 th.E)

D.B.O.

Std. Methods. (14 th.E)

D.Q.O. Titulometría - Método del dicromato Std. Methods (14 th.E)

O.D. Tiltulometría : a) Mét. de Winkler (Iodometría). b) Modificación de Riedel - Stewart c) Modificación con hipocloritos. Std. Methods (14 th.E)

O.C.del MnO4K Titulometría

pH Mét. electrométrico Std. Methods (14 th.E)

Mat. en suspensión Gravimétrico : a) Filtración a través de crisoles de Goock con abesto. b) Centrifugación

O.S.N. B-XIV 1975

AFNOR - NFT 90105

## ANEXO V

Condiciones Microbiológicas para efluentes que descargan en : conductos pluviales cerrados y abiertos o en cursos de agua superficiales de caudal menos a 50 m3/seg.

Criterios Generales :

Los efluentes procedentes de establecimientos lácteos, frigoríficos, mataderos, curtiembres, lavaderos de lana o industrias cuyos efluentes puedan vehiculizar gérmenes patógenos ; plantas de tratamiento de líquidos cloacales ; vertidos en los que el líquido cloacal se mezcla con el residual y/o aquellos que se dispongan en conductos pluviales cerrados y abiertos o en cursos de agua superficiales de caudal menor a 50 m3/seg. (Q 90). Cuando por la naturaleza del tratamiento del efluente se prevea la reducción de bacterias patógenas, podrá obviarse la Demanda de Cloro prevista en el ítem 9 del presente Reglamento, siempre que el n° de COLIFORMES FECALES en el efluente no superen los 1000 en N.M.P. por 100 ml. 1

## ANEXO A

### LIMITES PARA LA PROVISION DE AGUA POTABLE

#### A-Parámetros organolépticos

	Determinante	Unidades	Límite Obligatorio	Límite Recomendado
1	Color	mg/l escala Pt/Co	20	1
2	Turbiedad	UNT	2	0,5
3	Olor	N° de dilución	2 @12°C 3@25°C	1
4	Sabor	N° de dilución	2 @12°C 3@25°C	0

#### B- Parámetros Físico-químicos

	Determinante	Unidades	Límite Obligatorio	Límite Recomendado
--	--------------	----------	--------------------	--------------------

5	pH	Unidades de pH	pHs +/- 0,5	pHs +/- 0,2
6	Residuos Secos	mg/l luego de secado a 180°C	1500	1000
7	Alcalinidad Total	mg/l CaCO3	-	30 < alcalinidad < 200
8	Dureza total	mg/l CaCO3	100 < dureza < 500	-
9	Cloruros	mg/l Cl	400	250
10	Sulfatos	mg/l SO4	400	200
11	Calcio	mg/l Ca	250	100
12	Magnesio	mg/l Mg	50	30
13	Hierro Total	mg/l Fe	0,2	0,1
14	Manganeso	mg/l mN	0,1	0,05
15	Cobre	mg/l Cu	1,0	-
16	Zinc	mg/l Zn	0,5	-
17	Aluminio	mg/l Al	0,2	0,1
18	Sodio	mg/l Na	200	100
19	Bario	mg/l Ba	1,0	0,1
20	Amonio	mg/l NH4	0,5	0,05
21	Nitrógeno (excluido el N en forma de nitrosos y nitratos)	mg/l N	1	-
22	Oxidabilidad (permanganato de potasio)	mg/l O2	5	2
23	Sulfuro de Hidrógeno	µg/l S	no detectable organolépticamente	-
24	Detergentes aniónicos	mg/l	0,2	-
25	Cloro activo	mg/l Cl	1,2	0,2 < 0,1 < 0,5
26	Fósforo	mg/l P2O5	5,0	0,4

