



**PLANIFICACIÓN MAESTRA DE OPERACIONES EN LA GESTIÓN DE LA
CADENA DE SUMINISTRO COLABORATIVA EN CONTEXTO DE
INCERTIDUMBRE. PROPUESTA DE MODELADO**

ING. ALINA MARGARITA VILLALOBO MODERA

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA. ÉNFASIS INDUSTRIAL
CARTAGENA D.T.
2016**



**PLANIFICACIÓN MAESTRA DE OPERACIONES EN LA GESTIÓN DE LA
CADENA DE SUMINISTRO COLABORATIVA EN CONTEXTO DE
INCERTIDUMBRE. PROPUESTA DE MODELADO**

Autor: Alina Margarita Villalobo Modera

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN
INGENIERÍA

Director: Jaime Acevedo Chedid
PhD(c) en Ingeniería Industrial

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA. ÉNFASIS INDUSTRIAL
CARTAGENA D.T.
2016**

Cartagena de Indias, D.T.H y C., marzo 29 de 2016

Señores

COMITÉ EVALUADOR MAESTRÍA EN INGENIERÍA

Programa Maestría en Ingeniería

Universidad Tecnológica de Bolívar

Ciudad

Respetados Señores:

Por medio de la presente hago entrega para su consideración y evaluación, el trabajo de grado titulado "**PLANIFICACIÓN MAESTRA DE OPERACIONES EN LA GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO COLABORATIVA EN CONTEXTO DE INCERTIDUMBRE. PROPUESTA DE MODELADO**" como requisito para optar al título de Magister en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Industrial.

Cordialmente,

ALINA MARGARITA VILLALOBO MODERA

Ingeniera Industrial

Cartagena de Indias, D.T.H y C., marzo 29 de 2016

Señores

COMITÉ EVALUADOR MAESTRÍA EN INGENIERÍA

Programa Maestría en Ingeniería

Universidad Tecnológica de Bolívar

Ciudad

Estimados Señores:

Como Director, por medio de la presente hago entrega para su consideración y evaluación, el trabajo de grado titulado "**PLANIFICACIÓN MAESTRA DE OPERACIONES EN LA GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO COLABORATIVA EN CONTEXTO DE INCERTIDUMBRE. PROPUESTA DE MODELADO**" desarrollado por la estudiante de la Maestría en Ingeniería, énfasis en Ingeniería Industrial, Ing. Alina Margarita Villalobo Modera.

Cordialmente,

JAIME ACEVEDO CHEDID
PhD(c) en Ingeniería Industrial
Director del Proyecto

Nota de Aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Cartagena D.T. y C., marzo 29 de 2016

DEDICATORIA

A Dios, a la Virgen María, a San Judas Tadeo, al Señor de los Milagros de Buga y al Espíritu Santo por inspirar mis pensamientos y mi corazón. Por regalarme sabiduría, toneladas de amor y por tantas bendiciones.

A mi esposo Eduard, por su amor infinito e incondicional, por su paciencia y comprensión, por creer en mí y amarme tal como soy. Por todos los momentos que hizo el papel de madre y padre. Gracias mor!

A mi amada hija Maria Paulina, por prestarme el tiempo que le pertenecía para que su mami alcanzara su sueño. Eres la razón de mi vida. Mi referencia para el presente y el futuro.

A mi padre Antonio, gracias por estar siempre conmigo y escucharme a cualquier hora. Gracias por animarme, por tus sabios consejos y por enseñarme que la disciplina y la perseverancia son necesarias para cumplir las metas en la vida. Este triunfo es tuyo!.

A mi mamá Doris, gracias por ser mi modelo, por ser un ejemplo de mujer y la cómplice de mis esfuerzos y sacrificios. Esta es la realización de todo tu amor y tu dedicación. Mami, No lo habría logrado sin ti!.

A mis hermanas Alma y Adriana, porque siempre han estado allí, apoyándome en todo lo que me emociona, apasiona y me hace feliz. Son lo máximo!

A toda mi familia y amigos, gracias por haberme apoyado en todo este proceso. A ustedes mi corazón y mi sincero agradecimiento.

A todos ellos, muchas gracias.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer sinceramente a aquellas personas que generosamente compartieron sus conocimientos conmigo para hacer posible la conclusión de este proyecto de investigación.

Debo agradecer a mi Director de Tesis el Ing. PhD(c) Jaime Acevedo Chedid por su valiosa dirección, por su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiar mis ideas; ha sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en mi formación como investigador.

Gracias al Ing. Marlon Guevara por su importante aporte y participación activa en el desarrollo de esta tesis. Debo destacar por encima de todo, su dedicación, paciencia y por ofrecer su inteligencia a bien de esta investigación. A su esposa Aleyda gracias por regalarme tiempo de su familia y ser un apoyo fundamental.

A mi gran amiga Beatriz Hernández, por haber estado a mi lado incondicionalmente desde el inicio de este duro camino. Gracias por revisar y corregir mil veces el documento. Tus recomendaciones han enriquecido el trabajo realizado.

A mi amigo Osvaldo Mattos por impulsar el éxito de este proyecto. Gracias por su disponibilidad permanente. Su colaboración fue de gran ayuda en los resultados obtenidos.

Extiendo también mi agradecimiento a la señora Emma Leticia Charris por estar siempre dispuesta a compartir su experiencia y amplio conocimiento. Gracias por estar ahí siempre dando claridad a todas las inquietudes surgidas durante el desarrollo de esta investigación. Mil y mil gracias!

Finalmente, debo agradecer al Ing. William Caicedo por sus ideas y

recomendaciones. Gracias por dedicarle tiempo a este proyecto. Su capacidad para enseñar anima a seguir adelante.

Gracias a todos ellos. Sin ustedes no lo habría logrado.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	21
1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	21
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 Objetivo general	21
1.2.2 Objetivos específicos	22
1.3 ALCANCE DEL TRABAJO DE GRADO	22
1.4 JUSTIFICACIÓN	23
2. ESTADO DEL ARTE.....	24
2.1 GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO	24
2.2 TIPOS DE CADENA DE SUMINISTRO	29
2.2.1 Cadena de suministro tradicional.	29
2.2.2 Cadena de suministro colaborativa.	30
2.3 MODELADO DEL PROCESO DE PLANIFICACIÓN EN LA CADENA DE SUMINISTRO COLABORATIVA	31
2.3.1 Marco de planificación en la gestión de la cadena de suministro colaborativa.....	31
2.3.2 Planificación en la cadena de suministro colaborativa.....	32
2.3.3 Tipos de colaboración.....	33
2.3.4 Estructura proceso genérico de colaboración	36
2.3.5 Otras consideraciones en la planificación de la cadena de suministro colaborativa.....	38
2.4 VISIÓN JERÁRQUICA EN LA VISTA DECISIONAL DE LA PLANIFICACIÓN EN LA CADENA DE SUMINISTRO COLABORATIVA.....	39
2.5 METODOLOGÍAS DE MODELADO EN LA PLANIFICACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO COLABORATIVA EN EL CONTEXTO DE INCERTIDUMBRE	40

2.5.1	Clasificación de los modelos para la planificación jerárquica en la cadena de suministro colaborativa.....	40
2.5.2	Tipos de modelos en la gestión de cadena de suministro para planificación de la cadena de suministro colaborativa.....	46
2.6	METODOLOGÍAS DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA PARA LA CADENA DE SUMINISTRO	50
3.	PROPUESTA DE MODELADO	54
3.1	INTRODUCCIÓN.....	54
3.2	METODOLOGÍA PROPUESTA	54
3.3	MODELADO DEL FUNCIONAMIENTO, OPERACIONES Y ESTRUCTURA FÍSICA DE UNA CADENA DE SUMINISTRO: UN ENFOQUE DE INCERTIDUMBRE	55
3.4	MODELO DECISIONAL Y COLABORATIVO DE LA CADENA DE SUMINISTRO..	56
3.5	MODELO MATEMÁTICO DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA PARA UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN EN CADENAS DE SUMINISTRO COLABORATIVAS	57
3.5.1	Definición del problema.....	57
3.5.2	Parámetros del modelo	60
3.5.3	Outputs del modelo.....	60
3.5.4	Objetivo del modelo	61
3.5.5	Nomenclatura.....	61
3.5.6	Formulación del modelo matemático de programación dinámica para un sistema de planificación en cadenas de suministro colaborativa	73
3.5.7	Formulación del modelo matemático de programación dinámica bajo incertidumbre para un sistema de planificación en cadenas de suministro colaborativa	83
3.6	ARQUITECTURA DE LA PLATAFORMA TECNOLÓGICA PARA LA SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PROGRAMACIÓN DINÁMICA BAJO INCERTIDUMBRE.	91
3.7	ELECCIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS MODELO MATEMÁTICO DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA BAJO INCERTIDUMBRE	92
4.	IMPLANTACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	93
4.1	INTRODUCCIÓN.....	93
4.2	EL PROCESO DE PLANIFICACIÓN DE OPERACIONES EN LA CADENA DE SUMINISTRO COLABORATIVA CONCRETA.....	93

4.2.1	Descripción de la empresa cementera objeto de la aplicación.....	93
4.2.2	Descripción de los productos de la Empresa Cementera objeto de la aplicación. ...	94
4.3	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN.....	94
4.4	MODELADO DE LA EMPRESA CEMENTERA	103
4.4.1	Cadena de suministro de una empresa cementera.....	103
4.4.2	Entidades internas.....	104
4.4.3	Entidades externas	105
4.4.4	Proveedores.....	105
4.4.5	Centros de distribución.....	107
4.4.6	Detallistas.....	107
4.4.7	Clientes.....	108
4.5	INFORMACIÓN PARA LA APLICACIÓN DEL MODELO Y SU HERRAMIENTA DE RESOLUCIÓN: CASO PRÁCTICO.....	108
5.	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	133
5.1	INTRODUCCIÓN.....	133
5.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA BAJO INCERTIDUMBRE DE UN SISTEMA DE PLANIFICACIÓN EN CADENAS DE SUMINISTRO COLABORATIVA	136
6.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	183
6.1	INTRODUCCIÓN.....	183
6.2	SOBRE LA PLANIFICACIÓN USANDO METODOLOGÍAS DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA BAJO INCERTIDUMBRE EN CADENAS DE SUMINISTRO COLABORATIVA	183
6.3	SOBRE LA VIABILIDAD DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO COLABORATIVA EN UN CONTEXTO DE INCERTIDUMBRE	186
6.4	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	187
	BIBLIOGRAFÍA.....	188
	ANEXOS.....	200

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Nomenclaturas índices	61
Tabla 2. Nomenclatura conjuntos	61
Tabla 3. Nomenclatura datos del proveedor	61
Tabla 4. Nomenclatura datos de planta.....	63
Tabla 5. Nomenclatura datos centro de distribución y detallista	64
Tabla 6. Nomenclatura variables continuas	66
Tabla 7. Nomenclatura variables continuas en escenario	69
Tabla 8. Nomenclatura variables binarias	72
Tabla 9. Entidades Internas de la empresa cementera	105
Tabla 10. Entidades externas de la empresa cementera	105
Tabla 11. Demanda del cliente	111
Tabla 12. Conjuntos	112
Tabla 13. Demanda del cliente en el escenario en el periodo	112
Tabla 14. Conjuntos con demanda bajo incertidumbre.....	113
Tabla 15. Probabilidad de escenarios.....	113
Tabla 16. Precio unitario de la materia prima en el proveedor para la planta.....	114
Tabla 17. Precio unitario de la materia prima defectuosa en el proveedor para la planta	114
Tabla 18. Costo por Unidad de Fabricación de la Materia Prima en el Proveedor.....	114
Tabla 19. Costo unitario de transporte desde el proveedor a la planta.....	115
Tabla 20. Costo por unidad de manipulación de la materia prima en el proveedor	115
Tabla 21. Costo por unidad de inventario sobrante de la materia prima en el proveedor .	115
Tabla 22. Costo por unidad de inventario faltante de la materia prima en el proveedor ...	116
Tabla 23. Costo por unidad de desechar defectuoso de la materia prima en el proveedor	116
Tabla 24. Nivel de inventario inicial de materia prima en el proveedor	116

Tabla 25. Nivel de capacidad de transporte para la materia prima desde el proveedor a la planta	117
Tabla 26. Capacidad máxima de inventarios en el proveedor.....	117
Tabla 27. Capacidad máxima de fabricación en el proveedor.....	117
Tabla 28. Fracción de artículos defectuosos de materia prima en el proveedor	118
Tabla 29. Tasa de detección de artículos defectuosos de materia prima en el proveedor	118
Tabla 30. Periodo de tiempo de Transporte desde el Proveedor hasta la Planta	118
Tabla 31. Precio unitario del producto desde la planta hasta el centro de distribución	119
Tabla 32. Precio unitario del producto defectuoso desde la planta para el centro de distribución	119
Tabla 33. Costo fijo de cambio de partida de la planta sobre el recurso de producción del producto en el periodo.....	119
Tabla 34. Costo por unidad de fabricación del producto utilizando tiempo regular en la planta sobre el recurso de producción en el periodo.....	120
Tabla 35. Costo por unidad de fabricación del producto utilizando tiempo extra en la planta sobre el recurso de producción en el periodo.....	120
Tabla 36. Costo por unidad del producto subcontratada por la planta.....	120
Tabla 37. Costo por unidad de transporte del producto desde la planta al centro de distribución	121
Tabla 38. Costo por unidad de manipulación del producto en la planta	121
Tabla 39. Costo por unidad de inventario sobrante del producto en la planta	121
Tabla 40. Costo por unidad de inventario faltante del producto en la planta	122
Tabla 41. Costo por Unidad de desechar defectuoso de producto en la Planta.....	122
Tabla 42. Nivel de inventario inicial de producto en la planta	122
Tabla 43. Nivel de capacidad de transporte en la planta desde la planta hasta el centro de distribución para el producto	123
Tabla 44. Capacidad máxima de fabricación utilizando tiempo regular en la planta sobre el recurso de producción en el periodo de tiempo	123
Tabla 45. Capacidad máxima de fabricación utilizando tiempo extra en la planta sobre el recurso de producción en el periodo de tiempo	123

Tabla 46. Capacidad máxima de entrada de transporte en la planta	124
Tabla 47. Capacidad máxima de salida de transporte en la planta	124
Tabla 48. Capacidad máxima de inventario en la planta	124
Tabla 49. Fracción de defectuosos para el producto en la planta.....	124
Tabla 50. Tasa de detección de producto defectuoso en la planta.....	125
Tabla 51. Tasa de detección de artículos defectuosos de materia prima detectado en la planta	125
Tabla 52. Unidad de unidad de materia prima necesarias para la fabricación del producto ..	125
Tabla 53. Porcentaje para definir la cantidad a subcontratar a partir de la cantidad a fabricar del producto en la planta.....	126
Tabla 54. Periodo de tiempo de Transporte desde la Planta hasta el Centro de Distribución	126
Tabla 55. Precio unitario del producto del distribuidor al detallista	126
Tabla 56. Costo por unidad de transporte del producto desde el centro de distribución al detallista.....	127
Tabla 57. Costo por unidad de manipulación del producto en el centro de distribución ...	127
Tabla 58. Costo por unidad de inventario sobrante del producto en el centro de distribución	127
Tabla 59. Costo por unidad de inventario faltante del producto en el centro de distribución .	128
Tabla 60. Costo por unidad de desechar defectuoso del producto en el centro de distribución	128
Tabla 61. Nivel de inventario inicial de producto en el centro de distribución.....	128
Tabla 62. Nivel de capacidad de transporte del producto desde el centro de distribución al detallista.....	129
Tabla 63. Capacidad máxima de inventario en el centro de distribución	129
Tabla 64. Capacidad máxima de salida de transporte en el centro de distribución	129
Tabla 65. Tasa de detección de producto defectuoso en el centro de distribución.....	130
Tabla 66. Periodo de tiempo de transporte desde el centro de distribución hasta el detallista	130

Tabla 67. Precio unitario del producto desde el detallista al cliente	130
Tabla 68. Costo por unidad de manipulación del producto en el detallista.....	131
Tabla 69. Costo por unidad de inventario sobrante del producto en el detallista	131
Tabla 70. Costo por unidad de inventario faltante del producto en el detallista.....	131
Tabla 71. Nivel de inventario inicial de producto en el detallista	131
Tabla 72. Capacidad máxima de inventario en el detallista	132
Tabla 73. Capacidad máxima de salida de transporte en el detallista	132
Tabla 74. Cantidad de materia prima a comprar por el proveedor en el periodo	136
Tabla 75. Materia prima a transportar desde el proveedor a la planta en el periodo.....	137
Tabla 76. Cantidad de transporte total desde el proveedor a la planta en el periodo.....	138
Tabla 77. Cantidad a producir del producto en la planta sobre el recurso de producción en el periodo	138
Tabla 78. Cantidad a producir en tiempo normal en la planta sobre el recurso de producción en el periodo	139
Tabla 79. Cantidad a producir en tiempo extra en la planta sobre el recurso de producción en el periodo	139
Tabla 80. Cantidad a producir en la planta en el periodo	140
Tabla 81. Cantidad de producto a transportar desde la planta al centro de distribución en el periodo	140
Tabla 82. Cantidad de transporte total desde la planta al centro de distribución en el periodo	141
Tabla 83. Cantidad de producto a transportar desde el centro de distribución al detallista en el periodo.....	142
Tabla 84. Cantidad de transporte total desde el centro de distribución al detallista en el periodo	142
Tabla 86. Cantidad de transporte total desde el detallista al cliente en el periodo	143
Tabla 88. Nivel de inventario faltante de producto en la planta para el periodo	144
Tabla 90. Nivel de inventario sobrante de producto en el detallista en el periodo	145
Tabla 91. Nivel de inventario faltante de producto en el detallista en el periodo.....	145
Tabla 92. Costos totales y beneficios en el proveedor.....	148
Tabla 93. Costos totales y beneficios en la planta.....	151

Tabla 94. Costos totales y beneficios en el centro de distribución.....	154
Tabla 95. Costos totales y beneficios en el detallista.....	156
Tabla 96. Beneficios esperados en la cadena de suministro.....	157
Tabla 97. Cantidad de materia prima a comprar por el proveedor en el periodo en el escenario	158
Tabla 98. Materia prima a transportar desde el proveedor a la planta en el periodo en el escenario	159
Tabla 99. Cantidad de transporte Total desde el Proveedor a la Planta en el periodo en el escenario	160
Tabla 100. Cantidad a producir del producto en la planta sobre el recurso de producción en el periodo en el escenario.....	161
Tabla 101. Cantidad a producir del producto en tiempo Normal en la Planta sobre el Recurso de Producción en el periodo en el escenario.....	162
Tabla 102. Cantidad a producir del producto en tiempo Extra en la Planta sobre el Recurso de Producción en el periodo en el escenario.....	163
Tabla 103. Cantidad a producir del producto en la Planta en el periodo en el escenario .	164
Tabla 104. Cantidad de producto a transportar desde la planta al centro de distribución en el periodo en el escenario.....	165
Tabla 105. Cantidad de producto a transportar desde la planta al centro de distribución en el periodo en el escenario.....	166
Tabla 106. Cantidad de producto a transportar desde el centro de distribución al detallista en el periodo	167
Tabla 107. Cantidad de transporte Total desde el Centro de Distribución al Detallista en el periodo	168
Tabla 108. Cantidad de producto a transportar desde el detallista al cliente en el periodo....	169
Tabla 109. Cantidad de transporte Total desde el Detallista al Cliente en el periodo	170
Tabla 110. Nivel de inventario faltante de producto j en la planta para el periodo en el escenario e.....	170
Tabla 111. Nivel de Inventario sobrante de producto en el Centro de Distribución para el Periodo en el escenario.....	171

Tabla 112. Nivel de Inventario sobrante de producto en el Detallista en el Periodo en el escenario	171
Tabla 113. Nivel de Inventario faltante de producto en el Detallista en el Periodo en el escenario	172
Tabla 114. Costos totales y beneficios en el proveedor en el escenario	174
Tabla 115. Costos totales y beneficios en el proveedor en el escenario	175
Tabla 116. Costos totales y beneficios en la planta en el escenario	176
Tabla 117. Costos totales y beneficios en la planta en el escenario	177
Tabla 118. Costos totales y beneficios en el centro de distribución en el escenario	178
Tabla 119. Costos totales y beneficios en el centro de distribución en el escenario	179
Tabla 120. Costos totales y beneficios en el detallista en el escenario	180
Tabla 121. Costos totales y beneficios en el detallista en el escenario	181
Tabla 122. Beneficios totales y esperados en la cadena de suministro en el escenario...	182

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Configuración de la cadena de suministro	26
Figura 2. Proceso genérico de colaboración	37
Figura 3. Modelos de cadena de suministro	42
Figura 4. Conceptualización y etapas de la programación dinámica.....	53
Figura 5. Diagrama del proceso de fabricación de cemento.....	97
Figura 6. Diagrama del proceso de trituración de materias primas	99
Figura 7. Diagrama del proceso de molienda de pasta	100
Figura 8. Diagrama del proceso de homogenización	101
Figura 9. Diagrama del proceso de clinkerización	101
Figura 10. Diagrama del proceso de molienda de cemento.....	102
Figura 11. Diagrama del proceso de despacho y entrega del producto final	103
Figura 12. Arquitectura física de las etapas de la cadena de suministro	104
Figura 13. Arquitectura física de las etapas de la cadena de suministro objeto de aplicación	110
Figura 14. Diagrama de la cadena de suministro objeto de aplicación	111
Figura 15. Resumen GAMS utilizando solver XPRESS.....	134
Figura 16. Resumen GAMS utilizando Neos Solvers soporte web	134
Figura 17. Resumen GAMS bajo incertidumbre utilizando solver XPRESS.....	135
Figura 18. Resumen GAMS bajo incertidumbre utilizando Neos Solvers soporte web	135

INTRODUCCIÓN

La cadena de suministro contiene todos los procesos que integran las empresas cliente-proveedor para entregar los productos finales a los clientes a partir de las materias primas (Paulraj, 2002). “A través de la gestión se integra, coordina y sincroniza el proceso de toma de decisiones en eslabones de la cadena, aportando cada vez mejores beneficios económicos en sus procesos funcionales, por ejemplo; disminución de los niveles y costos de inventarios, optimización en compras y, cumplimientos de órdenes de pedidos” (Arns et al., 2002, pp. 885-894).

La alta competitividad que vive hoy en día la economía actual, sumada a los efectos de la globalización, exige a la industria descubrir nuevos caminos para interactuar y satisfacer a los clientes. Por ello, el análisis de cadenas de suministro representa un poderoso mecanismo en la búsqueda de ventajas competitivas que lleven a una compañía hacia el cumplimiento de sus objetivos. La razón es que las cadenas de suministro comprenden “todas las interacciones entre proveedores, fabricantes, distribuidores y clientes” (Heizaer y Render, 2004, pp. 409-432). Así que en su análisis no sólo se estudian los diferentes eslabones que participan en todo el proceso productivo de una compañía, sino también se evalúan las relaciones que existen entre ellos.

La función logística de toda organización busca la eficiencia de las actividades que se desarrollan, en pro de una mayor productividad y competitividad, siendo en la actualidad interés de esta área organizacional el reaprovisionamiento de materias primas, control de inventarios, velocidad de entrega, servicio al cliente e integración del flujo de información; aspectos manejados en la cadena de suministros.

Es así como en una cadena de suministros, los proveedores, productores, distribuidores y detallistas colaboran para entregar el producto de en el tiempo establecido y con la calidad exigida de tal manera que el dinero se mueva a través

de toda la cadena. La optimización de una cadena de suministro, conlleva a mejoras en todos los procesos que permiten disminuir inventarios, ahorrar costos de transporte y otros gastos por entrega de la mercancía, así como optimizar el tiempo de comercialización.

Por ello y debido a los fuertes cambios en cuanto a los niveles de consumo, exigencias del cliente e internacionalización de los mercados, lograr posicionamiento, suplir necesidades y expectativas de clientes y mantenerse en un mundo globalizado, se hace necesario entrar a competir de una manera más fuerte y en colaboración con otras organizaciones que pudieran brindar aquellos servicios o procesos que no eran muy eficientes en las empresas.

De este modo se hace latente que la organización para lograr ser competitiva, oriente su gestión hacia procesos más dinámicos y de colaboración eliminando barreras. Esto puede suceder entre las propias unidades de negocio o entre las diferentes empresas que forman una red, buscando simplificar las actividades y hacerlas más eficientes a través de la reducción de costos y el mejoramiento de la calidad.

Por lo tanto, en el presente trabajo, se desarrollará un modelo que aspira a ser considerado como una alternativa útil para un sistema de planificación en cadena de suministro de tipo colaborativa que permita a la organización planificar cada etapa de la cadena, integrando las diversas funciones, colaborando entre ellas (vincular clientes y proveedores con la empresa) y sincronizando todas sus actividades.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La necesidad que tienen las empresas pertenecientes a una cadena de suministro, en búsqueda de la mejor planificación de sus operaciones, es una de las principales preocupaciones en el entorno de mercado actual.

Estas preocupaciones surgen gracias a las diversas fuentes de incertidumbre y a las complejas interrelaciones que existen entre los diferentes niveles de planificación y actores de la cadena. Preocupaciones como la pérdida de ventas por bajas existencias o inventarios faltantes, la obsolescencia de productos, costos relacionados con transporte e inventario, están presentes permanentemente en el contexto de la producción. Por lo tanto, el proceso de toma de decisiones se hace bastante complejo dada la incertidumbre de las situaciones sobre las que se decide; incertidumbre que no sólo es probabilística, sino que también puede ser generada por la imprecisión con que se recibe la información.

La búsqueda de alternativas de solución se constituye en la base fundamental de la presente propuesta de investigación. La definición de un modelo de planificación de operaciones en una cadena de suministro colaborativa permitirá modelar la incertidumbre en situaciones reales como la demanda del mercado, retrasos inciertos debido a fallos en el proceso e incluso incertidumbre en las cantidades que pueden suministrar los proveedores, entre otras.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo de planificación maestra de operaciones en la gestión de la

cadena de suministro colaborativa, basado en programación dinámica para la solución de problemas de planificación de la producción en condiciones de incertidumbre para empresas industriales.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estructurar de manera general un modelo de planificación de operaciones en la cadena de suministro colaborativa, a partir del análisis de modelos de planeación de la producción existentes.
- Formular un modelo en programación dinámica aplicado a la planificación de la producción, a través del desarrollo de una metodología para ser usadas en el modelo propuesto.
- Modelar la planificación de la producción y las operaciones en la cadena de suministro colaborativa bajo incertidumbre a través de programación dinámica.
- Elaborar una metodología para la evaluación del modelo para la planificación de la producción en la cadena de suministro.

1.3 ALCANCE DEL TRABAJO DE GRADO

La investigación permite atender el problema de planificación de operaciones de la cadena de suministro colaborativa con incertidumbre a través del desarrollo de un modelo matemático basado en programación dinámica, un nuevo mecanismo que permita reducir la aleatoriedad a lo largo de la cadena y que ayude a los responsables a tomar las mejores decisiones hacia la búsqueda de la maximización de los beneficios para todos los miembros de la cadena de suministro: proveedores, fabricantes, distribuidores y detallistas.

Se proponen técnicas de solución que permiten la aplicación del modelo y el análisis de los resultados a partir de los parámetros asignados y de los posibles valores que pueden ser asignados por el decisor, para lo cual la relación de planificación será a medio y corto plazo bajo el nivel táctico y operativo

El análisis del modelo se basará bajo el ámbito nacional y por ende no se considerará a nivel internacional.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Los estudios de modelización de diferentes cadenas de abastecimiento permiten conocer cuáles son las variables y los diferentes tipos de modelos utilizados para definir el más adecuado. La realización de este trabajo se justifica claramente por la importancia que tiene la mejora de la toma de decisiones en las empresas utilizando el pensamiento sistémico en la cadena de suministros, para generar una administración eficiente y que sea un punto clave para hacerlas más competitivas en el mercado.

La propuesta desarrolla un modelo que permite visualizar, entender y comprender los efectos de la cadena de suministros con diferentes variables. En esta investigación el modelo propuesto incluye las variables más representativas, los recursos utilizados por las empresas, personal y los inventarios.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO

Los primeros indicios sobre el tema de la cadena de suministro fueron introducidos por Forrester (1961) quien exaltaba la interacción entre materiales, pedidos, dinero, mano de obra, equipos e información, como principal fuente de éxito de una organización.