### C- Sustancias Tóxicas inorgánicas

	Determinante	Unidades	Límite Obligatorio	Límite Recomendado
27	Arsénico	µg/l AS	100	50
28	Cadmio	µg/l Cd	5	-
29	Cromo Total	µg/l Cr	50	-
30	Cianuros	µg/l Cn	100	50
31	Mercurio	µg/l Hg	1	-
32	Niquel	µg/l Ni	50	-
32	Plomo	µg/l Pb	50	-
33	Antimonio	µg/l Sb	10	-
34	Plata	µg/l Ag	50	-
35	Selenio	µg/l Se	10	-
36	Nitratos	mg/l NO3	45(1)	25
37	Nitritos	mg/l NO2	0,1	-
38	Fluoruros	mg/l F	1,5	-(2)

(1) Se recomienda que los lactantes no consuman aguas con tenores superiores a lo establecido.

(2) Cuando la autoridad de salud lo recomiende, el valor a alcanzar será de 1mg/l.

D.Sustancias Tóxicas Orgánicas y Pesticidas

	Determinante	Unidades	Límite Obligatorio	Límite Recomendado
39	Benceno	µ/l	10	-
40	Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares( HAP)	µ/l	0,2	-
41	Benzo(A)Pireno	µ/l	0,01	-
42	Cloroformo	µ/l	30	-
43	1,2 Dicloroetano	µ/l	10	-
44	1,1 Dicloroetano	µ/l	0,3	-
45	Hexaclorobenceno	µ/l	0,01	-
46	Pentaclorofenol	µ/l	10	-
47	2,4,5 Triclorofenol	µ/l	10	-
48	Trihalometanos	µ/l	100	-
49	Tetracloruro de Carbono	µ/l	3	-
50	Tricloroetano	µ/l	30	-
51	Tetracloroetano	µ/l	10	-
52	Hidrocarburos totales	µ/l	500	-
53	Tolueno	µ/l	500	-
54	Etilbencenos	µ/l	100	-
55	Xilenos	µ/l	300	-
56	Estireno	µ/l	100	-
57	Monoclorobenceno	µ/l	3	-
58	1,2 Diclorobenceno	µ/l	0,2	-
59	1,4 Diclorobenceno	µ/l	0,01	-
60	Fenoles	µ/l	1	-
61	Cloruro de Vinilo	µ/l	2000	-
62	2,4 D ( Acido 2,4 diclorofenoxiacético)	µ/l	100	-
63	Aldrin y Dieldrin	µ/l	0,03	-
64	Clordano( Total de isomeros)	µ/l	0,3	-
65	DDT (Total de isomeros)	µ/l	1	-
66	Heptacloro y Heptacloro Epoxido	µ/l	0,1	-
67	Gamma-HCH( lindano)	µ/l	3	-
68	Hetoxicloro	µ/l	30	-

69	Malatiion	μ/l	190	-
70	Hetil Paration	μ/l	7	-
71	Parartion	μ/l	35	-

#### E- Parámetros Microbiologicos

	Determinante	Unidades	Límite Obligatorio	Límite Recomendado
72	Bacterias Aeróbicas	N° por ml	100	-
73	Coliformes totales	NMP por 100 ml ( tubos filtrantes)	< 2,2	-
		N° por 100 ml (membrana filtrante)	0	-
74	Coliformes Fecales	NMP por 100 ml ( tubos multiples)	< 2,2	-
		N° por 100 ml (membrana filtrante)	0	-
75	Pseudomonas Aeruginosas		Ausencia	-
76	Fitoplancton y Zooplancton		Ausencia	-
77	Giarda Lambia		Ausencia	-
78	Cryptosporidium		Ausencia	-

#### NOTAS

a) Límites recomendados: Los operadores deben programar alcanzar estos límites en condiciones normales de operación en una fecha que se establezca en las normas aplicables.

b) La definición de frecuencias y métodos de muestreo para verificar el cumplimiento de los límites deberá figurar en las normas aplicables