Más recientemente, Companys (2005) define la cadena de suministro como una interrelación de organizaciones que participan en diferentes etapas del proceso productivo/operaciones a través de actividades que buscan añadir valor, desde el punto de vista del cliente, al producto, bien o servicio.

Global Supply Chain Management Forum en 1998, esboza que la cadena de suministro “es la integración de los procesos clave de negocio que va aguas arriba desde el usuario final hasta el proveedor, proporcionando productos, servicios e información que añaden valor a los clientes, así como al entorno”.

Así mismo Vachon y Klassen (2002, pp. 218-230) estipulan que es “el paradigma determinante que combina la procura, la manufactura, la distribución, las ventas y el servicio al cliente en un sólo proceso de negocios integrado, el cual garantiza la calidad y velocidad en la satisfacción del consumidor”.

Bajo la misma línea, pero en su forma más extendida, Stadler y Kilger (2002) plantean la cadena de suministros como una fusión de áreas, que armonizan desde el principio de la cadena el flujo de materiales, información y finanzas, con el objetivo de satisfacer a los clientes y aumentar la competitividad de las organizaciones.

Es decir, que la cadena de suministro agrupa procesos de diferentes organizaciones, especialmente las actividades que tienen que ver con el movimiento de bienes. Se inicia con la compra de materias primas pasando por su fabricación, almacenaje, venta y distribución al consumidor final. Incluyendo en ellas funciones como programación de la producción, control de inventarios, transporte y servicio al cliente. Todo lo anterior, bajo la transversalidad de los sistemas y flujos de información y la colaboración que deben ser constantes entre los eslabones.

De igual manera, Handfield y Nichols (1997) establecen en sus definiciones que la cadena de suministro engloba todas las actividades desde la etapa de materias primas hasta el cliente final en la cual los productos son transformados a lo largo de dicha cadena en un flujo que se mueve al igual que la información, buscando competitividad mediante el mejoramiento de sus relaciones.

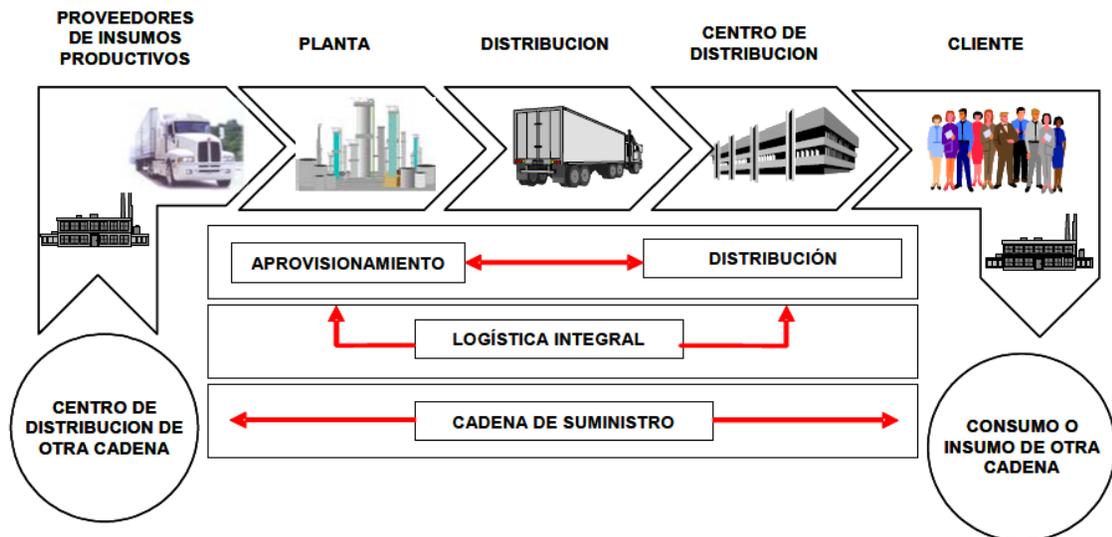
Es así como para Ellram (1991, pp. 13-22), la "GCS es la integración de operaciones en la planificación y el control del flujo de materiales desde los proveedores hasta el usuario final".

Para el International Center for Competitive Excellence (1994), la gestión de la cadena de suministro es el encadenamiento de procesos desde los proveedores de primer nivel hasta el usuario final creando y entregando valor en la forma de productos terminados y servicios.

Por lo anterior, una definición de cadena de suministro más completa se puede establecer como "La cadena de suministro es el conjunto de empresas eficientemente integradas por los proveedores, los fabricantes, distribuidores y vendedores mayoristas o detallistas coordinados, que busca ubicar uno o más productos en las cantidades correctas, en los lugares correctos y en el tiempo preciso, buscando el menor costo de las actividades de valor de los integrantes de la cadena y satisfacer los requerimientos de los consumidores."(Simchi-Levi,

Kaminsky y Sinchi-Levi, 2000). (Ver Figura 1).

Figura 1. Configuración de la cadena de suministro



Fuente: Jiménez y Hernández (2002).

En este sentido, en la gestión de la cadena de suministro existe una planificación de las operaciones en la que los productos son elaborados y distribuidos en las cantidades adecuadas y entregadas en el tiempo justo, con el objetivo de minimizar los costos a lo largo de la cadena de suministro; mediante la integración de cada una de sus etapas, proveedores, fabricantes, almacenes y tiendas (Sinchi-Levi et. al., 2000).

O como lo plantea Mentzer et. al (2001, pp. 1-25), es “la coordinación sistemática, estratégica y táctica del proceso y funcionamiento del marketing tradicional dentro de una compañía en particular, atravesando distintas entidades de negocio dentro de la cadena de suministro, todo esto para la mejora de objetivos a largo plazo de las compañías que actúan más en solitario, y de la cadena de suministro en conjunto”.

De igual forma, la GCS puede ser considerada como el proceso que permite administrar los movimientos físicos, financieros y de información al mismo tiempo y a lo largo de toda la cadena. Así como gestionar los recursos humanos con una visión transversal de procesos, segmentar los clientes basados en su diferenciación, establecer redes de distribución, coordinar las fuentes de abastecimiento, desarrollar una tecnología válida y medir el desempeño. Logrando finalmente generar ventajas en cada eslabón y así optimizar toda la cadena. (Peñalosa, 2004).

Según APICS (Diccionario, Edición 11, 2005), la “gestión de la cadena de suministro es el diseño, planificación, ejecución, control y seguimiento de las actividades de la cadena de suministro con el objetivo de crear una red de valor, construyendo una infraestructura de competitividad, forzada por una logística mundial, sincronizando el proveedor con la demanda y midiendo su desarrollo global”.

En el mismo sentido, Lario y Vicens (2006) establecen que la gestión de la cadena de suministro describe el conjunto de operaciones internas entre cada una de las etapas de la cadena cuya meta es suministrar al cliente final un producto.

El diccionario del *Council of Supply Chain of Management Professionals* (2010) define la gestión de la logística como "la parte de gestión de la cadena de suministro que planifica, ejecuta y controla el funcionamiento eficiente, eficaz y con interés flujo inverso y almacenamiento de bienes, servicios e información relacionada entre el punto de origen y el punto de consumo con el fin de satisfacer las necesidades de los clientes".

Sin embargo, para que se logren los resultados esperados, es necesario que las empresas evolucionen de un sistema basado en la eficiencia interna de los procesos a un sistema de gran valor añadido hacia los clientes a través de una buena gestión de la cadena global de suministros. No se trata de optimizar los procesos de la cadena de suministro como si fueran funciones aisladas buscando eficiencia y

estabilidad (Vilana, 2010). Más bien se trata de una metodología para reducir costos, incrementar la satisfacción del cliente, utilizar mejor los activos y construir nuevos ingresos.

Así, uno de los objetivos principales de la gestión de la cadena de suministros es la optimización de la satisfacción del cliente, a través de la integración de una variedad de funciones y procesos dentro y entre organizaciones.

Y se aplica a las relaciones de colaboración de los miembros de los diferentes niveles de la cadena, refiriéndose a las prácticas comunes y acordadas realizadas conjuntamente por dos o más organizaciones. Sin embargo, para representar la GCS se debe tener en cuenta: la necesidad de intercambio de información, las relaciones a largo plazo, el riesgo y la recompensa con el intercambio, la cooperación y los procesos de integración.

Tradicionalmente, los empresarios gestionaban las actividades de previsión de la demanda, compras, gestión de almacenes o planificación de la producción de manera fragmentada y por ende se llegaba a encontrarlas bajo funciones separadas que no compartían información. Con el nuevo enfoque se ha descubierto la importancia de considerar la gestión de la cadena de suministro como una variable estratégica. No se debe considerar como un nuevo paradigma, sino como una nueva forma de gestionar lo que ya existe (Vilana, 2010).

Es así como el desempeño logístico se ve afectado positivamente por la estrategia de gestión de la cadena de suministro afectando igualmente, y de manera directa el rendimiento del mercado y el desempeño financiero de la organización. Por ende, el éxito de los participantes individuales de la cadena de suministro depende del éxito de la cadena de suministro en general. Así el éxito en el ámbito de la cadena de suministro se traducirá en el éxito a nivel de organización. Sólo si los esfuerzos

de la gerencia están direccionados en fortalecer los vínculos con los proveedores y clientes (Green y Inman, 2005).

Finalmente, tal y como lo argumentan Stock et. al., (2010), es necesario continuar con el análisis de la gestión de la cadena de suministro, enfocándose en descubrir qué principios, conceptos y teorías nuevas se pueden aplicar a su estudio. Así como identificar la importancia, oportunidades y desafíos en la importación de teorías de otras disciplinas.

2.2 TIPOS DE CADENA DE SUMINISTRO

2.2.1 Cadena de suministro tradicional. Canella y Ciancimino (2010) definen la cadena de suministro tradicional como una estructura logística descentralizada en la cual cada miembro de la cadena de manera independiente toma sus decisiones. Se enfocan en sus objetivos particulares hacia la maximización de sus ingresos sin tener en cuenta los otros miembros de la cadena. Se basan en su propio nivel de inventarios para emitir sus pedidos sin tener en cuenta el estado de los inventarios de los demás eslabones de la cadena. Los pedidos son la base de información para tomar sus decisiones. El proveedor no establece relaciones con el consumidor final, es decir, no interactúa con este, no conoce los datos reales de ventas, y de acuerdo a pronósticos visualiza la tendencia del mercado en función de los que recibe del detallista.

La demanda del mercado afectada por la no transparencia, evita que haya una integralidad y sinergia entre todos los miembros de la cadena de suministro. Así mismo, el proceso de solicitud de materiales y componentes, así como la entrega de productos entre el detallista y el proveedor se caracteriza por constantes retrasos ocasionados por los tiempos de producción y de transporte. Todos estos retrasos contribuyen a generar relaciones no sincronizadas y falta de coordinación en la cadena de suministro, ocasionando ineficiencia general en la red fabricación-

distribución.

“La cadena tradicional es propensa a las nocivas secuelas de la falta de coordinación debido a sus características estructurales, donde sólo una profunda reformulación de las alianzas y de los mecanismos de coordinación puede limitar la aparición del temido efecto látigo” (Cannella et. al, 2010, pp. 134-149).

2.2.2 Cadena de suministro colaborativa. Una definición acertada de cadena de suministro fue dada por Spekman, Kamauff y Myhr (1998); Simatupang y Sridharan, (2005); Sheu, Yen y Chae (2006). “Se entiende por cadena de suministro colaborativa, si dos o más compañías autónomas establecen relaciones a largo plazo, trabajan muy de cerca y establecen metas comunes para planear y ejecutar operaciones dentro de la cadena de suministro, consiguiendo más beneficios de los que puedan conseguir si actuaran independientemente”.

La cadena de suministro colaborativa se caracteriza por el establecimiento de relaciones a largo plazo y metas comunes entre las organizaciones que se encuentran dentro la misma, trabajando de la mano en la búsqueda de beneficios mutuos que son superiores a trabajar independientemente (Ellram y Hendrick, 1995; Lambert, Emmelhainz y Gardner, 1999; Mentzer, Foggin, Golicic, 2000; Stank, Keller y Daugherty, 2001; Golicic, Foggin y Mentzer, 2003; Manthou, Vlachopoulou y Folinas, 2004; Sheu et al., 2006; Simatupang y Sridharan, 2008). A través de esfuerzos conjuntos, en la búsqueda de un logro de un mismo objetivo, permitirá transformar las soluciones óptimas de las distintas etapas de la cadena en una solución integral (Seifert, 2003).

Por lo tanto, a partir de la integración de los miembros de la cadena, se logran obtener soluciones coordinadas que minimizan los costos, los niveles de inventarios y los tiempos de respuesta, maximizando los ingresos, mejorando el servicio al cliente y la calidad del producto. (Bowersox, 1990; Buzzell y Ortmeyer, 1995;

Corbett, Blackburn, Wassenhove, 1999; Li et al., 2006; Birendra, Srinivasan y Xiaohang, 2007).

Una vez se eliminan las ineficiencias en la cadena de suministro a partir de la colaboración, podrán evitar el efecto látigo, producido por la falta de coordinación en la cadena de suministro (Holweg et. al., 2005). Simatupang y Sridharan (2008, pp. 15-30) expresa que “para obtener en conjunto objetivos estratégicos, se deben formular e implementar estrategias claras y efectivas teniendo en cuenta elementos claves para crear y mantener la colaboración.

2.3 MODELADO DEL PROCESO DE PLANIFICACIÓN EN LA CADENA DE SUMINISTRO COLABORATIVA

Para llevar a cabo el proceso de planificación es necesario plantear un modelo que permita manipular todas las variables que hacen parte de estos procesos, “el modelo es una representación de la realidad y no la realidad misma con lo que factores como la aleatoriedad existente en el entorno real, quedarán difícilmente reflejados” (Ribas y Companys, 2007, pp. 91-121).

El proceso de planificación es posible desarrollarlo a nivel de diseño y a nivel de operaciones. En el primer nivel se planifica la capacidad productiva y el desarrollo del producto, y en el segundo se planifican y calculan las necesidades, en el que se incluye en plan maestro ya que sus decisiones están amarradas a un objetivo económico. El plan “debe satisfacer la demanda maximizando los beneficios de la empresa” (Chopra y Meindl, 2001, p. 35-36).

2.3.1 Marco de planificación en la gestión de la cadena de suministro colaborativa. La planificación es una de las actividades más importantes para mejorar la productividad y la calidad de toda la función organizacional ya que la mayoría de los resultados provenientes de esta influyen en la toma de decisiones

de los gestores y en la evaluación del desempeño de la compañía. En muchos casos, los procesos de planificación se desarrollan para ser utilizados como mecanismos de diagnóstico hacia la detección de los posibles problemas que se pueden dar en las actividades propias de la organización.

Según Companys (2003) la planificación es una actividad muy global y por lo tanto puede hacer referencia a situaciones con enfoque y nivel de detalle distintos. Es así como la conceptualización jerárquica de la planificación establece distintos niveles de planificación relacionados entre sí, en donde el último nivel tiene el menor horizonte que el anterior y constituye para éste una disminución del intervalo de variación del objeto.

Stadler y Kilger (2000, pp. 427-438) observan que “la planificación colaborativa en una cadena de suministro se interesa por establecer diferentes procesos de planificación y establece los distintos cambios de información para mejorar los diferentes tipos de planificación en los diferentes niveles jerárquicos. La planificación colaborativa se aplica a las distintas etapas de la cadena de suministro de tipo colaborativa teniendo en cuenta que en cada una de estas etapas los procesos de planificación interactúan con cada etapa que conforma la cadena”.

2.3.2 Planificación en la cadena de suministro colaborativa. La planificación en cadenas de suministro colaborativa puede ser definida como “un proceso interactivo, en el que los clientes y proveedores de una cadena de valor colaboran continuamente y comparten la información sobre la demanda para planificar conjuntamente sus actividades” (Alarcón y Ortíz, 2004).

La planificación de la cadena de suministro colaborativa se expande en la relación cliente-proveedor y busca la conexión de la planificación en cada uno de los miembros de la cadena, lo cual generará una planeación global en la que el flujo de información se mueve de manera rápida y con resultados precisos. Incluye, por lo

tanto, múltiples dominios de planificación (Standler y Kilger, 2002).

“La estrategia fundamental para lograr una cadena de suministro eficiente y competitiva es la colaboración mutua y el intercambio de información operacional en tiempo real, ya sea de producción, inventarios, costos, etc. Siendo posible esta colaboración mediante la configuración de plataformas tecnológicas que permitan el libre flujo de información, empezando por lograr niveles de visión y anticipación por parte de las diferentes organizaciones involucradas; funcionando como una red de proveedores, fabricantes, distribuidores y consumidores finales, acordes con las especificaciones del cliente” (Organización SAP, 2006).

La planificación colaborativa requiere actividades de colaboración con la intención de establecer una relación a medio plazo que permita unas actividades de planificación e intercambio de la información proporcionada por los socios que cree un valor adicional. Es decir, la colaboración no es una relación puntual, el objetivo es establecer un marco de trabajo común.

2.3.3 Tipos de colaboración. Soosay (2008) en su investigación establece varios tipos de colaboración: alianzas estratégicas en las que se dan relaciones entre empresas a largo plazo, donde dos o más miembros comparten recursos, conocimientos y capacidades con el objetivo de mejorar la posición competitiva de cada miembro, o a través de empresas conjuntas buscando a menudo nuevos mercados y proporcionándose en conjunto bienes y/o servicios, estrategias de marketing y capacidad financiera. Acuerdos de cooperación con otras organizaciones en respuesta a que la tecnología cambia rápidamente, un entorno competitivo, la ampliación de las capacidades de abastecimiento y las estrategias de organización.

O, a través de una integración virtual refiriéndose a un esfuerzo de colaboración temporal bien acoplado entre entidades independientes (proveedores, clientes,

competidores) que están unidas por la tecnología de telecomunicaciones y finalmente una colaboración en integración vertical, horizontal y lateral. Simatupang y Sridharan (2002) y Barrat (2004) propusieron una integración vertical y horizontal como estrategia de colaboración en una cadena de suministro. La integración lateral combina los beneficios y capacidades de intercambio tanto de la integración vertical y horizontal. Stadler y Kilger (2008a) por su parte plantea colaboración en materiales y servicios, en demanda, en inventario, en aprovisionamiento, capacidad y transporte.

2.3.3.1 Materiales y servicios. Dependiendo del tipo de colaboración, la información que se intercambia entre los distintos agentes de la cadena de suministro hace referencia a productos tangibles o a servicios. Normalmente la colaboración en temas de demanda e inventarios trata información sobre materiales, mientras que por ejemplo la colaboración en capacidad de producción trata de un servicio.

Tradicionalmente la disponibilidad de materiales y servicios se ha tratado manualmente, pero con las herramientas de planificación avanzada es más sencillo asegurar la sincronización de materiales y servicios necesaria para satisfacer la demanda en muchos casos.

2.3.3.2 Colaboración en demanda. La valoración colaborativa de la demanda permite calcular una previsión bajo consenso entre las distintas áreas de una empresa o entre las múltiples organizaciones involucradas en la cadena de suministro, entrelazando el proceso de previsión de los diferentes dominios de planificación.

Cuando existe colaboración en la previsión de la demanda, la demanda de un socio se trata de forma preferente, asegurando siempre el servicio a los socios de la colaboración.

Por lo general, cada miembro de la cadena de suministro realiza su estimación de la demanda teniendo en cuenta la venta inmediatamente anterior de su cliente directo y no la demanda del cliente final. Este error en la estimación de la demanda se suma por tanto a su propia previsión. Algunas compañías detectan el error y toman acciones recurriendo a técnicas de previsión aún más certeras, pero, ninguna de estas herramientas evita el resultado de una demanda aún mayor cuando el error se encuentra en el input de su cálculo, es decir, en los datos utilizados.

2.3.3.3 Colaboración en inventario. El concepto Vendor Managed Inventory – VMI- supone que el proveedor es el responsable estar atento del nivel de inventario de su cliente. El proveedor a través de su proceso de planificación determina sus requerimientos de materias primas o componentes, teniendo en cuenta la previsión de ventas del cliente y el nivel de inventario deseado.

2.3.3.4 Colaboración en aprovisionamiento. La colaboración en compras está fundamentada en compartir la información: El proveedor, determina las necesidades de los mayoristas de acuerdo a las cantidades en inventario y a las salidas reportadas por el distribuidor.

El objetivo de este tipo de colaboración es el mismo que el de demanda, sólo que en este caso la relación se da con los proveedores y no con los clientes.

2.3.3.5 Colaboración en capacidad. La capacidad colaborativa logra determinar de manera acordada el plan de capacidad contratado o disponible con sus clientes. Dado que el fabricante decida subcontratar una fracción de su producción a otro productor, éste espera conocer la disponibilidad de capacidad de dicho productor y a su vez deberá hacerle saber cuál es el plan de producción que tiene estimado a contratar para garantizar los niveles deseados de inventario.

2.3.3.6 Colaboración en transporte. La colaboración en este aspecto consiste en la elaboración de rutas de envío en alianza con un transportador en el que el cliente envía a éste sus necesidades y a su vez el proveedor ajusta las rutas y cancela los servicios que no puede ejecutar, teniendo el cliente que ajustar la planificación para que ésta sea atendida o rechazada. Inmediatamente es aceptada la planificación, la solicitud pasa a confirmación.

2.2.3.7. Colaboración en manejo de información. Los sistemas en línea permiten compartir, visualizar y tomar decisiones en tiempo real, lo que facilita la planificación de las actividades a lo largo de la cadena. Adicionalmente, guardar información histórica y registros que pueden ser recuperados fácilmente, garantizan una mayor posibilidad de conocer las necesidades y entrar a negociar con los proveedores de servicios.

La transparencia de la información compartida es el medio efectivo para reducir la incertidumbre, causante del problema de distorsión de la información en una cadena de suministro conocido como el efecto látigo (Angeles y Nath, 2001).

“Se asume que, la información que se comparte entre los miembros de una cadena de suministro es veraz, a menos que cada miembro de la cadena verifique la autenticidad de la información que comparta otro miembro, sea fabricante y/o vendedor, y se determine que la información divulgada es parcial o totalmente falsa para el beneficio propio del miembro que la divulgó. Esta distorsión en la información puede reducir el nivel o puede parar en definitivo el intercambio de información entre los miembros de la cadena de suministro, así como aumentar el efecto látigo en la cadena de suministro”. (Mishra, Raghunathan y Yue, 2007).

2.3.4 Estructura proceso genérico de colaboración. De acuerdo a Standler (2008) y Kilger (2002), al establecerse entre los miembros de la cadena de suministro la relación de colaboración, se inicia un proceso que comúnmente debe

pasar por las siguientes etapas de forma sucesiva (ver Figura 2):

Etapa 1. Definición

Etapa 2. Planificación en el Dominio Local

Etapa 3. Plan de Intercambio

Etapa 4. Negociación y Manejo de Excepciones

Etapa 5. Ejecución

Etapa 6. Medida del Desempeño

Figura 2. Proceso genérico de colaboración



Fuente: Standler (2008) y Kilger (2002).

Etapa 1. Definición: establece de manera formal un acuerdo de trabajo conjunto que defina la ruta a seguir. En la definición de una colaboración se debe tener en cuenta la participación de cada socio, así como sus beneficios, los productos o servicios en colaboración, el horizonte de planificación y los mecanismos de resolución de conflictos.

Etapa 2. Planificación en el dominio local: sirve como base para la comunicación

con los demás miembros de la cadena de suministro. A partir de presunciones inciertas de información, restricciones del proceso, condiciones supuestas del entorno, a las que se les puede asignar diferentes valores, pueden generar para cada caso un plan distinto, aún con la misma función objetivo.

Etapa 3. Plan de Intercambio: en esta etapa, cada miembro de la colaboración intenta aumentar la calidad de su plan a través del intercambio de información, relevante, exacta, completa y confidencial. Se entiende que la información compartida entre los socios de la cadena es verás. El intercambio de información es considerado como un punto neurálgico (Chopra y Meindl, 2007),

Etapa 4. Gestión de excepciones: se requiere de un escenario común de planificación en el que se midan las metas comunes a través de indicadores. El análisis de las desviaciones permite identificar los focos de acción para establecer planes de mejora a futuro. Las desviaciones pueden ser provocadas por decisiones tomadas a nivel local, que ocasionan un desacople de los planes y que una vez son detectados, debe llevarse a cabo un proceso de negociación que corrija y restablezca la sincronización.

Fase 5. Ejecución: una vez los planes están alineados, se procede a su ejecución a partir de órdenes de aprovisionamiento, producción y compras que apuntan al logro de las metas trazadas.

Fase 6. Medida del desempeño: se deberán medir los resultados alcanzados y estos serán aceptables si la relación entre los socios es ganar-ganar. Sin embargo, en el caso de que uno de los miembros de la cadena pierda y éste acuerde “perder” para ganancia global de la cadena, se puede acordar un desembolso compensatorio.

2.3.5 Otras consideraciones en la planificación de la cadena de suministro colaborativa. Los programas de planificación de cadena de suministro tienen

como característica principal el enfoque en la demanda de los clientes, en vez de entregar los productos al mercado con la incertidumbre de que estos se vendan o no de manera rápida. Dicha fijación estipula la fabricación de productos que los clientes requieren, lo cual minimiza la utilización de materias primas, componentes, productos terminados, recursos financieros e información en cada etapa de elaboración del producto.

La planificación en colaboración contempla términos como “Collaborative planning, forecasting and replenishment, enfocada en la mejora de las relaciones entre cada integrante de la cadena a través de la gestión conjunta de procesos de planificación y del intercambio de información y busca disminuir el nivel de inventario a lo largo de la cadena; y collaborative development chain management, y se centra en el desarrollo de productos en conjunto a través de sistemas basados en tecnología web”. (Ribas y Companys, 2007, pp. 91-121).

2.4 VISIÓN JERÁRQUICA EN LA VISTA DECISIONAL DE LA PLANIFICACIÓN EN LA CADENA DE SUMINISTRO COLABORATIVA

La visión decisional tiene como fin estructurar el proceso de toma de decisiones en cada una de los eslabones de la cadena de suministro ya que es difícil, recopilar, consolidar y direccionar la información que se encuentra a lo largo de la cadena.

La planificación jerárquica, nace como una alternativa poderosa para enfrentar el problema de gestión de cadena de suministro. Está basada en una estructura de desagregación-agregación de los productos y de los recursos, con diferentes niveles jerárquicos correlacionados, en el que cada nivel tiene mayor horizonte que el siguiente y constituye para este una reducción del intervalo de variación del objeto. (Schneeweiss, 1995, 1998 y 2002; Stadler, 2005; Stadler y Kilger, 2002, 2008a, 2008b; Burton y Obel, 1980, 1984, 1988, 1989 y 1995).

Así mismo, algunos autores como Shapiro (1998); Chopra y Meindl, (2001); Van Landeghem y Vanmaele, (2002). Rohde, Meyr y Wagner (2000), Fleischmann et al. (2005) y Stadtler (2008) coinciden en que la planificación de la cadena de suministro se da en tres niveles: estratégico, táctico y operativo y de acuerdo al tiempo que contemplan y a la importancia de las decisiones, clasifican las tareas de planificación en largo, medio y corto plazo.

En la misma línea, Rohde et al. (2000); identifican algunas tareas de planificación importantes y las clasifican en dos dimensiones, el horizonte de planificación y el proceso de la cadena de suministro formando así la matriz conocida como la Matriz de Planificación de la Cadena de Suministro.

2.5 METODOLOGÍAS DE MODELADO EN LA PLANIFICACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO COLABORATIVA EN EL CONTEXTO DE INCERTIDUMBRE

La planificación de la cadena de suministro tiene como objetivo integrar cada una de las actividades de una organización de manera conjunta a todos los niveles internos y externos con los distintos miembros de la cadena alineando los procesos con las metas de la compañía.

En la planificación de operaciones de la cadena de suministro se tienen en cuenta una alta cantidad de variables de mucha complejidad para la toma de decisiones en busca de la maximización de las ganancias; y para ello se utilizan modelos matemáticos que permitan analizar dichas variables y dar solución a los problemas de tipo logístico, fabricación, almacenamiento, transporte y distribución.

2.5.1 Clasificación de los modelos para la planificación jerárquica en la cadena de suministro colaborativa. Las cadenas de suministro involucran muchas organizaciones, que se dedican a planificar y coordinar sus capacidades,

con el objetivo de satisfacer las necesidades del mercado a través de modelos que les permita manipular todas las variables que hacen parte de los eslabones de la cadena.

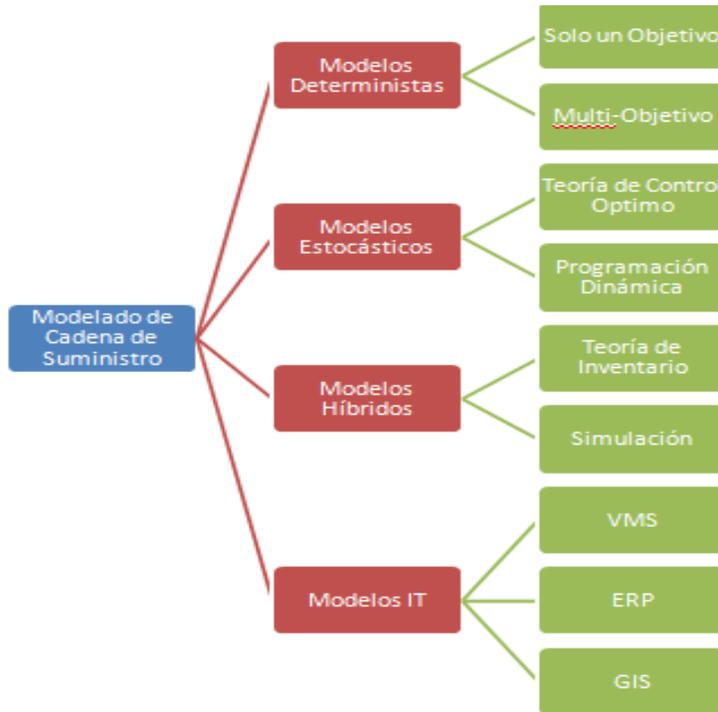
Ribas y Companys (2007, pp. 91-121) aseguran que “el modelo es una representación de la realidad y no la realidad misma con lo que factores como la aleatoriedad existente en el entorno real, quedarán difícilmente reflejados”.

Sin embargo, dado que la planificación de la cadena de suministro es un proceso complejo, algunos autores han clasificado los métodos de modelado. Beamon (1999) clasificó en cuatro categorías modelos analíticos deterministas, modelos analíticos estocásticos, modelos económicos y modelos de simulación.

En los modelos deterministas se supone que todas las variables son conocidas y pueden establecerse con certeza y están compuestos por uno o varios objetivos (Solo un objetivo-multi-objetivo), mientras que los modelos estocásticos tienen al menos una variable no conocida que presenta una distribución de probabilidad particular y pueden ser subclasificados en teoría de control óptima y modelos de programación dinámica (Beamon, 1999).

Dos categorías de modelado de una cadena de suministro son añadidas por Min y Zhou (2002), un modelo híbrido y los modelos IT. Los modelos híbridos poseen características de los modelos deterministas, así como de los modelos estocásticos. Estos modelos incluyen la teoría del inventario y los modelos de simulación (ver Figura 3).

Figura 3. Modelos de cadena de suministro



Fuente: Min y Zhou (2002).

Otra de las divisiones es otorgada por Lario y Vicens (2006), el cual divide los modelos en conceptuales, analíticos y los basados en inteligencia artificial. A través de los modelos conceptuales se busca un enfoque orientado a los procesos, dentro de estos se encuentran la matriz SCP y el modelo SCOR.

- **Matriz SCP (supply chain management and advanced planning).** Matriz desarrollada por Fleischmann, Meyr y Wagner (2002), y establece las actuaciones de las empresas en tres niveles de tiempo, el corto, mediano y largo plazo.
- **Modelo SCOR (Supply Chain Operations Reference model).** Modelo desarrollado por Supply-Chain Council (1996), como una herramienta para permitir identificar las oportunidades de mejora de una cadena de suministro y a la vez medir el desempeño de las mismas. El modelo procura integrar las actividades de la cadena de suministro con las actividades de mejores prácticas.

Los modelos basados en inteligencia artificial en los que se encuentran la teoría de los conjuntos difusos, programación estocástica y sistemas multi agente.

- **Teoría de Conjuntos difusos.** Se denomina conjunto difuso, al conjunto que no tiene límite definido, es decir, la transición entre la pertenencia y no pertenencia de una variable a un conjunto es gradual; las funciones de pertenencia dan flexibilidad a la modelación utilizando expresiones lingüísticas. Esta teoría surge debido a la necesidad de solucionar problemas en donde las ni las matemáticas ni la lógica son suficientes para ello.

Este es un sistema en que diferentes unidades inteligentes interactúan para desarrollar y alcanzar los objetivos o realizar diferentes tareas. Estos son utilizados para abordar problemas con múltiples métodos de resolución, perspectivas y/o entidades solucionadoras; teniendo como fin la solución de problemas de manera distribuida y concurrente. (Delgado, Cortés, Muñuzuri y Onieva, 2009).

Esta teoría fue introducida por Zadeh (1965) para procesar los datos con incertidumbre no probabilística y representar matemáticamente la incertidumbre, donde el rango de valores de pertenencia de un elemento pueda variar en un intervalo (0,1) en vez de limitarse a un solo valor.

La teoría de conjuntos difusos tiene una serie de aplicaciones en diferentes áreas y a algoritmos, como métodos de agrupación y programación matemática, entre las que se encuentran agrupación difusa (fuzzy clustering), programación lineal difusa (fuzzy linear programming) y programación dinámica difusa (Zimmermann, 1996).

Es así como la lógica difusa puede ser utilizada cuando algunas etapas del sistema son desconocidas y con factibilidad de error al medirse, en procesos o sistemas complejos y de difícil solución, cuando una variable pueda intervenir negativamente

en otras, en definitiva, cuando haya incertidumbre.

- **Modelos estocásticos.** Los inicios en cuanto al estudio de los procesos estocásticos tienen como punto de partida las observaciones de Brown (1828), quien a través del estudio de los granos de polen en suspensión mucosa, determinó que existía un movimiento continuo y caótico en todas las direcciones, denominándose este desplazamiento errático como el movimiento Browniano; el estudio cuantitativo de este movimiento fue desarrollado por Einstein y Smolukhowski y la fundamentación matemática por Wiener.

Este es un algoritmo matemático que funciona principalmente al azar y la evolución de sus procesos es aleatoria donde los resultados originados están dados en probabilidades que cambian a lo largo del tiempo a diferencia de los modelos no estocásticos.

El término estocástico nace del griego *stokhastes* que significa adivino o que está ligado al azar y se puede definir como el proceso en el que, a cada instante, existe una probabilidad de ocurrencia de cada uno de los estados en los que se puede encontrar el sistema; esta probabilidad depende de los estados alcanzados anteriormente.

Estos modelos presentan al menos una variable que se desconoce y se asume que sigue una distribución de probabilidad particular; son modelos más realistas; sin embargo, son más difíciles de resolver y se reducen a una versión determinista. Es por ello que la programación estocástica permite combinar la programación lineal y los parámetros aleatorios, donde se puede utilizar distribuciones de probabilidades para los parámetros inciertos (Mula, Poler y Lario, 2002). Este tipo de programación trata problemas de programación matemática donde algunos de los parámetros son aleatorios, los datos no son totalmente conocidos y se puede determinar la distribución de probabilidad.

- **Modelos multi-agente.** Este es un sistema en que diferentes unidades inteligentes interactúan para desarrollar y alcanzar los objetivos o realizar diferentes tareas. Estos son utilizados para abordar problemas con múltiples métodos de resolución, perspectivas y/o entidades solucionadoras; teniendo como fin la solución de problemas de manera distribuida y concurrente (Delgado et. al, 2009).

Este sistema se ha desarrollado en el ámbito de la inteligencia artificial y estudia cómo el comportamiento de un grupo que nace de la cooperación de agentes (sistemas, entornos, etc), centrándose en el comportamiento individual del cual se deriva el comportamiento de todo el sistema; se encuentra compuesto de dos o más agentes que se comunican, teniendo como características su autonomía ya que actúa sin intervención externa y tiene un grado de control sobre sus actividades; capacidades sociales ya que interactúa con otros agentes a través de un lenguaje de comunicación definido; reactividad y proactividad, debido a que es capaz de tomar la iniciativa en ciertos procesos de acuerdo a los objetivos planteados. (Wooldridge, 2002).

Igualmente se destaca entre sus funcionalidades el uso de heurísticas para la toma de decisiones, diferentes criterios de evaluación, gran variedad de comportamientos dinámicos y disponibilidad de múltiples estrategias y tácticas elegibles dependiendo de la situación en particular. (Delgado et. al, 2009).

- **Programación dinámica.** Enfoque de modelación, análisis y resolución de problemas de decisión dinámicos; a través de la descomposición de sub-problemas dependientes o solapados entre ellos, dándole solución, resolviendo cada sub-problema una sola vez.

Muchos problemas de programación matemática determinan soluciones que repercuten en la formulación de los problemas a resolver en el próximo periodo o

etapa. Una alternativa es construir un único modelo completo que tenga un gran conjunto de variables indexadas por etapas e internalizar las relaciones entre etapas como una restricción del problema.

Sin embargo, esto puede agrandar mucho el tamaño del problema. Surge así Programación Dinámica (PD) como una alternativa de descomposición en que resolvemos subproblemas más pequeños y luego los ligamos. Así programación dinámica consiste en solucionar el presente suponiendo que en cada etapa futura siempre se tomaran las decisiones correctas.

Dentro de los modelos utilizados basados en la programación dinámica se encuentran, Forecast horizons, optimización dinámica para la planificación de la producción bajo demanda estocástica; y planificación y programación dinámica de la producción basado en el concepto de entradas y salidas de Leontief (1966).

Así mismo, para la determinación de estos modelos se tienen en cuenta la estrategia en línea y la mixta, la primera enfocada en las reglas de despacho, donde no se crean programas de producción de forma anticipada y las decisiones se toman de manera local y la segunda basada en planes que se van ajustando de acuerdo a como van surgiendo las situaciones, esta tiene como base la estrategia predictiva-reactiva y de donde surgen dos mejoras al modelo, la programación robusta y la programación basada en el conocimiento.

2.5.2 Tipos de modelos en la gestión de cadena de suministro para planificación de la cadena de suministro colaborativa. El modelo básico en un contexto de incertidumbre es el problema del Vendedor de periódicos, en un entorno de demanda aleatoria presentado por Arrow, Harris y Marschak (1951), y Morse y Kimball (1951), en el que si un Vendedor compra una gran cantidad de periódicos y no los vende o se devalúa en el tiempo pierde dinero, en cambio, si compra poca cantidad de producto pierde posibles compradores.

La situación pone de manifiesto el riesgo que tiene el vendedor de periódicos, pero, el modelo permite establecer las diferentes formas de amortiguar los riesgos si estos son compartidos entre los miembros de la cadena de suministro.

Lariviere (1999), sugiere la manera en la que se puede dar una coordinación entre el vendedor y los socios de la cadena planteando la posibilidad de que el vendedor pueda devolver al proveedor, y por medio de una estructura flexible de cantidades. En la misma línea Thompson y Davis (1990) y Thompson, Watanabe, y Davis (1993) abordan la incertidumbre, pero, en la planificación de la producción agregada desde un punto de vista integral. Plantean un modelo de programación lineal en donde la incertidumbre es incluida utilizando simulación de Monte Carlo.

Así mismo, los experimentos de Monte Carlo fueron testeados por Wu y Meixell (1998) quienes analizaron en el sector del automóvil y en el de la electrónica el comportamiento de la demanda en la gestión de la cadena de suministro de dos empresas. Concluyeron que, para ambos casos, la demanda fluye por la cadena por medio de programas de producción que se envían por medio electrónico a los proveedores directos, causando cambios permanentes.

Por otro lado, Escudero et al. (1999), a través de programa lineal multiproducto, multiperiodo y multinivel desarrolla una metodología de modelado para el mejoramiento de un problema de planificación desde la fabricación, ensamble y distribución bajo incertidumbre en la demanda del producto, en el tiempo de entrega y en el costo de aprovisionamiento de los componentes. Determinan que el modelo tiene dimensiones que no es práctico desarrollarlo sin un enfoque de descomposición.

A su vez, García y Smith (2000) presentan en el contexto de problemas de optimización dinámica para la planificación de la producción bajo demanda estocástica. La idea se basa en la aparición de horizontes de previsión tan amplios

que garantizan las decisiones de producción óptimas del primer periodo sin tener en cuenta modificaciones en la demanda futura (Bès y Sethi, 1987).

Adicionalmente, Hong y Shang (2001) trabajan en un ambiente de fabricación de hierro y acero un modelo para la planificación y programación dinámica de la producción, basados en el concepto de entradas-salidas de Leontif (1996). El modelo es útil para la gestión de redes de cadenas de suministro descentralizadas o centralizadas, sin embargo, cuando los socios de la red de fabricación cumplen un papel de proveedor y consumidor al mismo tiempo, se obtienen mayores beneficios del modelo.

Por su parte, un modelo de planificación de la producción-distribución multi-producto, multi-etapa, y multiperiodo es implementado por Chen y Lee (2004) para maximizar el beneficio de cada uno de los socios de la cadena de suministro, maximizar el nivel de servicio al cliente, así como el nivel de seguridad, garantizando una distribución justa de los beneficios para cada eslabón de la cadena. El modelo es formulado como un problema multi-objetivo de programación no lineal entera mixta y a través de teoría de conjuntos difusos dan solución al mismo.

Un modelo de optimización estocástica de dos etapas es planteado por Coronado-Hernández, García-Sabater y Maheut (2010) para la planificación de cadenas de suministros para productos con ciclo de vida corto, mediante la decisión de guardar la capacidad de contratar los recursos de los proveedores hasta tanto se tenga la seguridad del comportamiento de la demanda. Consideran recursos alternativos, múltiples productos con lista de materiales complejas, demanda distribuida a lo largo de periodos consecutivos, ciclos de vida cortos, lead time largos y altos niveles de incertidumbre representados en forma de escenarios.

Mena, Lario y Vicens (2009) trabajan en planificación colaborativa en contexto de incertidumbre presentando una metodología de desarrollo de modelo de

planificación y estructurando los fundamentos de un modelo matemático con incertidumbre.

Dávila (2012) presenta un modelo matemático para la optimización de una cadena de suministro global con consideraciones de cupos de compra y periodos de pago, formulado como un problema de modelación dinámica determinística y de programación lineal. El modelo representa una cadena de suministro para una locación fabril nacional y proveedores de suministros internacionales.

Comúnmente en los procesos de modelación de cadenas de abastecimiento no se han considerado los cupos de compra ni los periodos de pago como restricciones dentro del sistema, ni las restricciones de capacidad en volumen y peso de los medios de unitarización de carga; pero estas son condiciones reales en los procesos de negociación y restringen sustancialmente el sistema.

Se establece una aplicación del modelo a un caso real de la industria nacional con una mezcla de veinticuatro tipos de materias primas, con cuatro proveedores internacionales, cada proveedor con unos cupos de créditos y periodos de pago preestablecidos en negociaciones.

De igual modo, Gamboa y Tabares (2012) en su proyecto de investigación utilizan modelación matemática, y en concreto un modelo de programación lineal en donde se tienen en cuenta los elementos y aspectos que conforman la cadena de abastecimiento de tipo regional, con el que se busca resolver un problema de producción y logística para lograr la operación de la red de distribución y la producción a un costo mínimo.

El modelo incluye la optimización de la cadena mediante la asignación de cantidades de productos distribuidos para cada distrito de la red, mientras se satisface un conjunto de restricciones que incluye: capacidad de las plantas, y de

los centros de distribución, satisfacción de valores de demanda por producto y por distrito, balance de flujo de materiales en plantas, balance de flujo de producto en centros de distribución, y condición de no negatividad sobre las variables de decisión.

2.5.3 Modelos seleccionados y sus aportes. Chen y Lee (2004) plantean una cadena de suministro que incluye plantas, centros de distribución, almacenistas y minoristas. Presentan un modelo de planificación de la producción-distribución multi-producto, multi-etapa, y multi-periodo el cual maximiza los beneficios, el nivel de servicios y el nivel de inventario. La solución es realizada a través de teoría de conjuntos difusos y formulan in problema multi-objetivo de programación no lineal entera mixta.

Mena et al. (2009), construye un modelo matemático determinista y un modelo matemático con incertidumbre, los cuales compara analizando los resultados. El objetivo es minimizar los costos del plan agregado de la cadena de suministro. A partir de una metodología de redes neuronales artificiales incluye los costos y parámetros con incertidumbre en la resolución del problema.

Y finalmente, el autor utiliza para esta investigación y que corresponde a una extensión de los modelos desarrollados por Mena (2010), quien presenta una propuesta metodológica que incluye dos modelos (determinista y de incertidumbre), aplicado a una empresa del sector cerámico, comparando entre sí la maximización del margen de beneficios. La incertidumbre se aborda con redes neuronales artificiales.

2.6 METODOLOGÍAS DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA PARA LA CADENA DE SUMINISTRO

“La programación dinámica es un enfoque para la modelación, análisis y resolución

de problemas de decisión dinámicos tanto en entornos deterministas como estocásticos. La principal diferencia entre programación dinámica y estocástica está en la estructura utilizada para formular ambos modelos. En programación dinámica los conceptos de “estado del proceso” y “función valor” juegan un rol central, mientras que estos conceptos no son utilizados en programación estocástica” (Kleywegt y Shapiro, 2000, pp. 120-128).

En el escenario de planificación de la producción bajo demanda estocástica de problemas de optimización dinámica, García y Smith (2000) presentan los horizontes de planificación. Estos horizontes son tan amplios que garantizan la integralidad de las decisiones óptimas de producción del primer período sin tener en cuenta los cambios en la demanda futura.

Por su parte Hong y Shang (2001) presentan en el contexto de fabricación de hierro y acero, un modelo para la planificación y programación dinámica de la producción basado en entradas-salidas de Leontif (1966). El modelo es ideal para la gestión de cadenas de suministro descentralizadas o centralizadas.

Todos los autores coinciden en que programación dinámica parte de encontrar la solución en el estado actual suponiendo que las decisiones tomadas en el futuro serán las correctas.

En la programación dinámica se busca un valor óptimo máximo o mínimo a partir de una solución general y cada solución tiene asociado un valor. Esta estructura original tiene una subestructura óptima en donde a través de la integralidad de las soluciones a los sub-problemas se obtiene la solución. Para iniciar la construcción del algoritmo en programación dinámica, se debe caracterizar la estructura y definición de una solución óptima, luego computar por bottom-up la solución. La estrategia bottom-up establece qué se debe resolver inicialmente, los sub-problemas pequeños y almacenar su solución, después resolver los más complejos,

usando los resultados almacenados.

Las diferentes situaciones que puedan ser abordadas por la programación dinámica se determinan procesos polietápicos de decisión, ya que el problema puede dividirse en etapas y en cada una de ellas puede tomarse una decisión diferente, presentan características como que se divide en etapas, se toman decisiones en cada una de las etapas, cada etapa tiene un número de estados asociados.

Se tendrá la solución óptima cuando se tenga la decisión óptima para cualquier situación que se presente, el sistema evoluciona una vez tomada la decisión, la decisión óptima de cada etapa depende del estado actual, la decisión tomada en una etapa determina el estado de la etapa siguiente, y la política óptima (de un estado S de la etapa K a la etapa final está constituida por una decisión que transforma S en un estado S_0 de la etapa $K + 1$ y por la política óptima desde el estado S_0 hasta la etapa final).

Esto se obtiene a través de un proceso o diseño de algoritmo donde implique la definición del valor de una solución óptima (buscar la mejor solución entre varias posibles soluciones) y caracterizar la estructura de la solución óptima. En este sentido el problema cumple el principio de optimalidad de Bellman que establece que dada una secuencia óptima de decisiones, toda sub-secuencia de ella es, a su vez, óptima; en este sentido el problema debe cumplir que la solución al problema se debe alcanzar a través de una secuencia de decisiones y que esta secuencia ha de cumplir el principio de optimalidad.

Matemáticamente la programación dinámica se define como:

$$\begin{aligned} & \text{Min/Max } (x_1, u_1, x_2, u_2, \dots, x_t, u_t, \dots, x_T, u_T,) \\ & \text{Sujeto a: } x_t = g(x_{t-1}, u_t), t = 1, T \\ & u_t \in \Gamma(x_{t-1}) \forall t = 1, T \end{aligned}$$

$$x_t \in \Omega_t \forall t = 1, T$$

$$u_t \in \theta_t \forall t = 1, T$$

Donde:

x_t : Vector de las variables de estado.

u_t : Vector de las variables de control.

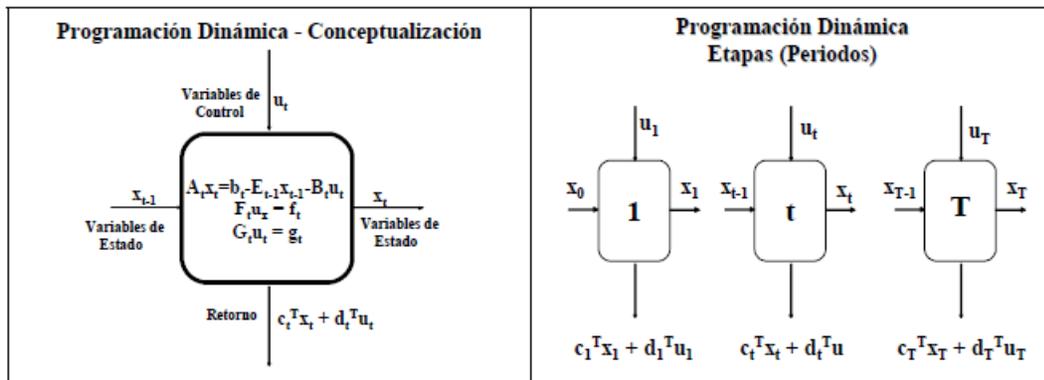
Ω_t y θ_t : Los espacios de existencia para dichas variables

$g_t(y_t, u_t)$ Función que describe la evolución de las variables.

T : El número de etapas secuenciales de decisión.

El principio de optimalidad de Bellman establece que la llegada a un estado específico x_t , en cualquier etapa t , no depende de las decisiones anteriores. Las decisiones faltantes hasta la a etapa final T , representadas por $(u_t, u_{t+1}, \dots, u_T)$, deben considerarse como una política óptima desde t hasta T (ver Figura 4).

Figura 4. Conceptualización y etapas de la programación dinámica



Fuente: Bellman (1957).

3. PROPUESTA DE MODELADO

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta una propuesta de modelado para la planificación maestra de operaciones en la gestión de la cadena de suministros en el contexto de incertidumbre. El interés de esta investigación se basa en la necesidad de disponer de un esquema metodológico que permita el logro de ventajas competitivas en las organizaciones a partir de la forma como se configuran las cadenas de suministro.

Por consiguiente la propuesta metodológica inicia con una propuesta de modelado, luego con la definición del problema, siguiendo con el modelo decisional y colaborativo de la cadena de suministro para la formulación de un modelo matemático de programación dinámica para un sistema de planificación en cadenas de suministro colaborativa que luego es representado en otro modelo matemático con incertidumbre y finalmente se establece la arquitectura de la plataforma tecnológica para la solución del modelo matemático en programación dinámica.

3.2 METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología se compone de una propuesta de modelado, la situación del problema, un modelo matemático de programación dinámica y su representación de la incertidumbre a través de escenarios asociados a probabilidades, la aplicación del modelo a una empresa concreta y herramienta de resolución. Caso práctico.

Con base en los planteamientos identificados anteriormente, se establecen los fundamentos para la elaboración de un modelo matemático que permita solucionar el problema de planificación, enfocados en los modelos para la planificación de la cadena de suministro colaborativa y seleccionando aquel que esté acorde a las necesidades. Se hace necesario validar dicho modelo a partir de la aplicación del

mismo a un caso práctico y a partir de los resultados obtenidos evaluar el comportamiento de dicho modelo para entregar conclusiones e identificar líneas futuras de investigación.

3.3 MODELADO DEL FUNCIONAMIENTO, OPERACIONES Y ESTRUCTURA FÍSICA DE UNA CADENA DE SUMINISTRO: UN ENFOQUE DE INCERTIDUMBRE

En una cadena de suministro típica, las materias primas y los productos terminados, son suministrados y producidos en una o más fábricas, enviados a almacenes para su almacenamiento intermedio y posterior cargue a los detallistas o clientes. Luego, para disminuir los costos y optimizar los niveles de servicio deben tener en cuenta las múltiples relaciones que se dan en todos los niveles de la cadena de suministro.

Se habla entonces de que la cadena integra procesos de suministro, transformación, almacenamiento y distribución de materiales y productos terminados desde el proveedor hasta el usuario final dividiendo los procesos de la cadena de abastecimiento en dos grupos básicos; primero la planeación de la producción, la administración de las políticas y control de inventarios de materiales, productos en proceso y productos terminados; y segundo la distribución, los procesos logísticos, que implican cómo los productos son transportados de los almacenes a los minoristas y la administración de los recursos de distribución.

La relación entre estos procesos puede llegar a ser de gran complejidad, pues en cada uno se pueden generar escenarios distintos, por lo que el buen diseño de la cadena de abastecimiento cobra gran importancia en el logro de su correcto desempeño.

Por lo anterior, se propone un modelo matemático, cuyo objetivo es maximizar el margen de beneficios de todos los eslabones de la cadena de suministro.

Este capítulo presenta la propuesta de modelado haciendo referencia al modelo decisional y colaborativo de la cadena de suministro para formular un modelo matemático de un sistema de producción de la cadena de suministro colaborativa.

3.4 MODELO DECISIONAL Y COLABORATIVO DE LA CADENA DE SUMINISTRO

En la cadena de suministro, es difícil recopilar la información y transmitirla a las diferentes etapas, por ello surge la planificación jerárquica basada en una estructura de desagregación-agregación con diferentes niveles jerárquicos.

Lario y Vicens (2006) establecen para la toma de decisiones en la cadena de suministro, dos jerarquías verticales (táctica-operativa) en las que el nivel operativo recibe instrucciones del nivel táctico. En este sistema se debe considerar en qué campo de toma de decisiones se encuentra centralizado o descentralizado (es decir si hay uno o varios decisores). Una vez se da una instrucción al nivel operativo, se retroalimenta la relación operativa-táctica, siempre y cuando el nivel operativo reaccione sobre las instrucciones recibidas.

Es importante la relación de planificación de operaciones que hay entre el nivel táctico y el nivel operativo, la cual es a corto y medio plazo para cada etapa de la cadena de suministro. En este proyecto de investigación se tienen en cuenta los niveles a medio y corto plazo.

Al mismo tiempo Burton y Obel. (1995), Scheneeweiss et. al. (2002) y Stadler y Kilger (2008b) consideran que para el modelo decisional se deben establecer:

- La cantidad de etapas de la cadena de suministros que se considerarán en el modelo.
- Los niveles jerárquicos de la cadena de suministro (estratégico, táctico y

operativo) en que se quiere trabajar.

- El escenario de cadena de suministro centralizado o descentralizado.
- Establecer la cantidad de decisores que participarán en el proceso de toma de decisiones.

Esta investigación tiene en cuenta dos niveles jerárquicos (táctico y operativo) en los que se genera una continua retroalimentación de un nivel a otro a lo largo de las etapas de la cadena: proveedores, plantas de producción, centros de distribución y detallistas.

3.5 MODELO MATEMÁTICO DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA PARA UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN EN CADENAS DE SUMINISTRO COLABORATIVAS

3.5.1 Definición del problema. El problema específico objeto de estudio se concentra en el análisis sobre una cadena de suministro que desarrolla sus actividades entre las diferentes etapas de proveedor, planta de fabricación, centros de distribución, detallistas y clientes.

- **Proveedores** de materias primas. Se ubican los proveedores que suministran materias primas, ítem o componentes a las plantas de producción.
- **Plantas de Producción.** Se encuentran las plantas productivas.
- **Centros de Distribución** de productos terminado.
- **Detallistas** de productos terminados.
- **Clientes** de productos terminados.