#### ANEXO B

##### LIMITES PARA LA DESCARGA DE EFLUENTES CLOACALES

	Determinante	Unidades	Límite Obligatorio	Límite Recomendado	Límite Obligatorio sin
--	--------------	----------	--------------------	--------------------	------------------------

					tratamiento
1	Demanda biológica de Oxígeno ( a 20°C sin nitrificación)	mg/l O2	50	20	300
2	Demanda química de Oxígeno (dicromo potasio)	mg/l O2	125	75	375
3	Total de Sólidos suspendidos ( secado a 105°C)	mg/l	60	20	500
4	Aceites y Grasas (sustancias solubles en eter etílico)	mg/l	50	-	200
5	Fósforo( total)	mg/l P	2	Los límites podrán ser derogados si el agua receptora no está sujeta a eutroficación	-
6	Nitrógeno (total)	mg/l N	15	Los límites podrán ser derogados si el agua receptora no está sujeta a eutroficación	-
7	Temperatura	°C	45	En el caso de plantas que tomen agua para refrigeeración y luego la descarguen en el río a temperatura del agua de descarga no debe exceder a la de extracción en más de 10 °C. Podrán aplicarse límites más estrictos si es realmente necesario para proteger el medio ambiente de los peces	45
8	pH	unidades de pH	8,5> pH >7,5	El uso de químicos para corregir el pH no debe provocar que se infrinjan otros límites aplicables	8,5> pH >6,5
9	Amoniaco(total)	mg/l N	25	Los límites podrán ser derogados si el agua receptora no es usada para el abastecimiento de usos humanos o para el sostén de	-

				zonas de pesca reconocidas	
10	Coliformes( total)	NMP por 100 ml	5000	Si el cuerpo receptor se utiliza para propósitos recreativos con contacto físico con el agua, las autoridades de regulación podrán exigir que la descarga sea desinfectada. Esta desinfección no deberá causar que se infrinjan otros límites aplicables.	
11	Coliformes Fecales	NMP por 100 ml	1000	-	-
12	Fenoles	µg/lC6H5OH	50	-	500
13	Hidrocarburos Totales	mg/l	50	-	100
14	Cianuro	µg/l Cn	100	-	100
15	Detergentes sintéticos	mg/l	3	No deberá formarse espuma en el cuerpo receptor	5
16	Cromo	µg/lCr	200	-	200
17	Cadmio	µg/lCd	100	-	100
18	Plomo	µg/lPb	500	-	500
19	Mercurio	µg/lHg	5	-	5
20	Arsénico	µg/lAs	500	-	500
21	Sulfuros	mg/l	1		2

Notas:

a) Límites recomendados: Los operadores deben programar alcanzar estos límites en condiciones normales de operación en una fecha que se establezca en normas aplicables.

b) La definición de frecuencias y métodos de muestreo para verificar el cumplimiento de los límites deberá figurar en las normas.

c) Para pequeñas descargas de sistemas de desagües cloacales que sirvan a poblaciones equivalentes a menos de 500 habitantes que no tengan descargas industriales, normalmente se aplicará un standard descriptivo, a menos que se estime que puede causarle un importante impacto ambiental en el cuerpo receptor. El standard descriptivo incluirá tipos de procesos de tratamiento y las rutinas de operación y mantenimiento.

d) Una flexibilización de cualquiera de los límites puede ser considerada en un estudio caso por caso. La flexibilización podrá ser aceptada si se demuestra a satisfacción de las autoridades de regulación, que no se causará un impacto ambiental importante.

- e) Se podrán considerar límites más estrictos, caso por caso, si se juzga que la aplicación límites listados puede causar un importante impacto ambiental sobre el cuerpo receptor inutilizándolo para los usos designados.
- f) Los límites obligatorios expresan la concentración máxima admisible.
- g) Los límites recomendados deben ser interpretados como objetivos de operación normales.
- h) Los límites obligatorios sin tratamiento se aplicarán a los desagües industriales que descarguen a los sistemas de desagües cloacales.
- i) La definición de frecuencias y métodos de muestreo para verificar el cumplimiento de los límites deberá figurar en las normas aplicables.

C.P.N. Juan C. Mercier -Ministro de Hacienda y Finanzas

Dn Carlos A. Reutemann -Gobernador de Santa Fe