Ahora bien, las decisiones consideradas en el modelo abarcan los siguientes aspectos de la planificación maestra de la producción en contexto colaborativo, así como los supuestos para su formulación el propósito de beneficiar a todos los miembros de la cadena de suministro.

Supuestos y Decisiones

Proveedores de materia prima.

- Se considera la presencia de múltiples proveedores.
- Jornada laboral de 8 horas.
- Lead time de los proveedores es determinístico e instantáneo.
- Los proveedores almacenan materia prima.
- Demanda del proveedor es estocástica.
- α fracción ($0 < \alpha < 1$) de defectuosos en el proveedor.
- Cantidad a comprar y transportar de cada materia prima desde cada proveedor a cada planta productiva en cada periodo.
- Nivel de inventario de cada materia prima en cada planta productiva al final de cada periodo.
- Compras efectuadas de cada materia prima, componente o ítem a cada proveedor durante cada periodo.
- Se consideran tres escenarios para la representación del modelo bajo incertidumbre, escenario alto, medio y bajo.

Producción (fabricación en las plantas productivas).

- Se considera la presencia de Múltiples Plantas productivas.
- Jornada laboral de 8 horas.
- Lead time de las plantas productivas es determinístico e instantáneo.
- β fracción ($0 \leq \beta \leq 1$) de defectuosos en la planta productiva.
- La concepción de defectos es menor que genera condición de no rechazo, para así entrar en una negociación.
- Los defectuosos que son detectados por la planta son comprados al proveedor a un menor precio.
- Se decide que producto final se produce en cada línea de fabricación en cada planta en cada periodo.
- Cantidad a fabricar de cada producto final en cada planta en cada periodo.

- Ventas efectuadas de cada producto final de cada planta a cada centro de distribución durante cada periodo.
- Se decide qué cambios de partida de productos finales se realizan en cada línea de fabricación de cada planta en cada periodo.
- Se consideran tres escenarios para la representación del modelo bajo incertidumbre, escenario alto, medio y bajo.

Distribución.

- Se considera la presencia de múltiples distribuidores.
- Jornada laboral de 8 horas.
- Lead time de los distribuidores es determinístico e instantáneo.
- Los defectuosos que son detectados por el distribuidor son comprados a la planta a un menor precio.
- Los defectuosos que son detectados por el distribuidor son comprados a la planta a un menor precio, sometidos a un pequeño proceso de recuperación y vendidos como productos en buen estado.
- Cantidad a transportar de cada producto final desde cada planta productiva a cada almacén durante cada periodo.
- Nivel de inventario de cada producto final en cada almacén al final de cada periodo.
- Ventas efectuadas de cada producto final en cada almacén a cada cliente durante cada periodo.
- Se consideran tres escenarios para la representación del modelo bajo incertidumbre, escenario alto, medio y bajo.

Detallistas.

- Se considera la presencia de múltiples detallistas
- Jornada laboral de 8 horas.
- Lead time de los detallistas es determinístico e instantáneo.
- Cantidad a transportar de cada producto final desde cada centro de distribución

a cada detallista durante cada periodo.

- Nivel de inventario de cada producto final en cada detallista al final de cada periodo.
- Ventas efectuadas de cada producto final en cada detallista durante cada periodo.
- Se consideran tres escenarios para la representación del modelo bajo incertidumbre, escenario alto, medio y bajo.

3.5.2 Parámetros del modelo. Para desarrollar el modelo de planificación de la cadena de suministro se consideran como parámetros o datos de entrada del modelo los siguientes:

- Datos de fabricación, en periodo regular y con horas extras.
- Datos de Transporte, como tiempos y capacidad de transporte.
- Datos de inventario, como capacidad de inventario, inventario faltante.
- Parámetros de costo.

3.5.3 Outputs del modelo.

- Plan de transporte entre cada etapa de la cadena de suministro
- Plan de compras de cada proveedor.
- Plan de producción de cada planta.
- Plan de transporte de planta-centro de distribución, centro de distribución-detallista.
- Cantidad de ventas.
- Nivel de inventario
- Todos los costos totales.

3.5.4 Objetivo del modelo. El objetivo es maximizar el margen de los beneficios de todos los eslabones de la cadena de suministro (ingresos-costes).

3.5.5 Nomenclatura. Ésta se puede observar en las Tablas 1 a 8 a continuación.

Tabla 1. Nomenclaturas índices

Nomenclatura	Detalle	Nomenclatura	Detalle
$s \in S$	Proveedores	$d \in D$	Centros de Distribución
$m \in M$	Materias Primas	$r \in R$	Detallistas
$j \in J$	Productos	$c \in C$	Cientes
$p \in P$	Plantas	$e \in E$	Escenarios
$q \in Q$	Recursos de Producción	$t \in T$	Periodos

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Nomenclatura conjuntos

Nomenclatura	Detalle	Nomenclatura	Detalle
S_m	Conjunto de Proveedores s que suministran la Materia Prima, Componente o Ítem m .	R_d	Conjunto de Detallistas r que reciben los productos finales de los Centro de Distribución d .
S_p	Conjunto de Proveedores s que suministran a la Planta p .	C_r	Conjunto de Clientes c que reciben los productos finales de los Detallistas r .
Q_p	Conjunto de Recursos de Producción q que hacen parte del conjunto de Plantas p .	J_q	Conjunto de Productos Finales j que pueden fabricarse en el recurso de fabricación q .
D_p	Conjunto de Centro de Distribución d que reciben los productos finales de las Plantas p .	J_m	Conjunto de Productos Finales j que utilizan la Materia Prima, Componente o Ítem m .

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Nomenclatura datos del proveedor

Nomenclatura	Detalle	Nomenclatura	Detalle
$PUCMS_{s,m,t}$	Precio Unitario de compra de Materia Prima, Componente o Ítem m en el Proveedor s en el periodo t . \$/Ton.	$CUDEFS_{s,m}$	Costo por Unidad de desechar defectuoso de Materia Prima, Componente o Ítem m en el Proveedor s .

Nomenclatura	Detalle	Nomenclatura	Detalle
			\$/Ton.
$PUMSP_{s,p,m}$	Precio Unitario de la Materia Prima, Componente o Ítem m en el Proveedor s para la Planta p. \$/Ton.	$NISinc_{s,m}$	Nivel de Inventario Inicial de Materia Prima Componente o Ítem m en el Proveedor s. Ton.
$PUMDEFSP_{s,p,m}$	Precio Unitario de la Materia Prima, Componente o Ítem defectuoso m en el Proveedor s para la Planta p. \$/Ton.	$NCTSP_{s,p,m}$	Nivel de Capacidad de Transporte para la Materia Prima, Componente o Ítem m desde el Proveedor s a la Planta p. Ton.
$CFTSP_{s,p,m}$	Costo Fijo de Transporte de la Materia Prima, Componente o Ítem m desde el Proveedor s a la Planta p. \$/Ton.	$CMIS_s$	Capacidad Máxima de Inventarios en el Proveedor s. Ton.
$CUFMS_{s,m,t}$	Costo por Unidad de Fabricación de la Materia Prima, Componente o Ítem m en el Proveedor s en el periodo t. \$/Ton.	$CMAFS_{s,m}$	Capacidad Máxima de Fabricación en el Proveedor s. Ton.
$CUTSP_{s,p,m}$	Costo por Unidad de Transporte de la Materia Prima, Componente o Ítem m desde el Proveedor s a la Planta p. \$/Ton.	$\alpha_{s,m}$	Fracción de artículos defectuosos de Materia Prima, Componente o Ítem m en el Proveedor s.
$CUMS_{s,m}$	Costo por Unidad de Manipulación de la Materia Prima, Componente o Ítem m en el Proveedor s. \$/Ton.	$r_{S,m}$	Tasa de detección de artículos defectuosos de Materia Prima, Componente o Ítem m en el Proveedor s.
$CUIS^+_{s,m}$	Costo por Unidad de Inventario Sobrante de la Materia Prima, Componente o Ítem m en el Proveedor s. \$/Ton.	$TTSP_{s,p}$	Periodo de tiempo de Transporte desde el Proveedor s hasta la Planta p.
$CUIS^-_{s,m}$	Costo por Unidad de Inventario Faltante de la Materia Prima, Componente o Ítem m en el Proveedor s. \$/Ton.		

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Nomenclatura datos de planta

Nomenclatura	Detalle	Nomenclatura	Detalle
$PUPPD_{p,d,j}$	Precio Unitario del Producto j desde la Planta p hasta el Centro de Distribución d. \$/Saco.	$NIPinc_{p,j}$	Nivel de Inventario inicial de producto j en la Planta p. Saco.
$PUPDEFPD_{p,d,j}$	Precio Unitario del Producto j defectuoso desde la Planta p para el Centro de Distribución d. \$/Saco.	$NCTPD_{p,d,j}$	Nivel de Capacidad de Transporte desde la Planta p hasta el Centro de Distribución d para el producto j. Saco.
$CFCP_{p,q,j,t}$	Costo Fijo de Cambio de Partida de la Planta p sobre el Recurso de Producción q del producto j en el periodo t. \$/Saco.	$MCFPN_{p,q,t}$	Máxima Capacidad de fabricación utilizando tiempo regular en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo de tiempo t. Saco.
$CUFPN_{p,q,j,t}$	Costo por Unidad de Fabricación del producto j utilizando tiempo regular en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo t. \$/Saco.	$MCFPEX_{p,q,t}$	Máxima Capacidad de fabricación utilizando tiempo extra en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo de tiempo t. Saco.
$CUFPEX_{p,q,j,t}$	Costo por Unidad de Fabricación del producto j utilizando tiempo Extra en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo t. \$/Saco.	$CMETP_p$	Capacidad Máxima de Entrada de Transporte en la Planta p. Ton.
$CUSUBP_{p,j}$	Costo por unidad del producto j subcontratada por la Planta p. \$/Saco.	$CMSTP_p$	Capacidad Máxima de Salida de Transporte en la Planta p. Saco.
$CFTPD_{p,d,j}$	Costo Fijo de Transporte para el producto j desde la Planta p hasta el Centro de Distribución d. \$/Saco.	$CMIP_p$	Capacidad Máxima de Inventario en la Planta p. Saco.

Nomenclatura	Detalle	Nomenclatura	Detalle
$CUTPD_{p,d,j}$	Costo por Unidad de Transporte del producto j desde la Planta p al Centro de Distribución d. \$/Saco.	$\beta_{p,j}$	Fracción ($0 < \beta < 1$) de defectuosos para el producto j en la Planta p.
$CFMP_{p,q,j,t}$	Costo Fijo de Manipulación (manejo de materiales) en la Planta p sobre el Recurso de Producción q para el producto j en el periodo t. \$/Saco.	$rp_{p,j}$	Tasa de detección de Producto j defectuoso en la Planta p.
$CUMP_{p,j}$	Costo por Unidad de Manipulación del producto j en la Planta p. \$/Saco.	$rp_{p,m}$	Tasa de detección de artículos defectuosos de Materia Prima, Componente o Ítem m detectado en la Planta p.
$CUIP_{p,j}^+$	Costo por Unidad de Inventario Sobrante del producto j en la Planta p. \$/Saco.	$MA_{m,j}$	Unidad de Unidad de Materia Prima, Componente o Ítem m necesarias para la fabricación del Producto j. Saco.
$CUIP_{p,j}^-$	Costo por Unidad de Inventario Faltante del producto j en la Planta p. \$/Saco.	$PQSP_{p,j}$	Porcentaje para definir la Cantidad a Subcontratar a partir de la cantidad a Fabricar del Producto j en la Planta p.
$CUDEFP_{p,j}$	Costo por Unidad de desechar defectuoso de producto j en la Planta p. \$/Saco.	$TTPD_{p,d}$	Periodo de tiempo de Transporte desde la Planta p hasta el Centro de Distribución d.
		$YY_{p,q,j,t}$	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Nomenclatura datos centro de distribución y detallista

Nomenclatura	Detalle	Nomenclatura	Detalle
$PUPDR_{d,r,j}$	Precio Unitario del Producto j desde el Centro de	$PUPRC_{r,c,j}$	Precio Unitario del Producto j desde el Detallista r al Cliente

Nomenclatura	Detalle	Nomenclatura	Detalle
	Distribución d al Detallista r. \$/Saco.		c. \$/Saco.
$CFTDR_{d,r,j}$	Costo Fijo de Transporte del producto j desde el Centro de Distribución d al Detallista r. \$/Saco.	$CUMR_{r,j}$	Costo por Unidad de Manipulación del producto j en el Detallista r. \$/Saco.
$CUTDR_{d,r,j}$	Costo por Unidad de Transporte de productos j desde el Centro de Distribución d al Detallista r. \$/Saco.	$CUIR_{r,j}^+$	Costo por Unidad de Inventario Sobrante del producto j en el Detallista r. \$/Saco.
$CUMD_{d,j}$	Costo por Unidad de Manipulación del producto j en el Centro de Distribución d. \$/Saco.	$CUIR_{r,j}^-$	Costo por Unidad de Inventario Faltante del producto j en el Detallista r. \$/Saco.
$CUID_{d,j}^+$	Costo por Unidad de Inventario Sobrante del producto j en el Centro de Distribución d. \$/Saco.	$NIRinc_{r,j}$	Nivel de Inventario inicial de producto j en el Detallista r. Saco.
$CUID_{d,j}^-$	Costo por Unidad de Inventario Faltante del producto j en el Centro de Distribución d. \$/Saco.	$CMIR_r$	Capacidad Máxima de Inventario en el Detallista r. Saco.
$CUDEFD_{d,j}$	Costo por Unidad de desechar defectuoso de producto j en el Centro de Distribución d. \$/Saco.	$CMSTR_r$	Capacidad Máxima de Salida de Transporte en el Detallista r. Este dato es para la restricción de Capacidad Máxima para la cantidad Total de Transporte desde el Detallista r al cliente c). Saco.
$NIDinc_{d,j}$	Nivel de Inventario inicial de producto j en el Centro de Distribución d. Saco.	$rd_{d,j}$	Tasa de detección de Producto j defectuoso en la el Centro de Distribución d.
$NCTDR_{d,r,j}$	Nivel de Capacidad de Transporte para el producto j desde el Centro de Distribución d hasta el Detallista r. Saco.	$TTDR_{d,r}$	Periodo de tiempo de Transporte desde el Centro de Distribución d hasta el Detallista r.
$CMID_d$	Capacidad Máxima de Inventario en el Centro de Distribución d. Saco.	$DEMC_{c,j,t}$	Demanda del cliente c del producto j en el periodo t. Saco.

Nomenclatura	Detalle	Nomenclatura	Detalle
$CMSTD_d$	Capacidad Máxima de Salida de Transporte en el Centro de Distribución d. (Este dato es para la restricción de Capacidad Máxima para la cantidad Total de Transporte desde el Centro de Distribución d al Detallista r). Saco.	$DEMCE_{c,j,e,t}$	Demanda del cliente c del producto j en el escenario e en el periodo t. Saco.
		pr_e	Probabilidad de escenarios

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Nomenclatura variables continuas

Nomenclatura	Detalle	Nomenclatura	Detalle
$NIS_{s,m,t}$	Nivel de Inventario de Materia Prima, Componente o Ítem m en el Proveedor s para el Periodo t. Ton.	$CTDEFS_{s,t}$	Costo Total de disponer defectuoso en el Proveedor s en el periodo t. \$/Ton
$NIS_{s,m,t}^+$	Nivel de Inventario sobrante de Materia Prima, Componente o Ítem m en el Proveedor s para el Periodo t. Ton.	$CTDEFP_{p,t}$	Costo Total de disponer defectuoso en la Planta p en el periodo t. \$/Saco
$NIS_{s,m,t}^-$	Nivel de Inventario faltante de Materia Prima, Componente o Ítem m en el Proveedor s para el Periodo t. Ton.	$CTDEFD_{d,t}$	Costo Total de disponer defectuoso en el Centro de Distribución d en el periodo t. \$/Saco
$NIP_{p,j,t}$	Nivel de Inventario de producto j en la Planta p para el Periodo t. Saco.	$CTTS_{s,t}$	Costo Total de Transporte del Proveedor s en el periodo t. \$/Ton
$NIP_{p,j,t}^+$	Nivel de Inventario sobrante de producto j en la Planta p para el Periodo t. Saco.	$CTTP_{p,t}$	Costo Total de Transporte de la Planta p en t. \$/Saco
$NIP_{p,j,t}^-$	Nivel de Inventario faltante de producto j en la Planta p para el Periodo t. Saco.	$CTTD_{d,t}$	Costo Total de Transporte del Centro de Distribución d en t. \$/Saco
$NID_{d,j,t}$	Nivel de Inventario de	$QS_{s,m,t}$	Cantidad de Materia Prima,

Nomenclatura	Detalle	Nomenclatura	Detalle
	producto j en el Centro de Distribución d para el Periodo t. Saco.		Componente o Ítem m a comprar por el Proveedor s en el periodo t. Ton.
$NID_{d,j,t}^+$	Nivel de Inventario sobrante de producto j en el Centro de Distribución d para el Periodo t. Saco.	$QP_{p,j,t}$	Cantidad a producir del producto j en la Planta p en el periodo t. Saco.
$NID_{d,j,t}^-$	Nivel de Inventario faltante de producto j en el Centro de Distribución d para el Periodo t. Saco.	$QPP_{p,q,j,t}$	Cantidad a producir del producto j en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo t. Saco.
$NIR_{r,j,t}$	Nivel de Inventario de producto j en el Detallista r en el Periodo t. Saco.	$QPPN_{p,q,j,t}$	Cantidad a producir del producto j en tiempo Normal en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo t. Saco.
$NIR_{r,j,t}^+$	Nivel de Inventario sobrante de producto j en el Detallista r en el Periodo t. Saco.	$QPPEX_{p,q,j,t}$	Cantidad a producir del producto j en tiempo Extra en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo t. Saco.
$NIR_{r,j,t}^-$	Nivel de Inventario faltante de producto j en el Detallista r en el Periodo t. Saco.	$QSUBP_{p,j,t}$	Cantidad a Subcontratar del producto j en la Planta p en el periodo t. Saco.
$CTIS_{s,t}^+$	Costo total del inventario sobrante del Proveedor s en el Periodo t. \$/Ton.	$QTSP_{s,p,m,t}$	Materia Prima, Componente o Ítem a transportar desde el Proveedor s a la Planta p en el periodo t. Ton.
$CTIP_{p,t}^+$	Costo Total del Inventario sobrante de la Planta p en el Periodo t. \$/Saco.	$QTPD_{p,d,j,t}$	Cantidad de producto j a transportar desde la Planta p al Centro de Distribución d en el periodo t. Saco.
$CTID_{d,t}^+$	Costo Total del Inventario sobrante del Centro de Distribución d en el Periodo t. \$/Saco.	$QTDR_{d,r,j,t}$	Cantidad de producto j a transportar desde el Centro de Distribución d al Detallista r en el periodo t. Saco.
$CTIR_{r,t}^+$	Costo Total del Inventario sobrante del Detallista r en el Periodo t. \$/Saco.	$QTRC_{r,c,j,t}$	Cantidad de producto j a transportar desde el Detallista r al Cliente c en el

Nomenclatura	Detalle	Nomenclatura	Detalle
			periodo t. Saco.
$CTIS_{s,t}^-$	Costo total del inventario faltante del Proveedor s en el Periodo t. \$/Ton.	$QTTSP_{s,p,t}$	Cantidad de transporte Total desde el Proveedor s a la Planta p en el periodo t. Saco.
$CTIP_{p,t}^-$	Costo Total del Inventario faltante de la Planta p en el Periodo t. \$/Saco.	$QTTDP_{p,d,t}$	Cantidad de transporte Total desde la Planta p al Centro de Distribución d en el periodo t. Saco.
$CTID_{d,t}^-$	Costo Total del Inventario faltante del Centro de Distribución d en el Periodo t. \$/Saco.	$QTTDR_{d,r,t}$	Cantidad de transporte Total desde el Centro de Distribución d al Detallista r en el periodo t. Saco.
$CTIR_{r,t}^-$	Costo Total del Inventario faltante del Detallista r en el Periodo t. \$/Saco.	$QTTRC_{r,c,t}$	Cantidad de transporte Total desde el Detallista r al Cliente c en el periodo t. Saco.
$CTMS_{s,t}$	Costo Total de Manipulación en el Proveedor s en el periodo t. \$/Ton.	$VPS_{s,t}$	Ventas en el Proveedor s en el periodo t. \$
$CTMP_{p,t}$	Costo Total de Manipulación en la Planta p en el periodo t. \$/Saco.	$VPP_{p,t}$	Ventas en la Planta p en el periodo t. \$
$CTMD_{d,t}$	Costo total de Manipulación en el Centro de Distribución d en el periodo t. \$/Saco	$VPD_{d,t}$	Ventas en el Centro de Distribución d en el periodo t. \$
$CTMR_{r,t}$	Costo total de Manipulación en el Detallista r en el periodo t. \$/Saco	$VPR_{r,t}$	Ventas en el Detallista r en el periodo t. \$
$CTFP_{p,t}$	Costo total de fabricación en la Planta p en el periodo t. \$/Ton.	$VPDEFS_{s,t}$	Ventas de defectuosos en el Proveedor s en el periodo t. \$
$CTSUBP_{p,t}$	Costo total de Subcontratación en la Planta p en el periodo t. \$/Saco	$VPDEFP_{p,t}$	Ventas de defectuosos en la Planta p en el periodo t. \$
$CTCS_{s,t}$	Costo total de compras en el Proveedor s en el periodo t. \$/Ton.	BS_s	Beneficios esperados en el Proveedor s en el periodo t. \$
$CTCP_{p,t}$	Costo total de compras en la Planta p en el periodo t. \$/Ton	BP_p	Beneficios esperados en la Planta p en el periodo t. \$
$CTCD_{d,t}$	Costo total de compras en el	BD_d	Beneficios esperados en el

Nomenclatura	Detalle	Nomenclatura	Detalle
	Centro de Distribución d en el periodo t. \$/Saco		Centro de Distribución d en el periodo t. \$
$CTCR_{r,t}$	Costo total de compras en el Detallista r en el periodo t. \$/Saco	BR_r	Beneficios esperados en el Detallista r en el periodo t. \$
		BT	Beneficios esperados de toda la cadena de suministro. \$

Fuente: elaboración propia.

Para la representación del modelo bajo incertidumbre, se incluirán las variables semejantes a las anteriores, con un subíndice adicional correspondiente al escenario.

Tabla 7. Nomenclatura variables continuas en escenario

Nomenclatura	Detalle	Nomenclatura	Detalle
$NIS_{s,m,t,e}$	Nivel de Inventario de Materia Prima, Componente o Ítem m en el Proveedor s para el Periodo t en el escenario e. Ton.	$CTDEFS_{s,t,e}$	Costo Total de disponer defectuoso en el Proveedor s en el periodo t en el escenario e. \$/Ton
$NIS_{s,m,t,e}^+$	Nivel de Inventario sobrante de Materia Prima, Componente o Ítem m en el Proveedor s para el Periodo t en el escenario e. Ton.	$CTDEFP_{p,t,e}$	Costo Total de disponer defectuoso en la Planta p en el periodo t en el escenario e. \$/Saco
$NIS_{s,m,t,e}^-$	Nivel de Inventario faltante de Materia Prima, Componente o Ítem m en el Proveedor s para el Periodo t en el escenario e. Ton	$CTDEFD_{d,t,e}$	Costo Total de disponer defectuoso en el Centro de Distribución d en el periodo t en el escenario e. \$/Saco
$NIP_{p,j,t,e}$	Nivel de Inventario de producto j en la Planta p para el Periodo t en el escenario e. Saco.	$CTTS_{s,t,e}$	Costo Total de Transporte del Proveedor s en el periodo t escenario e. \$/Ton
$NIP_{p,j,t,e}^+$	Nivel de Inventario sobrante de producto j en la Planta p para el Periodo t en el escenario e. Saco.	$CTTP_{p,t,e}$	Costo Total de Transporte de la Planta p en t en el escenario e. \$/Saco

Nomenclatura	Detalle	Nomenclatura	Detalle
$NIP_{p,j,t,e}^-$	Nivel de Inventario faltante de producto j en la Planta p para el Periodo t en el escenario e. Saco.	$CTTD_{d,t,e}$	Costo Total de Transporte del Centro de Distribución d en t en el escenario e. \$/Saco
$NID_{d,j,t,e}$	Nivel de Inventario de producto j en el Centro de Distribución d para el Periodo t en el escenario e. Saco.	$QS_{s,m,t,e}$	Cantidad de Materia Prima, Componente o Ítem m a comprar por el Proveedor s en el periodo t en el escenario e. Ton.
$NID_{d,j,t,e}^+$	Nivel de Inventario sobrante de producto j en el Centro de Distribución d para el Periodo t en el escenario e. Saco.	$QP_{p,j,t,e}$	Cantidad a producir del producto j en la Planta p en el periodo t en el escenario e. Saco.
$NID_{d,j,t,e}^-$	Nivel de Inventario faltante de producto j en el Centro de Distribución d para el Periodo t en el escenario e. Saco.	$QPP_{p,q,j,t,e}$	Cantidad a producir del producto j en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo t en el escenario e. Saco.
$NIR_{r,j,t,e}$	Nivel de Inventario de producto j en el Detallista r en el Periodo t en el escenario e. Saco.	$QPPN_{p,q,j,t,e}$	Cantidad a producir del producto j en tiempo Normal en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo t en el escenario e. Saco.
$NIR_{r,j,t,e}^+$	Nivel de Inventario sobrante de producto j en el Detallista r en el Periodo t en el escenario e. Saco.	$QPPEX_{p,q,j,t,e}$	Cantidad a producir del producto j en tiempo Extra en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo t en el escenario e. Saco.
$NIR_{r,j,t,e}^-$	Nivel de Inventario faltante de producto j en el Detallista r en el Periodo t en el escenario e. Saco.	$QSUBP_{p,j,t,e}$	Cantidad a Subcontratar del producto j en la Planta p en el periodo t en el escenario e. Saco.
$CTIS_{s,t,e}^+$	Costo total del inventario sobrante del Proveedor s en el Periodo t en el escenario e. \$/Ton.	$QTSP_{s,p,m,t,e}$	Materia Prima, Componente o Ítem a transportar desde el Proveedor s a la Planta p en el periodo t en el escenario e. Ton.

Nomenclatura	Detalle	Nomenclatura	Detalle
$CTIP_{p,t,e}^+$	Costo Total del Inventario sobrante de la Planta p en el Periodo t en el escenario e. \$/Saco.	$QTPD_{p,d,j,t,e}$	Cantidad de producto j a transportar desde la Planta p al Centro de Distribución d en el periodo t en el escenario e. Saco.
$CTID_{d,t,e}^+$	Costo Total del Inventario sobrante del Centro de Distribución d en el Periodo t en el escenario e. \$/Saco.	$QTDR_{d,r,j,t,e}$	Cantidad de producto j a transportar desde el Centro de Distribución d al Detallista r en el periodo t en el escenario e. Saco.
$CTIR_{r,t,e}^+$	Costo Total del Inventario sobrante del Detallista r en el Periodo t en el escenario e. \$/Saco.	$QTRC_{r,c,j,t,e}$	Cantidad de producto j a transportar desde el Detallista r al Cliente c en el periodo t en el escenario e. Saco.
$CTIS_{s,t,e}^-$	Costo total del inventario faltante del Proveedor s en el Periodo t en el escenario e. \$/Ton.	$QTTSP_{s,p,t,e}$	Cantidad de transporte Total desde el Proveedor s a la Planta p en el periodo t en el escenario e. Saco.
$CTIP_{p,t,e}^-$	Costo Total del Inventario faltante de la Planta p en el Periodo t en el escenario e. \$/Saco.	$QTTPD_{p,d,t,e}$	Cantidad de transporte Total desde la Planta p al Centro de Distribución d en el periodo t. Saco.
$CTID_{d,t,e}^-$	Costo Total del Inventario faltante del Centro de Distribución d en el Periodo t en el escenario e. \$/Saco.	$QTDDR_{d,r,t,e}$	Cantidad de transporte Total desde el Centro de Distribución d al Detallista r en el periodo t en el escenario e. Saco.
$CTIR_{r,t,e}^-$	Costo Total del Inventario faltante del Detallista r en el Periodo t en el escenario e. \$/Saco.	$QTTRC_{r,c,t,e}$	Cantidad de transporte Total desde el Detallista r al Cliente c en el periodo t. Saco.
$CTMS_{s,t,e}$	Costo Total de Manipulación en el Proveedor s en el periodo t en el escenario e. \$/Ton.	$VPS_{s,t,e}$	Ventas en el Proveedor s en el periodo t en el escenario e. \$
$CTMP_{p,t,e}$	Costo Total de Manipulación en la Planta p en el periodo t. \$/Saco.	$VPP_{p,t,e}$	Ventas en la Planta p en el periodo t en el escenario e. \$
$CTMD_{d,t}$	Costo total de Manipulación en el Centro de Distribución d en el periodo t en el	$VPD_{d,t,e}$	Ventas en el Centro de Distribución d en el periodo t en el escenario e. \$

Nomenclatura	Detalle	Nomenclatura	Detalle
	escenario e. \$/Saco.		
$CTMR_{r,t,e}$	Costo total de Manipulación en el Detallista r en el periodo t en el escenario e. \$/Saco.	$VPR_{r,t,e}$	Ventas en el Detallista r en el periodo t en el escenario e. \$
$CTFP_{p,t,e}$	Costo total de fabricación en la Planta p en el periodo t en el escenario e. \$/Saco.	$VPDEFS_{s,t,e}$	Ventas de defectuosos en el Proveedor s en el periodo t en el escenario e. \$
$CTSUBP_{p,t,e}$	Costo total de Subcontratación en la Planta p en el periodo t en el escenario e. \$/Saco	$VPDEFPP_{p,t,e}$	Ventas de defectuosos en la Planta p en el periodo t en el escenario e. \$
$CTCS_{s,t,e}$	Costo total de compras en el Proveedor s en el periodo t en el escenario e. \$/Ton.	$BS_{s,e}$	Beneficios esperados en el Proveedor s en el periodo t en el escenario e. \$
$CTCP_{p,t,e}$	Costo total de compras en la Planta p en el periodo t en el escenario e. \$/Ton.	$BP_{p,e}$	Beneficios esperados en la Planta p en el periodo t en el escenario e. \$
$CTCD_{d,t,e}$	Costo total de compras en el Centro de Distribución d en el periodo t en el escenario e. \$/Saco.	$BD_{d,e}$	Beneficios esperados en el Centro de Distribución d en el periodo t en el escenario e. \$
$CTCR_{r,t,e}$	Costo total de compras en el Detallista r en el periodo t en el escenario e. \$/Saco.	$BR_{r,e}$	Beneficios esperados en el Detallista r en el periodo t en el escenario e. \$
		$BTESP$	Beneficios totales esperados de toda la cadena de suministro. \$
		BT_e	Beneficios en el escenario de toda la cadena de suministro en el escenario e. \$

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Nomenclatura variables binarias

Nom.	Detalle	Nom.	Detalle
$XSP_{s,p,m,t}$	Variable que toma el valor de 1 si $CFTSP_{spm} > 0$ y 0 para los demás casos (Nivel de Capacidad de Transporte desde el Proveedor s a la Planta p de la Materia Prima,	$Y_{p,q,j,t}$	Variable que toma el valor de 1 si $CFMP_{pqj} > 0$ y 0 para los demás casos. Tiempo de Preparación en la Planta p sobre el Recurso de Producción q para el

	Componente o Item m en el periodo t).		producto j en el periodo t.
$XPD_{p,d,j,t}$	Variable que toma el valor de 1 si $CFTPD_{pdj} > 0$ y 0 para los demás casos (Nivel de Capacidad de Transporte desde la Planta p al Centro de Distribución d para el producto j en el periodo t).	$W_{p,q,j,t}$	Variable que toma el valor de 1 si $CFCP_{pqj} > 0$ y 0 para los demás casos (Cambio de partida en la Planta p sobre el Recurso de Producción q del producto j).
$XDR_{d,r,j,t}$	Variable que toma el valor de 1 si $CFTDR_{drj} > 0$ y 0 para los demás casos (Nivel de Capacidad de Transporte desde Centro de Distribución d a Detallista r del producto j en el periodo de tiempo t).		

Fuente: elaboración propia.

3.5.6 Formulación del modelo matemático de programación dinámica para un sistema de planificación en cadenas de suministro colaborativa.

3.5.6.1 Función objetivo.

$$BT = \sum_{s \in S} BS_s + \sum_{p \in P} BP_p + \sum_{d \in D} BD_d + \sum_{r \in R} BD_r \quad (1)$$

$$BS_s = \sum_{t \in T} [VPS_{s,t} + VPDEFS_{s,t} - CTCS_{s,t} - CTTS_{s,t} - CTIS_{s,t}^+ - CTIS_{s,t}^- - CTMS_{s,t} - CTDEFS_{s,t}] \quad \forall s \quad (2)$$

$$BP_p = \sum_{t \in T} [VPP_{p,t} + VPDEFP_{p,t} - CTCP_{p,t} - CTFP_{p,t} - CTPP_{p,t} - CTIP_{p,t}^+ - CTIP_{p,t}^- - CTMP_{p,t} - CTDEFP_{p,t} - CTSUBP_{p,t}] \quad \forall p \quad (3)$$

$$BD_d = \sum_{t \in T} [VPD_{d,t} - CTCD_{d,t} - CTTD_{d,t} - CTID_{d,t}^+ - CTID_{d,t}^- - CTMD_{d,t} - CTDEFD_{d,t}] \forall d \quad (4)$$

$$BR_r = \sum_{t \in T} [VPR_{r,t} - CTCR_{r,t} - CTIR_{r,t}^+ - CTIR_{r,t}^- - CTMR_{r,t}] \forall r \quad (5)$$

3.5.6.2 Formulación de Costos e Ingresos

- **Costo total de fabricación en cada planta del producto j**

La ecuación 6 es la suma de la Cantidad de Producción en Jornada Normal y Jornada Extra.

$$QPP_{p,q,j,t} = QPPN_{p,q,j,t} + QPPEX_{p,q,j,t} \quad (6)$$

La ecuación 7 es el cálculo del costo total de Fabricación como la suma de: costo fijo de fabricación de cambio de partida, costo fijo de ociosidad (manipulación de materiales) costo de fabricación en jornada normal y costo fijo de fabricación en jornada extra.

$$CTFP_{p,t} = \sum_{q \in Q} \sum_{j \in J} [CFCP_{p,q,j,t} \gamma_{p,q,j,t} + CFMP_{p,q,j,t} + CUFPN_{p,q,j,t} QPPN_{p,q,j,t} + CUFPEX_{p,q,j,t} QPPEX_{p,q,j,t}] \forall p, t \quad (7)$$

- **Costo total de subcontratación**

La ecuación 8 es el cálculo del costo total de Subcontratación obtenido por el costo por unidad subcontratada.

$$CTSUBP_{p,t} = \sum_{j \in J} [CUSUBP_{p,j} QSUBP_{p,j,t}] \quad \forall p, t \quad (8)$$

▪ **Costo total de manipulación**

Las ecuaciones 9, 10, 11 y 12 representan los costos de manipulación (manejo de materiales de la recepción y despacho de transporte) para cada etapa de la Cadena de Suministro.

$$CTMS_{s,t} = \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} CUMS_{s,m} * QTSP_{s,p,m,t} \quad \forall s, t \quad (9)$$

$$CTMP_{s,p,t} = \sum_{j \in J} CUMP_{p,j} \left(\sum_{m \in M} \left(MA_{m,j} * \sum_{q \in Q_p} QPP_{p,q,j,t} - TTSP_{s,p} \right) + \sum_{d \in D} QTPD_{p,d,j,t} \right) \quad \forall s, p, t \quad (10)$$

$$CTMD_{d,t} = \sum_{j \in J} CUMD_{d,j} \left(\sum_{p \in P} QTPD_{p,d,j,t} - TTPD_{p,d} + \sum_{r \in R} QTDR_{d,r,j,t} \right) \quad \forall d, t \quad (11)$$

$$CTMR_{r,t} = \sum_{j \in J} CUMR_{r,j} \left(\sum_{d \in D} QTDR_{d,r,j,t} - TTDR_{d,r} + \sum_{c \in C} QTRC_{r,c,j,t} \right) \quad \forall r, t \quad (12)$$

▪ **Costo total de compras.** Las ecuaciones 13, 14, 15 y 16 corresponden al cálculo del costo total de compras obtenido por el producto de: precio de cada Materia Prima y/o producto en cada etapa y cantidad comprada del Proveedor y vendida de la Planta “p”, Centro de Distribución “d” y Detallista “r”.

$$CTCS_{s,t} = \sum_{m \in M} PUCMS_{s,m,t} * QS_{s,m,t} \quad \forall s, t$$

(13)

$$\begin{aligned}
CTCP_{p,t} &= \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} PUMSP_{s,p,m} (1 - rp_{p,m}) (1 - rs_{s,m}) QTSP_{s,p,m,t} \\
&+ \left(\sum_{s \in S} \sum_{m \in M} PUMDEFSP_{s,p,m} rp_{p,m} (1 - rs_{s,m}) QTSP_{s,p,m,t} \right) \forall p, t
\end{aligned}
\tag{14}$$

$$\begin{aligned}
CTCD_{d,t} &= \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} PUPPD_{p,d,j} (1 - rd_{d,j}) (1 - rp_{p,j}) QTPD_{p,d,j,t} \\
&+ \left(\sum_{p \in P} \sum_{j \in J} PUPDEFPD_{p,d,j} rd_{d,j} (1 - rp_{p,j}) QTPD_{p,d,j,t} \right) \forall d, t
\end{aligned}
\tag{15}$$

$$CTCR_{r,t} = \sum_{d \in D} \sum_{j \in J} PUPDR_{d,r,j} * QTDR_{d,r,j,t}, \forall r, t
\tag{16}$$

- **Costo total de inventario.** Las ecuaciones 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 y 24 corresponden al cálculo del costo total de inventario sobrante y faltante obtenido por el producto de: costo por unidad de inventario en cada etapa y nivel de inventario del Proveedor “s”, Planta “p”, Centro de Distribución “d” y Detallista “r”.

▪

$$CTIS_{s,t}^+ = \sum_{m \in M} (CUIS_{s,m}^+ NIS_{s,m,t}^+), \forall s, t
\tag{17}$$

$$CTIS_{s,t}^- = \sum_{m \in M} (CUIS_{s,m}^- NIS_{s,m,t}^-), \forall s, t
\tag{18}$$

$$CTIP_{p,t}^+ = \sum_{j \in J} (CUIP_{p,j}^+ NIP_{p,j,t}^+), \forall p, t
\tag{19}$$

$$CTIP_{p,t}^- = \sum_{j \in J} (CUIP_{p,j}^- NIP_{p,j,t}^-), \forall p, t
\tag{20}$$

$$CTID_{d,t}^+ = \sum_{j \in J} (CUID_{d,j}^+ NID_{d,j,t}^+), \forall d, t \quad (21)$$

$$CTID_{d,t}^- = \sum_{j \in J} (CUID_{d,j}^- NID_{d,j,t}^-), \forall d, t \quad (22)$$

$$CTIR_{r,t}^+ = \sum_{j \in J} (CUIR_{r,j}^+ NIR_{r,j,t}^+), \forall r, t \quad (23)$$

$$CTIR_{r,t}^- = \sum_{j \in J} (CUIR_{r,j}^- NIR_{r,j,t}^-), \forall r, t \quad (24)$$

- **Costo disposición de Inventario Defectuoso**

Las ecuaciones 25, 26 y 27 corresponden al cálculo del costo unitario de disponer inventario de producto defectuoso que considera la fracción de artículos defectuosos.

$$CTDEFS_{s,t} = CUDEFS_{s,m} \alpha_{s,m} Q_{S,m,t}, \forall s, t \quad (25)$$

$$CTDEFP_{p,t} = \sum_{j \in J} CUDEFP_{p,j} \beta_{p,j} Q_{P,p,j,t}, \forall p, t \quad (26)$$

$$CTDEFD_{d,t} = \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} CUDEFD_{d,j} r_{d,j} Q_{TPD_{p,d,j,t}}, \forall d, t \quad (27)$$

- **Costo total de transporte.** Las ecuaciones 28, 29, 30 corresponden al cálculo del costo de transporte que consideran costos fijos y unitarios del transporte de entrada como el de salida.

$$CTTS_{s,t} = \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} [CFTSP_{s,p,m} XSP_{s,p,m,t} + CUTSP_{s,p,m} * QTSP_{s,p,m,t}], \forall s, t \quad (28)$$

$$CTTP_{p,t} = \sum_{d \in D} \sum_{j \in J} [CFTPD_{p,d,j} XPD_{p,d,j,t} + CUTPD_{p,d,j} QTPD_{p,d,j,t}], \forall p, t \quad (29)$$

$$CTTD_{d,t} = \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} [CFTDR_{d,r,j} XDR_{d,r,j,t} + CUTDR_{d,r,j} QTDR_{d,r,j,t}], \forall d, t \quad (30)$$

- **Ingresos por venta de productos.** Las ecuaciones 31, 32, 33 y 34 calculan las ventas obtenidas por cada etapa de la Cadena de Suministro.

$$VPS_{s,t} = \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} PUMSP_{s,p,m} (1 - rp_{p,m})(1 - rs_{s,m})QTSP_{s,p,m,t}, \forall s, t \quad (31)$$

$$VPP_{p,t} = \sum_{d \in D} \sum_{q \in Q} \sum_{j \in J} PUPPD_{p,d,j} (1 - rd_{d,j})(1 - rp_{p,j})QTPD_{p,d,j,t}, \forall p, t \quad (32)$$

$$VPD_{d,t} = \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} PUPDR_{d,r,j} QTDR_{d,r,j,t}, \forall d, t \quad (33)$$

$$VPR_{r,t} = \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} PUPRC_{r,c,j} QTRC_{r,c,j,t}, \forall r, t \quad (34)$$

- **Ingresos por venta de productos defectuosos.** Las ecuaciones 35 y 36, calculan las ventas de productos defectuosos obtenidas para las etapas de Proveedor y Plantas.

$$VPDEFS_{s,t} = \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} PUMDEFSP_{s,p,m} [rp_{p,m}(1 - rs_{s,m})QTSP_{s,p,m,t}], \forall s, t \quad (35)$$

$$VPDEFPP_{p,t} = \sum_{d \in D} \sum_{q \in Q} \sum_{j \in J} PUPDEFPP_{p,d,j} r d_{d,j} (1 - r p_{p,j}) QTPD_{p,d,j,t}, \forall p, t \quad (36)$$

3.5.6.3 Restricciones de fabricación. La restricción 37 y 38 denotan la Máxima Capacidad en jornada normal y extra.

$$\sum_{j \in J} QPPN_{p,q,j,t} \leq MCFPN_{p,q,t} \quad \forall p, q, t \quad (37)$$

$$\sum_{j \in J} QPPEX_{p,q,j,t} \leq MCFPEX_{p,q,t} \quad \forall p, q, t \quad (38)$$

La restricción 39 especifica que la Planta de fabricación se prepara para la producción en un periodo dado.

$$\sum_{q \in Q} \sum_{j \in J_q} Y_{p,q,j,t} - Y_{p,q,j,t-1} = 1, \forall p, t \quad (39)$$

La restricción 40 asegura que la Planta realizará un cambio de fabricación de productos cuando la misma Planta en el periodo anterior no hay sido preparada para la fabricación de dicho producto.

$$W_{p,q,j,t} \geq Y_{p,q,j,t} - Y_{p,q,j,t-1}, \forall p, q, j, t \quad (40)$$

La restricción 41 especifica que la cantidad de subcontratación en cualquier periodo debe ser menor o igual que un porcentaje de la cantidad de producción normal.

$$QSUBP_{p,j,t} \leq PQSP_{p,j} QP_{p,j,t}, \forall p, j, t$$

(41)

3.5.6.4 Restricciones de transporte. Las restricciones 42, 43, 44, 45, 46 y 47 son las restricciones entre la cantidad transportada y el nivel de capacidad de transporte.

$$QTSP_{s,p,m,t} = \sum_{j \in J_m} \left(MA_{m,j} * \sum_{q \in Q_p} QPP_{p,q,j,t} \right) \quad \forall s, p, m, t \quad (42)$$

$$QTSP_{s,p,m,t} \leq NCTSP_{s,p,m} XSP_{s,p,m,t}, \quad \forall s, p, m, t \quad (43)$$

$$QTPD_{p,d,j,t} \leq NCTPD_{p,d,j} XPD_{p,d,j,t}, \quad \forall p, d, j, t \quad (44)$$

$$QTDR_{d,r,j,t} \leq NCTDR_{d,r,j} XDR_{d,r,j,t}, \quad \forall d, r, j, t \quad (45)$$

$$QTRC_{r,c,j,t} \leq DEMC_{c,j,t}, \quad \forall c, j, t \quad (46)$$

$$XSP_{s,p,m,t} \leq 1, \quad XPD_{p,d,j,t} \leq 1, \quad XDR_{d,r,j,t} \leq 1, \quad \forall s, p, m, j, t \quad (47)$$

Las restricciones 48, 49, 50 y 51 especifican las cantidades totales transportadas para cada producto j en un periodo de tiempo t desde los Proveedores hasta las Plantas, de Plantas a Centro de Distribución, de Centro de Distribución a Detallistas y de Detallistas a Clientes.

$$QTTSP_{s,p,t} = \sum_{m \in M} QTSP_{s,p,m,t} \quad \forall s, p, t \quad (48)$$

$$QTPD_{p,d,t} = \sum_{j \in J} QTPD_{p,d,j,t}, \quad \forall p, d, t \quad (49)$$

$$QTTDR_{d,r,t} = \sum_{j \in J} QTDR_{d,r,j,t}, \forall d, r, t \quad (50)$$

$$QTTRC_{r,c,t} = \sum_{j \in J} QTRC_{r,c,j,t}, \forall r, c, t \quad (51)$$

La restricción 52 especifica la Capacidad Máxima de Transporte de Entrada a la Planta p desde el Proveedor s . Las restricciones 53 y 54 indican la Capacidad Máxima de Transporte de salida desde la Planta al Centro de Distribución y desde el Centro de Distribución al Detallista; y finalmente la restricción 55 denota la Capacidad Máxima de Transporte de salida desde el Detallista hasta el cliente.

$$\sum_{s \in S_p} QTTSP_{s,p,t} \leq CMETP_p, \forall p, t \quad (52)$$

$$\sum_{d \in D_p} QTTPD_{p,d,t} \leq CMSTP_p, \forall p, t \quad (53)$$

$$\sum_{r \in R_d} QTTDR_{d,r,t} \leq CMSTD_d, \forall d, t \quad (54)$$

$$\sum_{c \in C_r} QTTRC_{r,c,t} \leq CMSTR_r, \forall r, t \quad (55)$$

3.5.6.5 Restricciones de inventario. Las restricciones 56, 57, 58 y 59 corresponden al balance del inventario en cada una de las etapas de la cadena de suministro.

$$NIS_{s,m,t} = NIS_{s,m,t-1} + (1 - \alpha_{s,m})QS_{s,m,t} - \sum_{p \in P} QTSP_{s,p,m,t}, \forall s, m, t \quad (56)$$

$$NIP_{p,j,t} = NIP_{p,j,t-1}(1 - \beta_{p,j})QP_{p,j,t}QSUBP_{p,j,t} - \sum_{d \in D} QTPD_{p,d,j,t}, \forall p, j, t \quad (57)$$

$$NID_{d,j,t} = NID_{d,j,t-1} + \sum_{p \in P} QTPD_{p,d,j,t-TdT_{p,d}} - \sum_{r \in R} QTDR_{d,r,j,t}, \forall d, j, t \quad (58)$$

$$NIR_{r,j,t} = NIR_{r,j,t-1} + \sum_{d \in D} QTDR_{d,r,j,t-TdT_{d,r}} - \sum_{c \in C} QTRC_{r,c,j,t} \forall r, j, t \quad (59)$$

Las restricciones 60, 61, 62 y 63, es la capacidad máxima de inventario en cada una de las etapas de la cadena. Las restricciones 64, 65, 66 y 67, denotan el nivel de inventario total como la diferencia entre el inventario sobrante y el inventario faltante para cada una de las etapas de la cadena de suministro.

$$\sum_{m \in M} NIS_{s,m,t} \leq CMIS_s \forall s, t \quad (60)$$

$$\sum_{j \in J} NIP_{p,j,t} \leq CMIP_p \forall p, t \quad (61)$$

$$\sum_{j \in J} NID_{d,j,t} \leq CMID_d \forall d, t \quad (62)$$

$$\sum_{j \in J} NIR_{r,j,t} \leq CMIR_r \forall r, t \quad (63)$$

$$NIS_{s,m,t} = NIS_{s,m,t}^+ - NIS_{s,m,t}^- \quad (64)$$

$$NIP_{p,j,t} = NIP_{p,j,t}^+ - NIP_{p,j,t}^- \quad (65)$$

$$NID_{d,j,t} = NID_{d,j,t}^+ - NID_{d,j,t}^- \quad (66)$$

$$NIR_{r,j,t} = NIR_{r,j,t}^+ - NIR_{r,j,t}^-$$

(67)

3.5.7 Formulación del modelo matemático de programación dinámica bajo incertidumbre para un sistema de planificación en cadenas de suministro colaborativa.

3.5.7.1 Función objetivo Beneficio Esperado.

$$BTESP = \sum_{e \in E} PR_e * BT_e$$

(68)

$$BT_e = \sum_{s \in S} BS_{s,e} + \sum_{p \in P} BP_{p,e} + \sum_{d \in D} BD_{d,e} + \sum_{r \in R} BR_{r,e}$$

(69)

$$BS_{s,e} = \sum_{t \in T} [VPS_{s,t,e} + VPDEFS_{s,t,e} - CTCS_{s,t,e} - CTTS_{s,t,e} - CTIS_{s,t,e}^+ - CTIS_{s,t,e}^- - CTMS_{s,t,e} - CTDEFS_{s,t,e}] \quad \forall s, e$$

(70)

$$BP_{p,e} = \sum_{t \in T} [VPP_{p,t,e} + VPDEFP_{p,t,e} - CTCP_{p,t,e} - CTFP_{p,t,e} - CTPP_{p,t,e} - CTIP_{p,t,e}^+ - CTIP_{p,t,e}^- - CTMP_{p,t,e} - CTDEFP_{p,t,e} - CTSUBP_{p,t,e}] \quad \forall p, e$$

(71)

$$BD_{d,e} = \sum_{t \in T} [VPD_{d,t,e} - CTCD_{d,t,e} - CTTD_{d,t,e} - CTID_{d,t,e}^+ - CTID_{d,t,e}^- - CTMD_{d,t,e} - CTDEFD_{d,t,e}] \quad \forall d, e$$

(72)

$$BR_{r,e} = \sum_{t \in T} [VPR_{r,t,e} - CTCR_{r,t,e} - CTIR_{r,t,e}^+ - CTIR_{r,t,e}^- - CTMR_{r,t,e}] \quad \forall r, e$$

(73)

3.5.7.2 Formulación de Costos e Ingresos

- **Costo total de fabricación en cada planta del producto j**

$$QPP_{p,q,j,t,e} = QPPN_{p,q,j,t,e} + QPPEX_{p,q,j,t,e} \quad (74)$$

$$CTFP_{p,t,e} = \sum_{q \in Q} \sum_{j \in J} [CFCP_{p,q,j,t} \gamma_{p,q,j,t} + CFMP_{p,q,j,t} + CUFPN_{p,q,j,t} QPPN_{p,q,j,t,e} + CUFPEX_{p,q,j,t} QPPEX_{p,q,j,t,e}] \quad \forall p, t \quad (75)$$

- **Costo total de subcontratación**

$$CTSUBP_{p,t,e} = \sum_{j \in J} [CUSUBP_{p,j} QSUBP_{p,j,t,e}] \quad \forall p, t, e \quad (76)$$

- **Costo total de manipulación**

$$CTMS_{s,t,e} = \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} CUMS_{s,m} * QTSP_{s,p,m,t,e} \quad \forall s, t, e \quad (77)$$

$$CTMP_{s,p,t,e} = \sum_{j \in J} CUMP_{p,j} \left(\sum_{m \in M} \left(MA_{m,j} * \sum_{q \in Q_p} QPP_{p,q,j,t-TTSP_{s,p,e}} \right) + \sum_{d \in D} QTPD_{p,d,j,t,e} \right) \quad \forall s, p, t, e \quad (78)$$

$$CTMD_{d,t,e} = \sum_{j \in J} CUMD_{d,j} \left(\sum_{p \in P} QTPD_{p,d,j,t-TTPD_{p,d,e}} + \sum_{r \in R} QTDR_{d,r,j,t,e} \right) \quad \forall d, t, e \quad (79)$$

$$CTMR_{r,t,e} = \sum_{j \in J} CUMR_{r,j} \left(\sum_{d \in D} QTDR_{d,r,j,t-TTDR_{d,r,t,e}} + \sum_{c \in C} QTRC_{r,c,j,t,e} \right) \quad \forall r, t, e \quad (80)$$

▪ **Costo total de compras.**

$$CTCS_{s,t,e} = \sum_{m \in M} CUFMS_{s,m,t} * QS_{s,m,t,e} \quad \forall s, t, e \quad (81)$$

$$CTCP_{p,t,e} = \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} PUMSP_{s,p,m} (1 - rp_{p,m}) (1 - r_{S_s,m}) QTSP_{s,p,m,t,e} + \left(\sum_{s \in S} \sum_{m \in M} PUMDEFSP_{s,p,m} rp_{p,m} (1 - r_{S_s,m}) QTSP_{s,p,m,t,e} \right) \forall p, t, e \quad (82)$$

$$CTCD_{d,t,e} = \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} PUPPD_{p,d,j} (1 - rd_{d,j}) (1 - rp_{p,j}) QTPD_{p,d,j,t,e} + \left(\sum_{p \in P} \sum_{j \in J} PUPDEFPD_{p,d,j} rd_{d,j} (1 - rp_{p,j}) QTPD_{p,d,j,t,e} \right) \forall d, t, e \quad (83)$$

$$CTCR_{r,t,e} = \sum_{d \in D} \sum_{j \in J} PUPDR_{d,r,j} * QTDR_{d,r,j,t,e} \quad \forall r, t, e \quad (84)$$

▪ **Costo total de inventario.**

$$CTIS_{s,t,e}^+ = \sum_{m \in M} (CUIS_{s,m}^+ NIS_{s,m,t,e}^+), \forall s, t, e \quad (85)$$

$$CTIS_{s,t,e}^- = \sum_{m \in M} (CUIS_{s,m}^- NIS_{s,m,t,e}^-), \forall s, t, e \quad (86)$$

$$CTIP_{p,t,e}^+ = \sum_{j \in J} (CUIP_{p,j}^+ NIP_{p,j,t,e}^+), \forall p, t, e \quad (87)$$

$$CTIP_{p,t,e}^- = \sum_{j \in J} (CUIP_{p,j}^- NIP_{p,j,t,e}^-), \forall p, t, e \quad (88)$$

$$CTID_{d,t,e}^+ = \sum_{j \in J} (CUID_{d,j}^+ NID_{d,j,t,e}^+), \forall d, t, e \quad (89)$$

$$CTID_{d,t,e}^- = \sum_{j \in J} (CUID_{d,j}^- NID_{d,j,t,e}^-), \forall d, t, e \quad (90)$$

$$CTIR_{r,t,e}^+ = \sum_{j \in J} (CUIR_{r,j}^+ NIR_{r,j,t,e}^+), \forall r, t, e \quad (91)$$

$$CTIR_{r,t,e}^- = \sum_{j \in J} (CUIR_{r,j}^- NIR_{r,j,t,e}^-), \forall r, t, e \quad (92)$$

- **Costo disposición de Inventario Defectuoso**

$$CTDEFS_{s,t,e} = CUDEFS_{s,m} \alpha_{s,m} QS_{s,m,t,e}, \forall s, t, e \quad (93)$$

$$CTDEFP_{p,t,e} = \sum_{j \in J} CUDEFP_{p,j} \beta_{p,j} QP_{p,j,t,e}, \forall p, t, e \quad (94)$$

$$CTDEFD_{d,t,e} = \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} CUDEFD_{d,j} rd_{d,j} QTPD_{p,d,j,t,e}, \forall d, t, e \quad (95)$$

- **Costo total de transporte.**

$$CTTS_{s,t,e} = \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} [CFTSP_{s,p,m} XSP_{s,p,m,t} + CUTSP_{s,p,m} * QTSP_{s,p,m,t,e}], \forall s, t, e \quad (96)$$

$$CTTP_{p,t,e} = \sum_{d \in D} \sum_{j \in J} [CFTPD_{p,d,j} XPD_{p,d,j,t} + CUTPD_{p,d,j} QTPD_{p,d,j,t,e}], \forall p, t, e \quad (97)$$

$$CTTD_{d,t,e} = \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} [CFTDR_{d,r,j} XDR_{d,r,j,t} + CUTDR_{d,r,j} QTDR_{d,r,j,t,e}], \forall d, t, e \quad (98)$$

▪ **Ingresos por venta de productos.**

$$VPS_{s,t,e} = \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} PUMSP_{s,p,m} (1 - rp_{p,m})(1 - rs_{s,m}) QTSP_{s,p,m,t,e}, \forall s, t, e \quad (99)$$

$$VPP_{p,t,e} = \sum_{d \in D} \sum_{q \in Q} \sum_{j \in J} PUPPD_{p,d,j} (1 - rd_{d,j})(1 - rp_{p,j}) QTPD_{p,d,j,t,e}, \forall p, t, e \quad (100)$$

$$VPD_{d,t,e} = \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} PUPDR_{d,r,j} QTDR_{d,r,j,t,e}, \forall d, t, e \quad (101)$$

$$VPR_{r,t,e} = \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} PUPRC_{r,c,j} QTRC_{r,c,j,t,e}, \forall r, t, e \quad (102)$$

▪ **Ingresos por venta de productos defectuosos.**

▪

$$VPDEFS_{s,t,e} = \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} PUMDEFSP_{s,p,m} [rp_{p,m}(1 - rs_{s,m}) QTSP_{s,p,m,t,e}], \forall s, t, e \quad (103)$$

$$VPDEFPP_{p,t,e} = \sum_{d \in D} \sum_{q \in Q} \sum_{j \in J} PUPDEFPP_{p,d,j} rd_{d,j} (1 - rp_{p,j}) QTPD_{p,d,j,t,e}, \forall p, t, e \quad (104)$$

3.5.7.3 Restricciones de fabricación.

$$\sum_{j \in J} QPP_{p,q,j,t,e} \leq MCFPN_{p,q,t} \quad \forall p, q, t, e \quad (105)$$

$$\sum_{j \in J} QPPEX_{p,q,j,t,e} \leq MCFPEX_{p,q,t} \quad \forall p, q, t, e \quad (106)$$

$$\sum_{q \in Q} \sum_{j \in J_q} Y_{p,q,j,t} - Y_{p,q,j,t} = 1, \quad \forall p, t \quad (107)$$

$$W_{p,q,j,t} \geq Y_{p,q,j,t} - Y_{p,q,j,t-1}, \quad \forall p, q, j, t \quad (108)$$

$$QSUBP_{p,j,t,e} \leq PQSP_{p,j} QP_{p,j,t,e}, \quad \forall p, j, t \quad (109)$$

3.5.6.4 Restricciones de transporte.

$$QTSP_{s,p,m,t,e} = \sum_{j \in J_m} \left(MA_{m,j} * \sum_{q \in Q_p} QPP_{p,q,j,t,e} \right) \quad \forall s, p, m, t, e \quad (110)$$

$$QTSP_{s,p,m,t,e} \leq NCTSP_{s,p,m} XSP_{s,p,m,t}, \quad \forall s, p, m, t, e \quad (111)$$

$$QTPD_{p,d,j,t,e} \leq NCTPD_{p,d,j} XPD_{p,d,j,t}, \quad \forall p, d, j, t, e \quad (112)$$

$$QTDR_{d,r,j,t,e} \leq NCTDR_{d,r,j} XDR_{d,r,j,t}, \quad \forall d, r, j, t, e \quad (113)$$

$$QTRC_{r,c,j,t,e} \leq DEMCE_{c,j,e,t}, \quad \forall c, j, t, e \quad (114)$$

$$XSP_{s,p,m,t} \leq 1, \quad XPD_{p,d,j,t} \leq 1, \quad XDR_{d,r,j,t} \leq 1, \quad \forall s, p, m, j, t \quad (115)$$

$$QTTSP_{s,p,t,e} = \sum_{m \in M} QTSP_{s,p,m,t,e} \quad \forall s, p, t, e \quad (116)$$

$$QTPD_{p,d,t,e} = \sum_{j \in J} QTPD_{p,d,j,t,e}, \forall p, d, t, e \quad (117)$$

$$QTDR_{d,r,t,e} = \sum_{j \in J} QTDR_{d,r,j,t,e}, \forall d, r, t, e \quad (118)$$

$$QTRC_{r,c,t,e} = \sum_{j \in J} QTRC_{r,c,j,t,e}, \forall r, c, t, e \quad (119)$$

$$\sum_{s \in S_p} QTTSP_{s,p,t,e} \leq CMETP_p, \forall p, t, e \quad (120)$$

$$\sum_{d \in D_p} QTPD_{p,d,t,e} \leq CMSTP_p, \forall p, t, e \quad (121)$$

$$\sum_{r \in R_d} QTDR_{d,r,t,e} \leq CMSTD_d, \forall d, t, e \quad (122)$$

$$\sum_{c \in C_r} QTRC_{r,c,t,e} \leq CMSTR_r, \forall r, t, e \quad (123)$$

3.5.6.5 Restricciones de inventario.

$$NIS_{s,m,t,e} = NIS_{s,m,t-1,e} + (1 - \alpha_{s,m})QS_{s,m,t,e} - \sum_{p \in P} QTSP_{s,p,m,t,e}, \forall s, m, t, e \quad (124)$$

$$NIP_{p,j,t,e} = NIP_{p,j,t-1,e}(1 - \beta_{p,j})QP_{p,j,t,e}QSUBP_{p,j,t,e} - \sum_{d \in D} QTPD_{p,d,j,t,e}, \forall p, j, t, e \quad (125)$$

$$NID_{d,j,t,e} = NID_{d,j,t-1,e} + \sum_{p \in P} QTPD_{p,d,j,t-\tau d \tau_{p,d,e}} - \sum_{r \in R} QTDR_{d,r,j,t,e}, \forall d, j, t, e \quad (126)$$

$$NIR_{r,j,t,e} = NIR_{r,j,t-1,e} + \sum_{d \in D} QTDR_{d,r,j,t-Td} T_{d,r,e} - \sum_{c \in C} QTRC_{r,c,j,t,e} \forall r, j, t, e \quad (127)$$

$$\sum_{m \in M} NIS_{s,m,t,e} \leq CMIS_s \forall s, t, e \quad (128)$$

$$\sum_{j \in J} NIP_{p,j,t,e} \leq CMIP_p \forall p, t, e \quad (129)$$

$$\sum_{j \in J} NID_{d,j,t,e} \leq CMID_d \forall d, t, e \quad (130)$$

$$\sum_{j \in J} NIR_{r,j,t,e} \leq CMIR_r \forall r, t, e \quad (131)$$

$$NIS_{s,m,t,e} = NIS_{s,m,t,e}^+ - NIS_{s,m,t,e}^- \quad (132)$$

$$NIP_{p,j,t,e} = NIP_{p,j,t,e}^+ - NIP_{p,j,t,e}^- \quad (133)$$

$$NID_{d,j,t,e} = NID_{d,j,t,e}^+ - NID_{d,j,t,e}^- \quad (134)$$

$$NIR_{r,j,t,e} = NIR_{r,j,t,e}^+ - NIR_{r,j,t,e}^- \quad (135)$$

En relación a los modelos propuestos, se han considerado aspectos adicionales a los contemplados por Mena (2010), como la inclusión de los costos totales por disponer defectuosos, costos por inventarios sobrantes y faltantes e ingresos por ventas de productos defectuosos a lo largo de toda la cadena de suministro (Proveedores, Plantas, Centros de Distribución y Detallistas).

Adicionalmente, se refina el fenómeno determinístico del primer modelo incorporando la incertidumbre en la demanda a partir de la creación del esquema de escenarios: alto, medio y bajo, teniendo en cuenta la probabilidad en cada uno de estos escenarios.

En virtud del desarrollo de los modelos, éstos son aplicados al sector cementero y sus resultados debidamente analizados, lo cual hace aún más novedoso el estudio ya que pocas investigaciones alrededor de la planificación de la cadena de suministros colaborativa bajo incertidumbre se han implementado en dicho sector.

3.6 ARQUITECTURA DE LA PLATAFORMA TECNOLÓGICA PARA LA SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PROGRAMACIÓN DINÁMICA BAJO INCERTIDUMBRE.

Para poner en producción la solución del modelo, se utilizará GAMS (General Algebraic Modeling System) y de esta manera determinar en forma óptima los valores de la función objetivo, como también de las variables del modelo: cantidades a comprar de materia prima, cantidades a producir por la planta, cantidades a transportar de producto terminado en cada una de las etapas de la cadena de suministro, etc.

El modelado y optimización de GAMS se basa en una arquitectura abierta, que asegura una integración fácil de los modelos de optimización en toda clase de ambientes de aplicación. GAMS es especialmente útil para problemas que sean grandes y complejos.

GAMS presenta la ventaja de potencia de lenguaje de modelización, planteando uno que permite aplicarle una serie de “solvers” o algoritmos de resolución de problemas tanto de programación no lineal, como lineal y entera.

XPRESS es un solver de GAMS que para problemas lineales enteros mixtos integra un poderoso solver LP, un módulo MIP, y un módulo barrier para los sistemas LP demasiado largos. Este solver es el requerido para obtener los resultados del modelo y garantizar no tener ninguna limitación de tamaño o de programación.

A su vez para asegurar los datos recibidos por el programa, se utiliza el servicio de resolución Neos Solvers soporte web para procesar el modelo programado en y con GAMS. Una vez resuelto el programa, se recibe vía web la solución en un fichero LST y se compara con la solución entregada por XPRESS. En el Anexo 1, se puede apreciar en detalle la programación de este modelo.

3.7 ELECCIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS MODELO MATEMÁTICO DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA BAJO INCERTIDUMBRE

Para la realización de los experimentos y pruebas necesarias se han escogido los datos que permitan obtener resultados del modelo que luego será representada su incertidumbre a partir la construcción de escenarios. Se crea el siguiente bloque de datos que define una serie de valores fijos dentro del modelo (Parámetros y Tablas): PUCMS, PUMSP, PUMDEFSP, CUFMS, CUTSP, CUMS, CUIOBS, CUIDEFS, NISinc, NCTSP, CMIS, CMAXFS, ALFA, TASAS, TTSP, PUPPD, PUPDEFPD, CFCP, CUFPN, CUFPEX, CUSUBP, CUTPD, CUMP, CUIOBP, CUIFALP, CUIDEFP, NIPinc, NCTPD, MCFPN, MCFPEX, CMETP, CMSTP, CMIP, BETA, RATEP, TASAP, MA, PQSP, TTPD, YY, PUPDR, CUTDR, CUMD, CUIOBD, CUIFALD, CUDEFD, NIDinc, CMID, CMSTD, PUPRC, CUMR, CUIOBR, CUIFALR, NCTDR, NIRinc, CMIR, CMSTR, TASAD, TTDR, DEMC y para los escenarios se considerará la demanda del cliente DEMCE y las probabilidades de los escenarios $pr(e)$.

4. IMPLANTACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

4.1 INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta el proceso planificación de operaciones en la cadena de suministro colaborativa concreta se presenta una descripción del proceso productivo de la empresa del sector cementero, con el fin de contextualizar específicamente el caso de aplicación y elaborar el modelado de la empresa cementera a partir de la información recopilada.

Con base en la identificación de las variables de decisión, los parámetros y los aspectos que puedan influir en el modelado, así como las relaciones entre ellos, se elaborará la modelización de la planificación de la cadena de suministro bajo incertidumbre para el caso objeto de estudio.

4.2 EL PROCESO DE PLANIFICACIÓN DE OPERACIONES EN LA CADENA DE SUMINISTRO COLABORATIVA CONCRETA

A continuación, se describe internamente una empresa característica del sector cementero, con el objetivo de establecer un conocimiento general del sistema que se está analizando; conocer los componentes y la estructura de la empresa objeto de estudio con un mayor nivel de detalle.

4.2.1 Descripción de la empresa cementera objeto de la aplicación. Es una organización multidoméstica, productora y comercializadora de cemento y concreto, con presencia en Colombia, Estados Unidos y el Caribe.

En el negocio del cemento, es líder en Colombia, quinto productor más grande en América Latina y segundo más grande en el sureste de Estados Unidos. Cuenta con nueve plantas en Colombia y dos en Estados Unidos; seis molineras de clinker

ubicadas en Colombia, Estados Unidos, Haití, Panamá, República Dominicana y Surinam; y cinco terminales de recepción y empaque ubicadas en Antigua, Curazao, Dominica, St. Marteen y St. Thomas. La capacidad instalada total es de 15,6 millones de toneladas de cemento al año.

4.2.2 Descripción de los productos de la Empresa Cementera objeto de la aplicación. La empresa produce Clinker, Cemento Pórtland tipo I, Cemento Pórtland tipo II, Cemento Pórtland tipo III y Cemento Tipo I II ASTM.

- **Cemento Pórtland tipo I**, más conocido como cemento gris; es usado principalmente para estructuras y albañilería. Es el que se recomienda para uso general.
- **Cemento Pórtland tipo III o Concretero.** Usado en prefabricados y, en general, cuando se requiere de una alta resistencia inicial y un rápido endurecimiento.
- **Cemento Tipo I II ASTM.** Cemento de alta resistencia.

4.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

Para la fabricación del cemento, se utiliza caliza o carbonato de calcio, chert, mineral de hierro, yeso, carbón y escoria. Como típicamente el 80 – 90% del crudo consiste de caliza, es denominada la materia prima primaria. Las materias primas secundarias idóneas son las que proporcionan el suministro necesario de sílice, alúmina y óxidos de hierro. El proceso general puede observarse en la Figura 5.

En las canteras ubicadas en las proximidades de la fábrica el tipo de explotación es a cielo abierto con uso de perforadoras especiales y posteriores voladuras. El material extraído (Caliza), resultante de las voladuras, es cargado mediante palas

de gran capacidad, que depositan las rocas en camiones, los que transportan la materia prima hasta la sección de trituración.

En la trituradora ubicada en la cantera se reduce el tamaño de la caliza extraída en los diferentes frentes de explotación de la cantera, para ello se llevan a cabo operaciones de precibado, trituración primaria, trituración secundaria, zarandeo del material proveniente de las etapas de trituración y desempolvado; el resultado de las operaciones anteriores es finos usados en el proceso de clinkerización.

Posteriormente es transportado a la planta donde se hará la segunda reducción en trituración planta si es necesario o se tritura allí las otras materias utilizadas en el proceso (escoria, yeso); de allí es transportada la materia prima al salón de almacenamiento por medio de bandas transportadoras.

El Almacenamiento de materias primas se realiza en un salón con una capacidad de 50.000 Toneladas, en donde se almacena la caliza y el corrector. La recuperación de los materiales para la alimentación a los molinos se realiza con un rascador de operación lateral provistos de rastrillos.

Una vez la materia prima (Caliza y corrector) se encuentra en el salón de almacenamiento, estos se transforman en un lodo bombeable o pasta cuya composición química permita la elaboración de Clinker de Cemento en los hornos. La caliza y el corrector son dosificados a los molinos de pasta por alimentadores de velocidad variable desde tolvas con capacidad de 100 toneladas, el material es pesado para ajustar la producción del molino a una finura en la pasta de 82% en malla 200. El control del contenido de carbonatos se realiza cambiando la relación de velocidad en los alimentadores para mantener la guía en 77 %.

La pasta así molida es descargada a una alberca y bombeada a las balsas con un contenido de humedad de 34%. El almacenamiento de pasta se realiza en cuatro

balsas cada una con capacidad de 8000 toneladas. La pasta producida en los molinos es homogeneizada en cada balsa y bombeada a la balsa siguiente, hasta terminar en la asignada para la alimentación de los hornos.

La pasta es bombeada desde la balsa 3 y descargada a una alberca de concreto en la parte superior de la torre de alimentación, cae por gravedad hasta un alimentador de baldes de velocidad variable el cual alimenta al tanque de medición de pasta y éste al horno. En éste se transforma la pasta en Clinker mediante calor asegurando un peso litro de 1.350 gramos/litro con un consumo calórico de 1.550 kcal/kg de Clinker. En el interior del horno se llevan a cabo los procesos de secado de pasta por intercambio de calor con las cadenas, descarbonatación, clinkerización y enfriamiento parcial del Clinker.

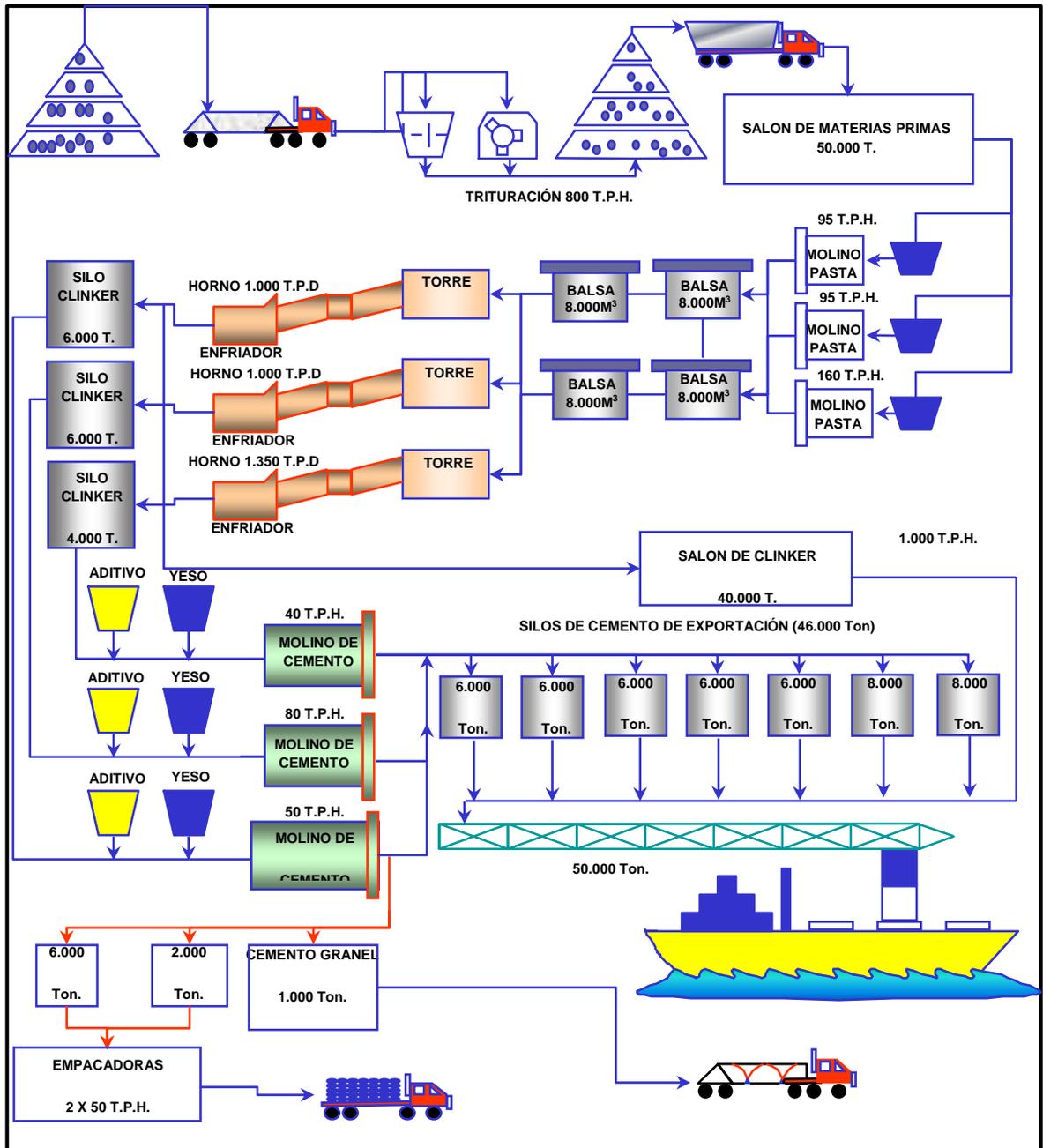
El enfriamiento de Clinker se realiza haciendo pasar aire a través del Clinker, reduciendo su tamaño hasta proporcionar una granulometría necesaria para la molienda y el transporte. La capacidad total de producción de Clinker es de 3.350 ton/día.

Para el Almacenamiento de Clinker hay 3 silos ubicados en la descarga de los enfriadores y en el salón de almacenamiento. El Clinker producido en los hornos es transportado por medio de bandas al salón de almacenamiento y por medio de elevadores a los silos.

El Clinker y yeso previamente pesados, se alimentan al molino de cemento donde se pulverizan. El cemento descargado por el molino es transportado por el circuito de molienda, en el separador los gruesos son retornados al molino, los finos separados son recogidos en multiciclones y filtros.

El cemento se transporta a los silos de almacenamiento por una banda. El cemento es molido a 3.600 blaine con una finura de 96% en malla 325. La capacidad total de molienda es de 4.000 ton/día. (ver Figura 5).

Figura 5. Diagrama del proceso de fabricación de cemento



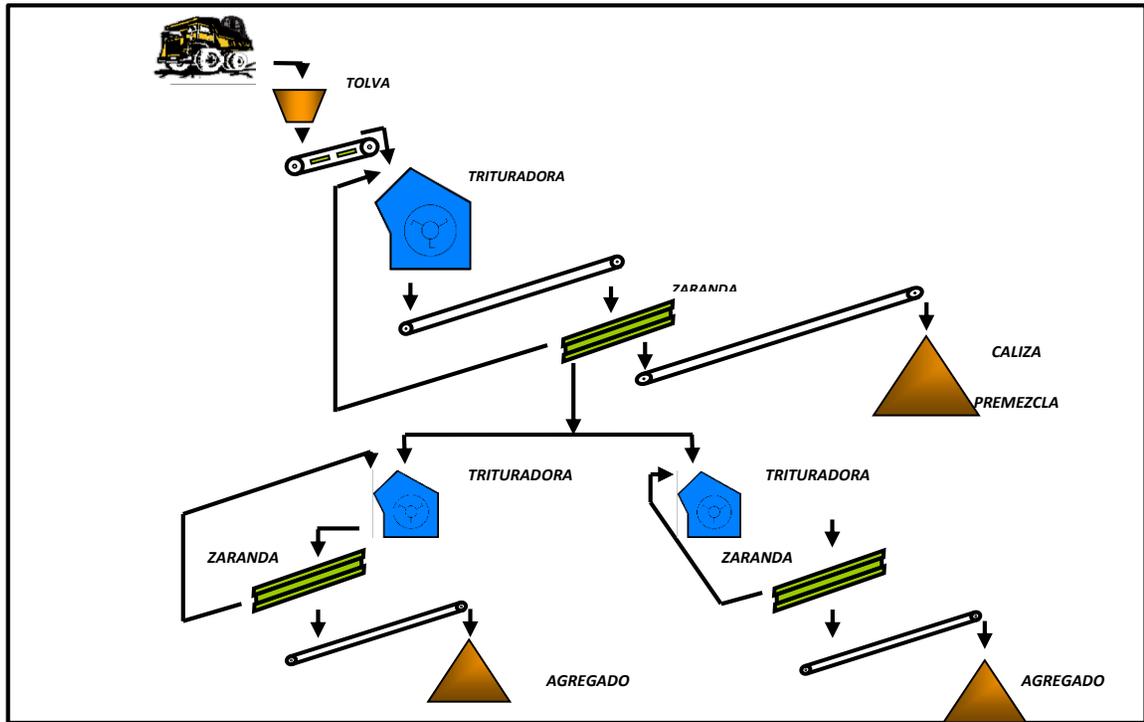
Fuente: Memorias de empresa cementera.

El cemento se lleva a los silos de almacenamiento por una banda y por regueras ubicadas sobre la parte superior de cada silo. Se cuenta con silos para el almacenamiento del cemento de exportación y silos metálicos para cemento local. La extracción del cemento para exportación, se realiza desde los silos por regueras, bandas y colectores en la descarga de estas.

En el muelle de exportación se realiza la carga de buques a una rata de 12.000 ton/día, se pueden cargar buques de hasta 50.000 toneladas, mediante un sistema de banda transportadora y un cargador móvil.

- **Fase de extracción de materias primas.** La fase de extracción de materias primas consta básicamente de los sistemas de desarrollo y preparación del frente, transporte y almacenamiento de la caliza y limos. El material extraído, resultante de las voladuras, es cargado mediante palas de gran capacidad, que depositan las rocas en camiones, los que transportan la materia prima hasta la sección de trituración.
- **Fase de trituración de materias primas.** En la fase de trituración de materias primas, la caliza y los materiales de corrección (chert y limo) que proporcionan los óxidos metálicos son reducidos de tamaño en una trituradora. Una vez los materiales son triturados, pasan a ser transportados a la zona de salón de almacenamiento (ver Figura 6).

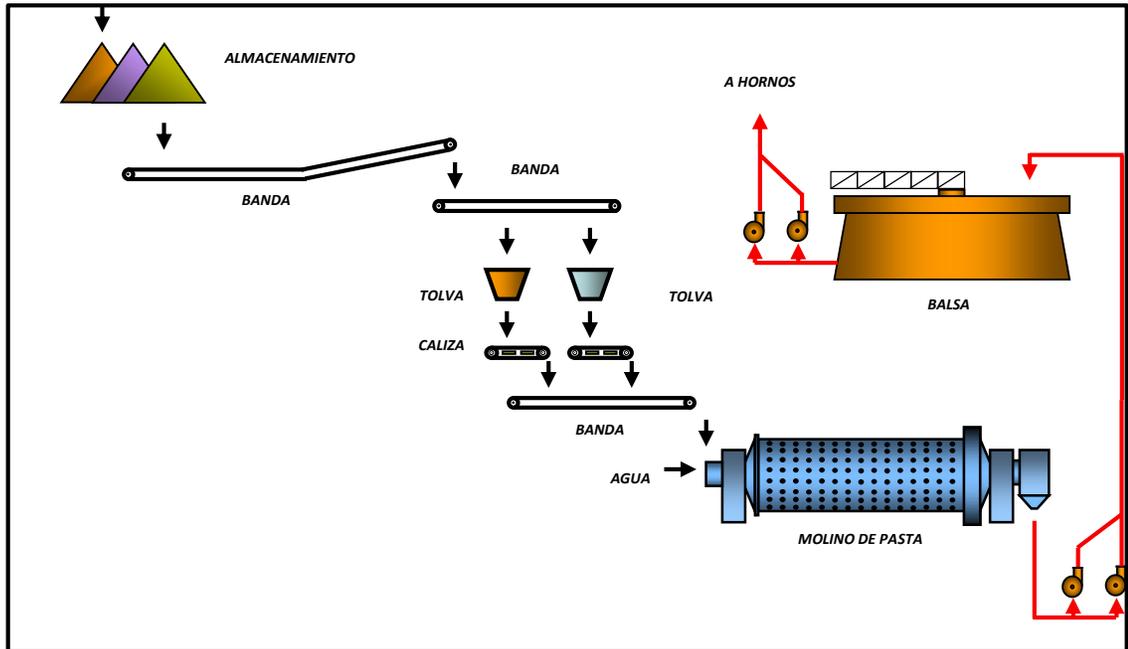
Figura 6. Diagrama del proceso de trituración de materias primas



Fuente: Memorias de empresa cementera.

- **Fase molienda de pasta.** Una vez la caliza y el limo son triturados y éstos pasan juntos con el chert (que también fue triturado) a ser transportados y dosificados adecuadamente al molino de crudo con el mineral de hierro con la finalidad de ajustar los niveles de sílice y óxido de hierro en la mezcla. La pasta así molida es descargada a una alberca y bombeada a las balsas (ver Figura 7).

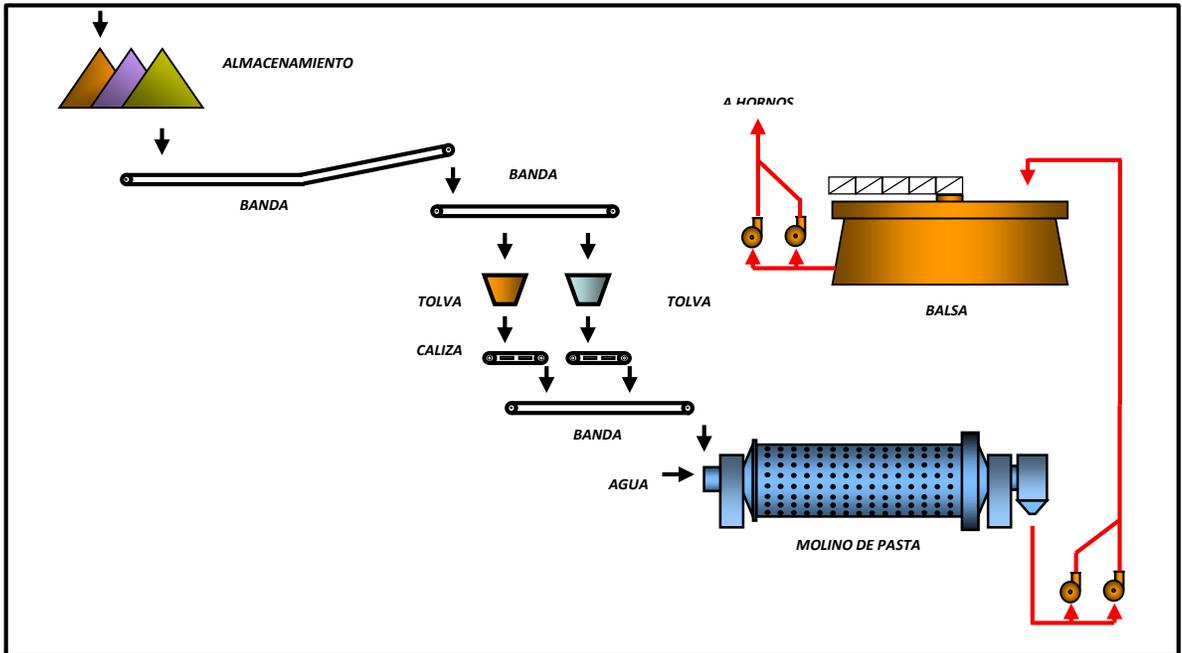
Figura 7. Diagrama del proceso de molienda de pasta



Fuente: Memorias de empresa cementera.

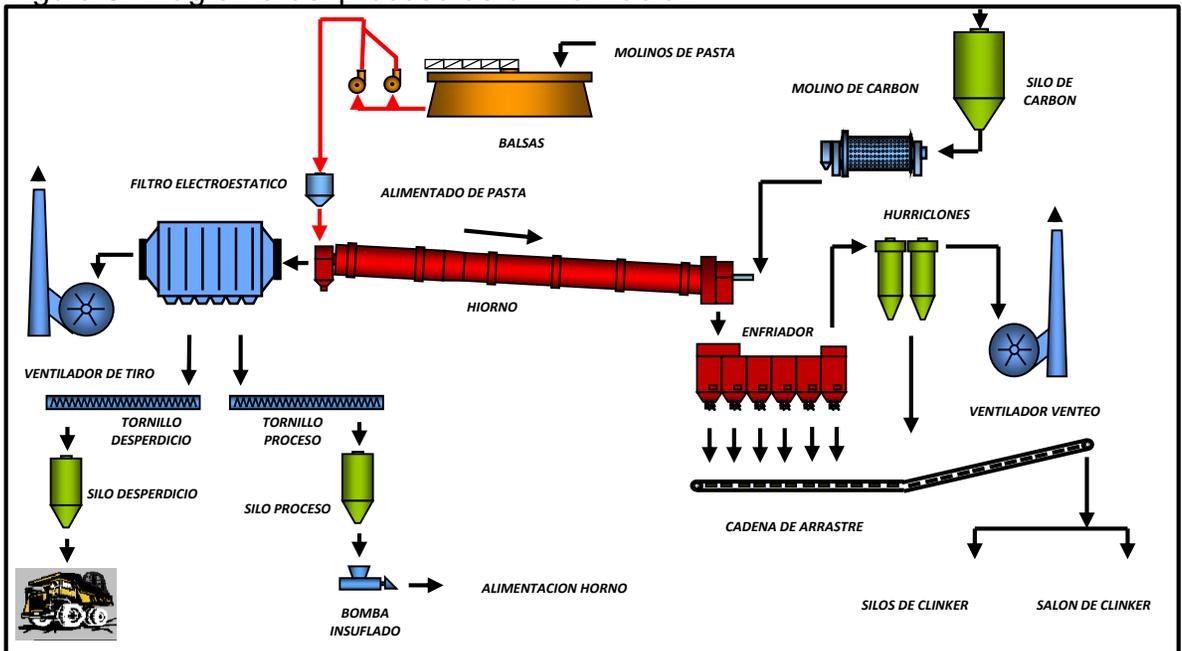
- **Fase homogenización.** El Almacenamiento de Pasta se realiza en cuatro balsas cada una con capacidad de 8000 toneladas. La pasta producida en los molinos es homogeneizada en cada balsa y bombeada a la balsa siguiente, hasta terminar en la asignada para la alimentación de los hornos (ver Figura 8).
- **Fase clinkerización.** En el horno rotatorio se desarrollan las restantes reacciones físicas y químicas que dan lugar a la formación del clinker. El intercambio de calor se produce mediante transferencias térmicas por contacto íntimo entre el crudo homogenizado y los gases calientes que se obtienen del horno, a altas temperaturas. El clinker obtenido es sometido a un proceso de enfriamiento rápido posteriormente es llevado a los silos de clinker (ver Figura 9).

Figura 8. Diagrama del proceso de homogenización



Fuente: Memorias de empresa cementera.

Figura 9. Diagrama del proceso de clinkerización

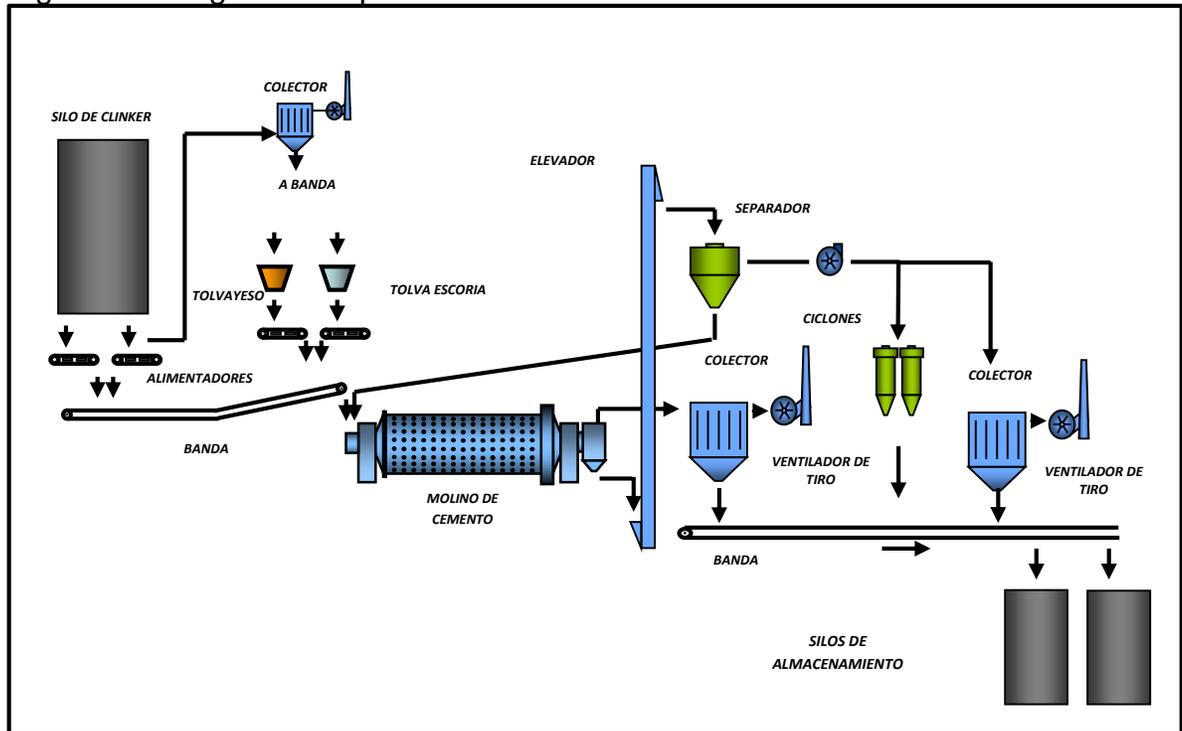


Fuente: Memorias de empresa cementera.

- **Fase molienda de cemento.** El Clinker es conducido a los molinos de cemento

donde es molido junto con los agregados o aditivos yeso y escoria. En este punto el cemento está listo para ser transportado y almacenado en silos de depósito (ver Figura 10).

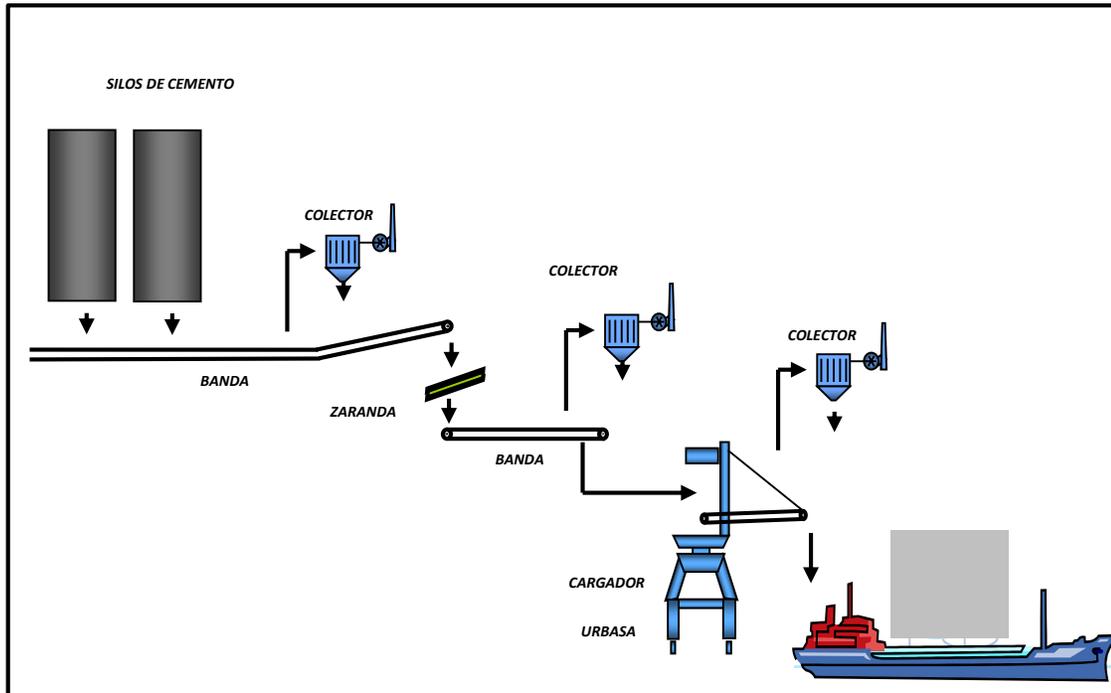
Figura 10. Diagrama del proceso de molienda de cemento



Fuente: Memorias de empresa cementera.

- **Fase despacho y entrega de producto final.** El proceso de despacho de cemento se da en dos pasos principales, primero la extracción de cemento desde los silos y segundo el transporte y cargue del material en el buque, el paso de extracción de cemento comienza con la selección de los silos que serán descargados, el material sale de la extracción de silos a través de bandas hasta la costa y con la ayuda de equipos (tripper y cargador) depositan el cemento en la bodega del buque (ver Figura 11).

Figura 11. Diagrama del proceso de despacho y entrega del producto final



Fuente: Memorias de empresa cementera.

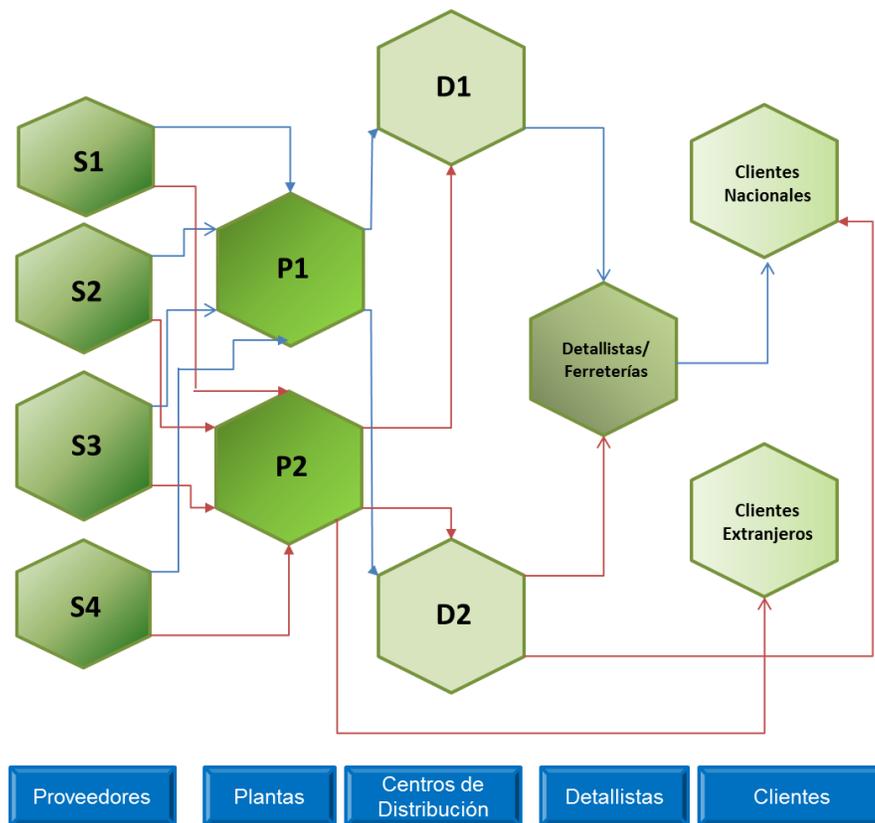
4.4 MODELADO DE LA EMPRESA CEMENTERA

Pidd (1996, pp. 187-196) define que “un modelo es una representación externa y explícita de una parte de la realidad tal y como la ve la gente que desea utilizarlo para comprender, cambiar, gestionar y controlar esa parte de la realidad”. El modelado es la técnica de generar modelos y el modelo una representación de algo. Y para alcanzar el modelado de la empresa objeto de estudio se describen los elementos que hacen parte de la cadena de suministro.

4.4.1 Cadena de suministro de una empresa cementera. La arquitectura que constituye la cadena de suministro de la empresa objeto de estudio comprende un grupo de entidades, internas y externas relacionadas con los eslabones de proveedores, plantas, centros de distribución, detallistas y clientes que representan los “bloques” de la cadena de suministro.

Se identifican las etapas del proceso productivo/operaciones a través de interrelaciones que buscan añadir valor, desde el punto de vista del cliente, al producto, bien o servicio que van aguas arriba desde el usuario final hasta el proveedor. (Ver Figura 12).

Figura 12. Arquitectura física de las etapas de la cadena de suministro



Fuente: elaboración propia.

4.4.2 Entidades internas.

A continuación, la Tabla 9, enlista las entidades internas que pertenecen a la cadena de suministro de la empresa cementera objeto de estudio.

Tabla 9. Entidades Internas de la empresa cementera

Entidad Interna	Detalle
P1	Fabricación de Cemento Tipo I, III
P2	Fabricación de Cemento Tipo I, III
D1	Distribución de Cemento Tipo I, Tipo III
D2	Distribución de Cemento Tipo I, Tipo III

Fuente: elaboración propia.

4.4.3 Entidades externas. La Tabla 10, presenta las entidades externas que hacen parte de la cadena de suministro.

Tabla 10. Entidades externas de la empresa cementera

Entidad Externa	Detalle
S1	Proveedor de materia prima Yeso, Escoria Clinker y Sacos
S2	Proveedor de materia prima Yeso, Escoria Clinker y Sacos

Fuente: elaboración propia.

4.4.4 Proveedores. Dentro de sus políticas, la compañía tiene como prioridad buscar proveedores que cumplan con altos estándares de calidad y servicio que le permitan obtener un buen producto.

El área de compras tiene como responsabilidad proveer a la organización de las materias primas, activos, equipos, insumos, repuestos y servicios requeridos, que permitan la correcta operación de las actividades del negocio y garanticen la satisfacción del cliente interno, mediante su adquisición, en el tiempo requerido, al precio justo y de acuerdo a las especificaciones técnicas y de calidad solicitadas.

Es el encargado directo de realizar las negociaciones con los proveedores de materias primas, acorde a las necesidades anuales dadas por el área de producción. Se cuenta con un manual de contratación que los rige como norma, política y procedimiento para la ejecución de todos los procesos de contratación,

uso apropiado de los recursos y de las diferentes formas de contratación donde además se incluyen los Principios del Pacto Global de Naciones Unidas.

Hacen parte de esta etapa los proveedores que suministran materia prima; Clinker, material de adición como Yeso, Escoria, y los insumos como el Empaque.

En la herramienta actual se llevan los saldos de inventarios de cada uno de los materiales y estos son descontados en el sistema en la medida en que son consumidos. Sin embargo, a pesar de tener estipulado unas cantidades mínimas de inventario, éstas son consultadas al área de producción dado que puedan requerir cantidades adicionales por pedidos no contemplados en el Programa al inicio del año.

Fabricación. En la planificación anual de la planta se establecen las producciones mensuales para cada proceso y es elaborada en conjunto por el equipo de Directores de las fases asociados a la fabricación del cemento con base en las cifras estimadas de ventas para el año, suministradas por el área comercial.

El proceso productivo se desarrolla en las fases de Extracción y Trituración de Materias Primas, Molienda y Homogeneización de Pasta, Clinkerización, Molienda y Despacho de Cemento.

Una vez las materias primas se encuentran en los salones de almacenamiento inicia la etapa de molienda de pasta. Los molinos de Pasta No.1 y No.2 tienen una capacidad independiente de 95 Ton/hora, mientras que el Molino de Pasta No.3, una capacidad de 160 Ton/hora. La caliza y el corrector son transformados en este proceso en un lodo o pasta molida, descargados en una alberca y bombeados a cuatro balsas con capacidad de 8000 toneladas cada una, en donde se produce el proceso de homogeneización en cada balsa y bombeada a la siguiente balsa hasta terminar en la asignada para la alimentación de los hornos.

En los hornos se transforma la pasta en Clinker, llevándose a cabo los procesos de secado de pasta, descarbonatación, clinkerización y enfriamiento parcial del Clinker. Los Hornos No. 1 y No. 2 tienen una capacidad de producción de 1000 Ton/día cada uno mientras que el Horno No. 3. 1350 Ton/día.

El Clinker producido es almacenado en uno de los 3 silos disponibles, cuyas capacidades de almacenamiento son Silos de Clinker No. 1 y No. 2, 6000 Toneladas cada uno y Silo de Clinker No. 3, 4000 Toneladas.

El Clinker y el yeso se alimentan al molino de cemento para ser pulverizados, luego, el cemento es descargado y transportado por bandas a los silos de cemento.

Políticas de subcontratación de la producción entre plantas. Para el caso objeto de estudio no se subcontrata la fabricación de ninguno de los productos por políticas internas de Calidad.

4.4.5 Centros de distribución. En esta etapa, los productos nacionales se transportan por camión desde las plantas hasta los centros de distribución y los productos de exportación son transportados en buques desde su propio puerto. Se considera la distribución para los productos extranjeros a capacidad infinita por no tratarse como un aspecto crítico. Los distribuidores nacionales compran directamente el producto a las plantas para ser revendido de manera directa a detallistas (ferreterías)

4.4.6 Detallistas. Pertenecen a esta etapa de la cadena el grupo de compañías independientes dedicadas a la comercialización de materiales para la construcción a pequeños constructores y maestros de obra y que reciben el producto desde los centros de distribución.

4.4.7 Clientes. Los clientes se distribuyen en el mercado nacional e internacional. Para el primero, pertenecen a los mercados de la construcción, para fabricación de estructuras, morteros y, revoques, pañetes o repellos; en las obras civiles como son puentes, carreteras, presas y túneles; y en los prefabricados como bloques, adoquines, baldosas, tubos y mobiliario; entre otros. Los clientes internacionales basan la utilidad de la compra del cemento en la transformación para concreto como elementos estructurales en la construcción.

Los principales destinos de las exportaciones de la empresa objeto de estudio son Estados Unidos y Panamá.

4.5 INFORMACIÓN PARA LA APLICACIÓN DEL MODELO Y SU HERRAMIENTA DE RESOLUCIÓN: CASO PRÁCTICO

Una vez se ha desarrollado el modelo que busca dar solución al planteamiento del problema, maximizando el margen de beneficios de las diferentes empresas pertenecientes a la cadena de suministro, representando la realidad en la consideración de la incertidumbre y cuya implementación está pensada en el contexto del sector cementero a partir de la definición de los parámetros y outputs del modelo, se muestra la validación práctica de la propuesta de modelado, la cual debe ser capaz de tomar la complejidad de la cadena de suministro y facilitar la integración de las actividades de la empresa a nivel interno y externo con clientes y proveedores.

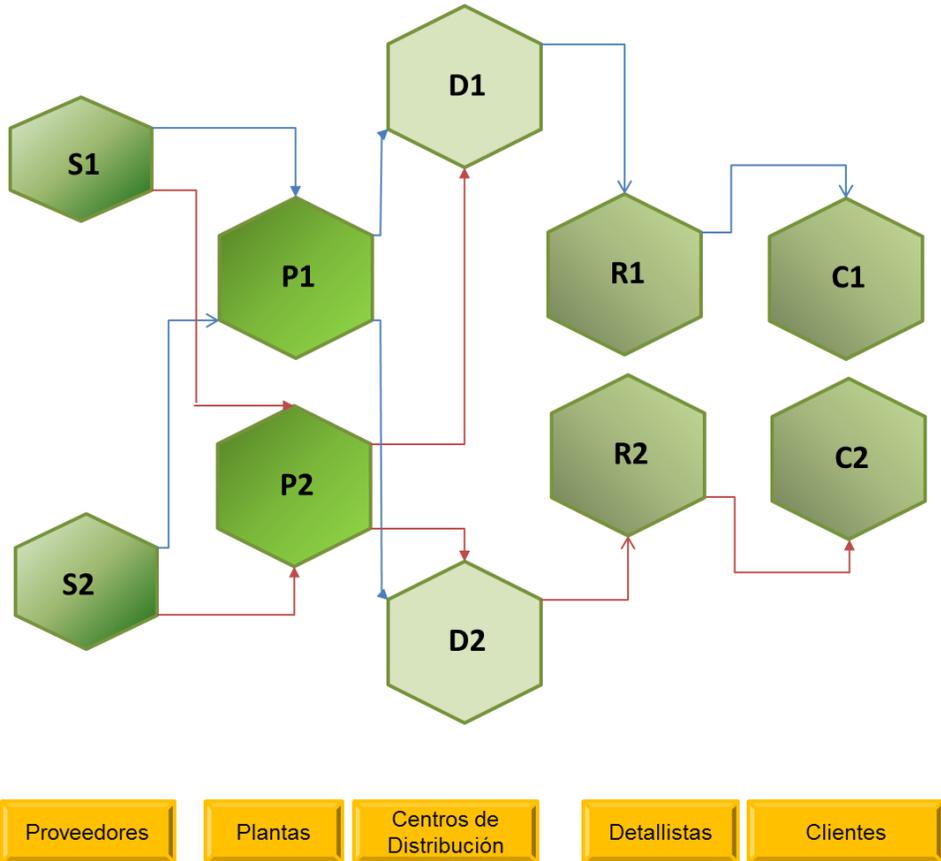
A partir de los resultados obtenidos se mostrará la funcionalidad de la propuesta de modelado y por la complejidad de éste sumado a los numerosos criterios que se desean optimizar, responden a un problema que por métodos analíticos directos resulta de difícil solución, por ello la necesidad de resolverlo a través de programación dinámica.

4.5.1 Información para la aplicación del modelo. A continuación, se muestra la experimentación de la propuesta de Modelado que incluye en la etapa de proveedores dos referencias, que para esta aplicación los llamaremos S1 y S2. Se escogen por ser quienes proveen a las Plantas P1 y P2. En la etapa de plantas se tienen en cuenta las de mayor producción de cemento del grupo al que pertenece la empresa objeto de estudio.

En distribución se consideran dos distribuidores nacionales independientes quienes son abastecidos por las plantas, los cuales llamaremos D1 y D2. En la etapa de detallistas se incluyen las compañías nacionales que comercializan los mayores volúmenes de producto a pequeños constructores y maestros de obra, por ejemplo, ferreterías, las cuales son llamadas R1 y R2. Para el ensayo no se tienen en cuenta todos los nodos de cada etapa de la cadena ya que haría más complicada la solución de la programación dinámica (ver Figura 13).

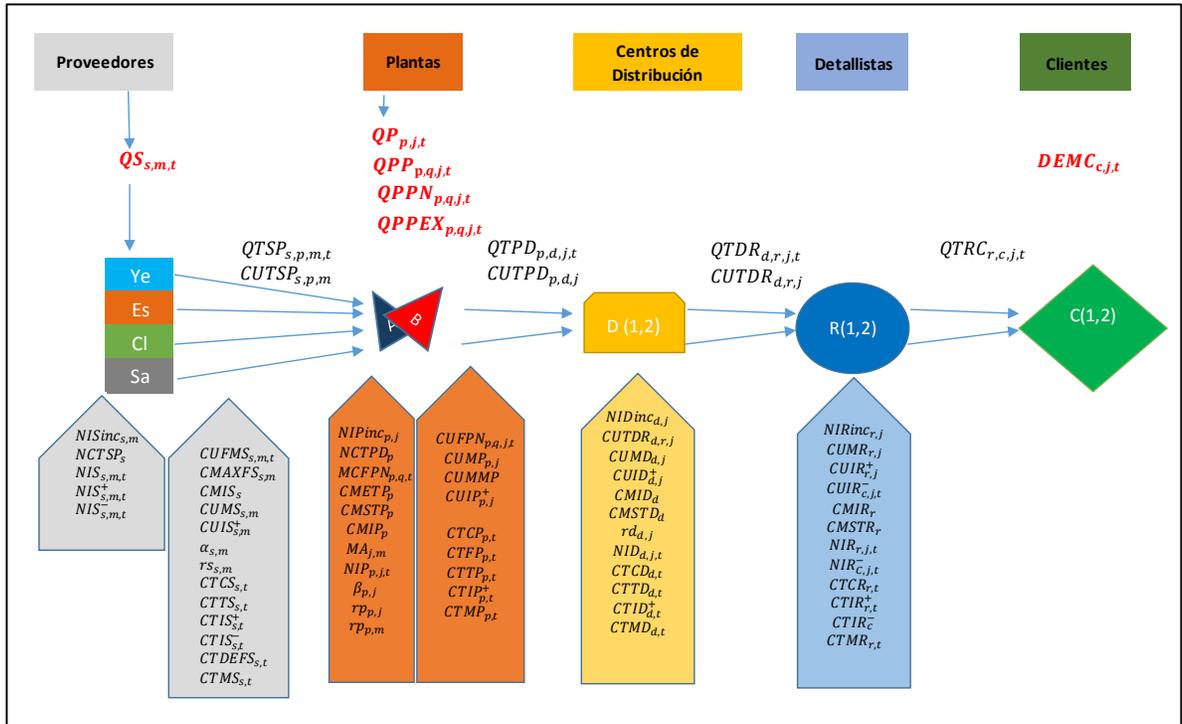
Por lo anterior, el desarrollo práctico del modelo consiste en dos proveedores, dos plantas, dos recursos de producción (Q1, Q2), dos productos finales (A, B), dos centros de distribución y dos clientes nacionales. Se asume la demanda en un periodo de seis meses. No se tiene en cuenta todo el proceso interno de la cadena para efectos de hacer más simple el problema.

Figura 13. Arquitectura física de las etapas de la cadena de suministro objeto de aplicación



Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Diagrama de la cadena de suministro objeto de aplicación



Fuente: elaboración propia.

4.5.2 Datos de partida del modelo de aplicación

4.5.2.1 Demanda Determinística. La compañía cementera objeto de estudio suministró los siguientes datos. Se muestra la previsión de la demanda que permite establecer las cantidades a producir por la planta en cada recurso de producción a partir de la corrida del modelo matemático (ver Tabla 11 y 12).

Tabla 11. Demanda del cliente

DCLIENTE (c,j,t) Demanda del Cliente (Sacos)							
c	j	1	2	3	4	5	6
1	A	17000	1000	15000	10000	8000	15000
1	B	8000	14000	8000	8000	7000	9000
2	A	10000	14400	8000	9000	10000	8000
2	B	8000	9000	9000	3000	4000	1000

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. Conjuntos

Conjuntos		
s	Proveedores	1,2
m	Materias Primas	YESO, ESCORIA, CLINKER, SACO
j	Productos	A, B
p	Plantas	1,2
q	Recursos de Producción	Q1, Q2
d	Centros de Distribución	1,2
r	Detallistas	1,2
c	Clientes	1,2
t	Periodos	1,2,3,4,5,6

Fuente: elaboración propia.

4.5.2.2 Demanda con Incertidumbre. Para considerar la incertidumbre en la demanda el modelo prevé tres posibles escenarios “e” para la demanda: alta, media y baja, conjuntos y probabilidades (ver Tabla 13 a 15).

Tabla 13. Demanda del cliente en el escenario en el periodo

DEMCE (c,j,e,t) Demanda del Cliente del producto en el escenario en el periodo (Sacos)								
c	j	e	1	2	3	4	5	6
1	A	BAJA	15000	800	13000	8000	6000	13000
1	B	BAJA	6000	10000	5800	9000	10000	9000
2	A	BAJA	9000	12400	6000	7000	6000	5000
2	B	BAJA	1500	2000	3200	2000	10000	800
1	A	MEDIA	17000	1000	15000	10000	8000	15000
1	B	MEDIA	8000	14000	8000	8000	2000	9000
2	A	MEDIA	10000	14400	8000	9000	8000	8000
2	B	MEDIA	8000	9000	9000	3000	7000	1000
1	A	ALTA	19000	1200	17000	12000	10000	17000
1	B	ALTA	10000	20000	8500	8500	8000	11000
2	A	ALTA	17000	18400	10000	11000	11000	10000
2	B	ALTA	9000	10000	10800	4800	5000	1200

Fuente: elaboración propia.

Tabla 14. Conjuntos con demanda bajo incertidumbre

Conjuntos		
s	Proveedores	1,2
m	Materias Primas	YESO, ESCORIA, CLINKER, SACO
j	Productos	A, B
p	Plantas	1,2
q	Recursos de Producción	Q1, Q2
d	Centros de Distribución	1,2
r	Detallistas	1,2
c	Clientes	1,2
e	Escenarios para la demanda	alta,media,baja
t	Periodos	1,2,3,4,5,6

Fuente: elaboración propia.

Tabla 15. Probabilidad de escenarios

pre	Probabilidad de Escenarios
alta	0,333333
media	0,333333
baja	0,333333

Fuente: elaboración propia.

4.5.3 Determinación de los Parámetros

- **Proveedores** (ver Tablas 16 a 30).

Tabla 16. Precio unitario de la materia prima en el proveedor para la planta

PUMSP(s,p,m) Precio Unitario de la Materia Prima en el proveedor para la Planta (\$ por Ton)					
s	p	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	1	\$ 20.825	\$ 20.298	\$ 59.358	\$ 2.958.501
1	2	\$ 20.825	\$ 20.298	\$ 59.358	\$ 2.958.501
2	1	\$ 20.630	\$ 20.546	\$ 59.849	\$ 2.988.086
2	2	\$ 20.630	\$ 20.546	\$ 59.894	\$ 2.988.086

Fuente: elaboración propia.

Tabla 17. Precio unitario de la materia prima defectuosa en el proveedor para la planta

PUMDEFSP(s,p,m) Precio Unitario de la Materia Prima defectuosa en el proveedor para la Planta (\$ por Ton)				
s	p	YESO	ESCORIA	CLINKER
1	1	\$ 13.101	\$ 11.979	\$ 44.712
2	1	\$ 12.958	\$ 12.158	\$ 44.809

Fuente: elaboración propia.

Tabla 18. Costo por Unidad de Fabricación de la Materia Prima en el Proveedor

CUFMS(s,m,t) Costo por Unidad de Fabricación de la Materia Prima en el Proveedor (\$ por Ton)							
s	m	1	2	3	4	5	6
1	YESO	\$ 1.101	\$ 1.101	\$ 1.101	\$ 1.101	\$ 1.101	\$ 1.101
1	ESCORIA	\$ 1.979	\$ 1.979	\$ 1.979	\$ 1.979	\$ 1.979	\$ 1.979
1	CLINKER	\$ 4.712	\$ 4.712	\$ 4.712	\$ 4.712	\$ 4.712	\$ 4.712
1	SACO	\$ 218.876	\$ 218.876	\$ 218.876	\$ 218.876	\$ 218.876	\$ 218.876
2	YESO	\$ 1.101	\$ 1.101	\$ 1.101	\$ 1.101	\$ 1.101	\$ 1.101
2	ESCORIA	\$ 1.979	\$ 1.979	\$ 1.979	\$ 1.979	\$ 1.979	\$ 1.979
2	CLINKER	\$ 4.712	\$ 4.712	\$ 4.712	\$ 4.712	\$ 4.712	\$ 4.712
2	CLINKER	\$ 218.876	\$ 218.876	\$ 218.876	\$ 218.876	\$ 218.876	\$ 218.876

Fuente: elaboración propia.

Tabla 19. Costo unitario de transporte desde el proveedor a la planta

CUTSP (s,p,m) Costo Unitario de Transporte desde el proveedor a la Planta (\$ por Ton)					
s	p	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	1	\$ 3.374	\$ 3.099	\$ 1.200	\$ 69.344
1	2	\$ 3.585	\$ 3.148	\$ 1.150	\$ 70.037
2	1	\$ 3.189	\$ 3.281	\$ 1.230	\$ 69.691
2	2	\$ 3.368	\$ 3.292	\$ 1.180	\$ 68.994

Fuente: elaboración propia.

Tabla 20. Costo por unidad de manipulación de la materia prima en el proveedor

CUMS (s,m) Costo por Unidad de Manipulación de la Materia Prima en el Proveedor (\$ por Ton)				
s	YESO	ESCORIA	CLINKER	CLINKER
1	\$ 641	\$ 500	\$ 483	\$ 6.693
2	\$ 565	\$ 630	\$ 579	\$ 6.760

Fuente: elaboración propia.

Tabla 21. Costo por unidad de inventario sobrante de la materia prima en el proveedor

CUISOB (s,m) Costo por Unidad de Inventario Sobrante de la Materia Prima en el Proveedor (\$ por Ton)				
s	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	\$ 367	\$ 276	\$ 430	\$ 8.284
2	\$ 251	\$ 269	\$ 383	\$ 8.367

Fuente: elaboración propia.

Tabla 22. Costo por unidad de inventario faltante de la materia prima en el proveedor

CUIFALS(s,m) Costo por Unidad de Inventario Faltante de la Materia Prima en el Proveedor (\$ por Ton)				
s	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	\$ 5.348	\$ 4.889	\$ 16.607	\$ 887.550
2	\$ 5.289	\$ 4.964	\$ 16.408	\$ 887.550

Fuente: elaboración propia.

Tabla 23. Costo por unidad de desechar defectuoso de la materia prima en el proveedor

CUIDEFS (s,m) Costo por Unidad de desechar defectuoso de Materia Prima en el Proveedor (\$ por Ton)				
s	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	\$ 367	\$ 276	\$ 430	\$ 284
2	\$ 251	\$ 269	\$ 383	\$ 367

Fuente: elaboración propia.

Tabla 24. Nivel de inventario inicial de materia prima en el proveedor

NISinc (s,m) Nivel de Inventario Inicial de Materia Prima en el Proveedor (Ton)				
s	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	20	135	561	20
2	30	100	528	12

Fuente: elaboración propia.

Tabla 25. Nivel de capacidad de transporte para la materia prima desde el proveedor a la planta

NCTSP(s) Nivel de Capacidad de Transporte para la Materia Prima desde el Proveedor a la Planta (Ton)					
s	p	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	1	140000	135000	173500	112880
1	2	140000	135000	173500	112880
2	1	138000	134000	172000	111019
2	2	138000	134000	172000	111019

Fuente: elaboración propia.

Tabla 26. Capacidad máxima de inventarios en el proveedor

CMIS(s) Capacidad Máxima de Inventarios en el Proveedor (Ton)	
s	
1	380.186
2	370.759

Fuente: elaboración propia.

Tabla 27. Capacidad máxima de fabricación en el proveedor

CMAXFS(s,m) Capacidad Máxima de Fabricación en el Proveedor (Ton)				
s	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	50000	55000	53500	22880
2	48000	44000	82000	21019

Fuente: elaboración propia.

Tabla 28. Fracción de artículos defectuosos de materia prima en el proveedor

ALFA(s,m) Fracción de artículos defectuosos de Materia Prima en el Proveedor				
s	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	0,016	0,013	0,011	0,018
2	0,015	0,017	0,015	0,017

Fuente: elaboración propia.

Tabla 29. Tasa de detección de artículos defectuosos de materia prima en el proveedor

TASAS (s,m) Tasa de detección de artículos defectuosos de Materia Prima en el Proveedor				
s	YESO	ESCORIA	CLINKER	YESO
1	0,98	0,99	0,99	0,97
2	0,98	0,99	0,99	0,96

Fuente: elaboración propia.

Tabla 30. Periodo de tiempo de Transporte desde el Proveedor hasta la Planta

Periodo de tiempo de Transporte desde el Proveedor hasta la Planta		
TTSP(s,p)		
s	1	2
1	0	0
2	0	0

Fuente: elaboración propia.

- **Planta** (ver Tablas 31 a 54).

Tabla 31. Precio unitario del producto desde la planta hasta el centro de distribución

PUPPPD(p,d,j) Precio Unitario del Producto desde la Planta hasta el Centro de Distribución (\$ por Saco)			
p	d	A	B
1	1	\$ 12.907	\$ 13.022
1	2	\$ 12.907	\$ 13.022
2	1	\$ 12.505	\$ 13.210
2	2	\$ 12.505	\$ 13.210

Fuente: elaboración propia.

Tabla 32. Precio unitario del producto defectuoso desde la planta para el centro de distribución

PUPDEFDP(p,d,j) Precio Unitario del Producto defectuoso desde la Planta para el Centro de Distribución (\$ por Saco)			
p	d	A	B
1	1	\$ 9.680	\$ 9.766
1	2	\$ 9.680	\$ 9.766
2	1	\$ 9.449	\$ 9.684
2	2	\$ 9.449	\$ 9.684

Fuente: elaboración propia.

Tabla 33. Costo fijo de cambio de partida de la planta sobre el recurso de producción del producto en el periodo

CFCP(p,q,j,t) Costo Fijo de Cambio de Partida de la Planta sobre el Recurso de Producción del producto en el periodo (\$ por Saco)								
p	q	j	1	2	3	4	5	6
1	Q1	A	0	0	0	0	0	0
1	Q1	B	0	0	0	0	0	0
1	Q2	A	0	0	0	0	0	0
1	Q2	B	0	0	0	0	0	0
2	Q1	A	0	0	0	0	0	0
2	Q1	B	0	0	0	0	0	0
2	Q2	A	0	0	0	0	0	0
2	Q2	B	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla 34. Costo por unidad de fabricación del producto utilizando tiempo regular en la planta sobre el recurso de producción en el periodo

CUFPN(p,q,j,t) Costo por Unidad de Fabricación del producto utilizando tiempo regular en la Planta sobre el Recurso de Producción en el periodo (\$ por Saco)								
p	q	j	1	2	3	4	5	6
1	Q1	A	\$ 4.374	\$ 4.577	\$ 4.741	\$ 4.316	\$ 4.697	\$ 4.588
1	Q1	B	\$ 4.340	\$ 4.250	\$ 4.843	\$ 4.078	\$ 4.514	\$ 4.472
1	Q2	A	\$ 4.505	\$ 4.848	\$ 4.104	\$ 4.282	\$ 4.591	\$ 4.087
1	Q2	B	\$ 4.751	\$ 4.508	\$ 4.446	\$ 4.972	\$ 4.824	\$ 4.269
2	Q1	A	\$ 4.737	\$ 4.201	\$ 4.693	\$ 4.351	\$ 4.031	\$ 4.525
2	Q1	B	\$ 4.710	\$ 4.224	\$ 4.940	\$ 4.739	\$ 4.383	\$ 4.660
2	Q2	A	\$ 4.241	\$ 4.320	\$ 4.068	\$ 4.738	\$ 4.033	\$ 4.724
2	Q2	B	\$ 4.972	\$ 4.449	\$ 4.779	\$ 4.706	\$ 4.402	\$ 4.409

Fuente: elaboración propia.

Tabla 35. Costo por unidad de fabricación del producto utilizando tiempo extra en la planta sobre el recurso de producción en el periodo

CUFPEX (p,q,j,t) Costo por Unidad de Fabricación del producto utilizando tiempo extra en la Planta sobre el Recurso de Producción en el periodo (\$ por Saco)								
p	q	j	1	2	2	2	2	2
1	Q1	A	\$ 14.374	\$ 14.577	\$ 4.741	\$ 4.316	\$ 4.697	\$ 4.588
1	Q1	B	\$ 14.340	\$ 14.250	\$ 4.843	\$ 4.078	\$ 4.514	\$ 4.472
1	Q2	A	\$ 14.505	\$ 14.848	\$ 4.104	\$ 4.282	\$ 4.591	\$ 4.087
1	Q2	B	\$ 14.751	\$ 14.508	\$ 4.446	\$ 4.972	\$ 4.824	\$ 4.269
2	Q1	A	\$ 14.737	\$ 14.201	\$ 4.693	\$ 4.351	\$ 4.031	\$ 4.525
2	Q1	B	\$ 14.710	\$ 4.224	\$ 4.940	\$ 4.739	\$ 4.383	\$ 4.660
2	Q2	A	\$ 14.241	\$ 4.320	\$ 4.068	\$ 4.738	\$ 4.033	\$ 4.724
2	Q2	B	\$ 14.972	\$ 4.449	\$ 4.779	\$ 4.706	\$ 4.402	\$ 4.409

Fuente: elaboración propia.

Tabla 36. Costo por unidad del producto subcontratada por la planta

CUSUBP(p,j) Costo por unidad del producto subcontratada por la Planta (\$ por Saco)		
	A	B
1	15000	15000
2	15500	15500

Fuente: elaboración propia.

Tabla 37. Costo por unidad de transporte del producto desde la planta al centro de distribución

CUTPD(p,d,j) Costo por Unidad de Transporte del producto desde la Planta al Centro de Distribución (\$ por Saco)			
p	d	A	B
1	1	\$ 517	\$ 517
1	2	\$ 562	\$ 562
2	1	\$ 595	\$ 595
2	2	\$ 598	\$ 598

Fuente: elaboración propia.

Tabla 38. Costo por unidad de manipulación del producto en la planta

CUMP(p,j) Costo por Unidad de Manipulación del producto en la Planta (\$ por Saco)		
p	A	B
1	\$ 397	\$ 397
2	\$ 338	\$ 338

Fuente: elaboración propia.

Tabla 39. Costo por unidad de inventario sobrante del producto en la planta

CUISOBP(p,j) Costo por Unidad de Inventario Sobrante del producto en la Planta (\$ por Saco)		
p	A	B
1	\$ 444	\$ 444
2	\$ 482	\$ 482

Fuente: elaboración propia.

Tabla 40. Costo por unidad de inventario faltante del producto en la planta

CUIFALP(p,j) Costo por Unidad de Inventario Faltante del producto en la Planta (\$ por Saco)		
p	A	B
1	\$ 3.872	\$ 3.907
2	\$ 3.890	\$ 3.937

Fuente: elaboración propia.

Tabla 41. Costo por Unidad de desechar defectuoso de producto en la Planta

CUDEFP(p,j) Costo por Unidad de desechar defectuoso de producto en la Planta (\$ por Saco)		
p	A	B
1	\$ 244	\$ 244
2	\$ 215	\$ 215

Fuente: elaboración propia.

Tabla 42. Nivel de inventario inicial de producto en la planta

NIPinc(p,j) Nivel de Inventario inicial de producto en la Planta (Sacos)		
p	A	B
1	275	427
2	239	226

Fuente: elaboración propia.

Tabla 43. Nivel de capacidad de transporte en la planta desde la planta hasta el centro de distribución para el producto

NCTPD(p) Nivel de Capacidad de Transporte desde la Planta hasta el Centro de Distribución para el producto (Sacos)			
p	d	A	B
1	1	\$ 10.026	\$ 10.926
1	2	\$ 19.026	\$ 10.926
2	1	\$ 10.910	\$ 10.910
2	2	\$ 10.910	\$ 10.910

Fuente: elaboración propia.

Tabla 44. Capacidad máxima de fabricación utilizando tiempo regular en la planta sobre el recurso de producción en el periodo de tiempo

MCFPN(p,q,t) Capacidad Máxima de fabricación utilizando tiempo regular en la Planta p sobre el Recurso de Producción en el periodo de tiempo t							
p	q	1	2	3	4	5	6
1	Q1	10547	10562	10512	10684	10563	50522
1	Q2	10573	10559	10540	10681	10547	10554
2	Q1	10543	10563	10565	10688	10591	10592
2	Q2	10537	10554	10597	10669	10576	10524

Fuente: elaboración propia.

Tabla 45. Capacidad máxima de fabricación utilizando tiempo extra en la planta sobre el recurso de producción en el periodo de tiempo

MCFPN(p,q,t) Capacidad Máxima de fabricación utilizando tiempo extra en la Planta sobre el Recurso de Producción en el periodo de tiempo							
p	q	1	2	3	4	5	6
1	Q1	547	562	512	684	563	522
1	Q2	573	559	540	681	547	554
2	Q1	543	563	565	688	591	592
2	Q2	537	554	597	669	576	524

Fuente: elaboración propia.

Tabla 46. Capacidad máxima de entrada de transporte en la planta

CMETP(p) Capacidad Máxima de Entrada de Transporte en la Planta (Ton)	
p	
1	49580
2	49200

Fuente: elaboración propia.

Tabla 47. Capacidad máxima de salida de transporte en la planta

CMSTP(p) Capacidad Máxima de Salida de Transporte en la Planta (Sacos)	
p	
1	48643
2	42249

Fuente: elaboración propia.

Tabla 48. Capacidad máxima de inventario en la planta

CMIP(p) Capacidad Máxima de Inventario en la Planta (Sacos)	
p	
1	89580
2	89200

Fuente: elaboración propia.

Tabla 49. Fracción de defectuosos para el producto en la planta

BETA(p,j) Fracción de defectuosos para el producto en la Planta		
p	A	B
1	0.012	0.011
2	0.010	0.009

Fuente: elaboración propia.

Tabla 50. Tasa de detección de producto defectuoso en la planta

ratep(p,j) Tasa de detección de Producto defectuoso en la Planta		
p	A	B
1	0,99	0,98
2	0,97	0,99

Fuente: elaboración propia.

Tabla 51. Tasa de detección de artículos defectuosos de materia prima detectado en la planta

tasap(p,m) Tasa de detección de artículos defectuosos de Materia Prima detectado en la Planta				
p	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	0,99	0,97	0,99	0,98
2	0,98	0,98	0,97	0,97

Fuente: elaboración propia.

Tabla 52. Unidad de unidad de materia prima necesarias para la fabricación del producto

MA (j,m) Unidad de Materia Prima necesarias para la fabricación del Producto (Sacos)				
p	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
A	0,0025	0,0095	0,038	0,002
B	0,0025	0,007	0,0405	0,002

Fuente: elaboración propia.

Tabla 53. Porcentaje para definir la cantidad a subcontratar a partir de la cantidad a fabricar del producto en la planta

PQSP(p,j) Porcentaje para definir la Cantidad a Subcontratar a partir de la cantidad a Fabricar del Producto en la Planta		
p	A	B
1	0,1	0,1
2	0,1	0,1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 54. Periodo de tiempo de Transporte desde la Planta hasta el Centro de Distribución

TTPD(p,d) Periodo de tiempo de Transporte desde la Planta hasta el Centro de Distribución		
p	1	2
1	0	0
2	0	0

Fuente: elaboración propia.

- **Centro de distribución** (ver Tablas 55 a 66)

Tabla 55. Precio unitario del producto del distribuidor al detallista

PUPDR(d,r,j) Precio Unitario del Producto desde el Centro de Distribución al Detallista (\$ por Saco)			
d	r	A	B
1	1	\$ 17.216	\$ 17.365
1	2	\$ 17.216	\$ 17.365
2	1	\$ 17.296	\$ 17.500
2	2	\$ 17.296	\$ 17.500

Fuente: elaboración propia.

Tabla 56. Costo por unidad de transporte del producto desde el centro de distribución al detallista

CUTDR(d,r,j) Costo por Unidad de Transporte del producto desde el Centro de Distribución al Detallista (\$ por Saco)			
d	r	A	B
1	1	\$ 314	\$ 314
1	2	\$ 338	\$ 338
2	1	\$ 315	\$ 315
2	2	\$ 342	\$ 342

Fuente: elaboración propia.

Tabla 57. Costo por unidad de manipulación del producto en el centro de distribución

CUMD(d,j) Costo por Unidad de Manipulación del producto en el Centro de Distribución (\$ por Saco)		
d	A	B
1	\$ 22	\$ 22
2	\$ 23	\$ 23

Fuente: elaboración propia.

Tabla 58. Costo por unidad de inventario sobrante del producto en el centro de distribución

CUISOBD(d,j) Costo por Unidad de Inventario Sobrante del producto en el Centro de Distribución (\$ por Saco)		
d	A	B
1	\$ 69	\$ 69
2	\$ 69	\$ 69

Fuente: elaboración propia.

Tabla 59. Costo por unidad de inventario faltante del producto en el centro de distribución

CUIFALD(d,j) Costo por Unidad de Inventario Faltante del producto en el Centro de Distribución (\$ por Saco)				
d	A		B	
1	\$	5.165	\$	5.209
2	\$	5.189	\$	5.250

Fuente: elaboración propia.

Tabla 60. Costo por unidad de desechar defectuoso del producto en el centro de distribución

CUDEFD(d,j) Costo por Unidad de desechar defectuoso de producto en el Centro de Distribución (\$ por Saco)				
d	A		B	
1	\$	840	\$	840
2	\$	820	\$	820

Fuente: elaboración propia.

Tabla 61. Nivel de inventario inicial de producto en el centro de distribución

NIDinc(d,j) Nivel de Inventario inicial de producto en el Centro de Distribución (Sacos)		
d	1	2
1	1250	700
2	1000	820

Fuente: elaboración propia.

Tabla 62. Nivel de capacidad de transporte del producto desde el centro de distribución al detallista

NIDinc(d,j) Nivel de Inventario inicial de producto en el Centro de Distribución (Sacos)		
d	1	2
1	1250	700
2	1000	820

Fuente: elaboración propia.

Tabla 63. Capacidad máxima de inventario en el centro de distribución

CMID(d) Capacidad Máxima de Inventario en el Centro de Distribución (Sacos)	
d	
1	5.800
2	6.200

Fuente: elaboración propia.

Tabla 64. Capacidad máxima de salida de transporte en el centro de distribución

CMSTD(d) Capacidad Máxima de Salida de Transporte en el Centro de Distribución (Sacos)	
d	
1	15.800
2	16.200

Fuente: elaboración propia.

Tabla 65. Tasa de detección de producto defectuoso en el centro de distribución

tasad(d,j) Tasa de detección de Producto defectuoso en el Centro de Distribución		
d	A	B
1	0,99	0,97
2	0,98	0,99

Fuente: elaboración propia.

Tabla 66. Periodo de tiempo de transporte desde el centro de distribución hasta el detallista

TTDR(d,r) Periodo de tiempo de Transporte desde el Centro de Distribución hasta el Detallista		
d	1	2
1	0	0
2	0	0

Fuente: elaboración propia.

- **Detallistas** (ver Tablas 67 a 73).

Tabla 67. Precio unitario del producto desde el detallista al cliente

PUPRC(r,c,j) Precio Unitario del Producto desde el Detallista al Cliente (\$ por Saco)					
r	c	A		B	
1	1	\$	21.813	\$	22.007
1	2	\$	21.813	\$	22.007
1	1	\$	21.913	\$	22.178
1	2	\$	21.913	\$	22.178

Fuente: elaboración propia.

Tabla 68. Costo por unidad de manipulación del producto en el detallista

CUMR(r,j) Costo por Unidad de Manipulación del producto en el Detallista (\$ por Saco)		
r	A	B
1	\$ 13	\$ 13
2	\$ 13	\$ 13

Fuente: elaboración propia.

Tabla 69. Costo por unidad de inventario sobrante del producto en el detallista

CUISOBR(r,j) Costo por Unidad de Inventario Sobrante del producto en el Detallista (\$ por Saco)		
r	A	B
1	\$ 87	\$ 88
2	\$ 88	\$ 89

Fuente: elaboración propia.

Tabla 70. Costo por unidad de inventario faltante del producto en el detallista

CUIFALR(r,j) Costo por Unidad de Inventario Faltante del producto en el Detallista (\$ por Saco)			
c	j	1	2
1	A	\$ 6.544	\$ 6.602
2	B	\$ 6.574	\$ 6.653

Fuente: elaboración propia.

Tabla 71. Nivel de inventario inicial de producto en el detallista

NIRinc(r,j) Nivel de Inventario inicial de producto en el Detallista (Sacos)		
r	A	B
1	200	250
2	220	240

Fuente: elaboración propia.

Tabla 72. Capacidad máxima de inventario en el detallista

CMIR(r) Capacidad Máxima de Inventario en el Detallista (Sacos)	
r	
1	15.800
2	16.200

Fuente: elaboración propia.

Tabla 73. Capacidad máxima de salida de transporte en el detallista

CMSTR(r) Capacidad Máxima de Salida de Transporte en el Detallista (Sacos)	
r	
1	15.800
2	16.200

Fuente: elaboración propia.

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

Considerando los principales proveedores de materia prima (Yeso, Escoria y Clinker y empaques), las plantas de mayor producción de cemento del grupo al que pertenece la empresa objeto de estudio, dos distribuidores nacionales independientes que son abastecidos por las plantas, dos recursos de producción, dos productos finales, dos centros de distribución que son las compañías nacionales que comercializan el mayor volumen de producto y dos detallistas que despachan a pequeños constructores y maestros de obra, se valida la propuesta de modelado para la planificación maestra de operaciones de la cadena de suministros en contexto de incertidumbre a través de los datos de la empresa cementera objeto de la aplicación.

En enfoques de demanda determinística y demanda bajo incertidumbre, el modelo ha utilizado los mismos Parámetros y Tablas, exceptuando la demanda y la inclusión de la probabilidad en los escenarios.

La propuesta de modelado para la planificación maestra de operaciones en la gestión de la cadena de suministros en el contexto de incertidumbre busca la maximización del margen de beneficios de todos los eslabones de la cadena de suministro y cuya validación es realizada a través de los datos de la empresa cementera objeto de la aplicación.

El modelo se solucionó a través de GAMS (General Algebraic Modeling System) bajo el solver XPRESS, así mismo se procesaron los datos en Neos Solvers soporte. Para la demanda determinística (ver Figura 15, Figura 16 y Anexo 1). Para la demanda con incertidumbre (ver Figura 17, Figura 18 y Anexo 2).

Los resultados son una validación práctica de la propuesta de modelado y el análisis que se desarrolla evalúa el comportamiento del modelo.

Figura 15. Resumen GAMS utilizando solver XPRESS

```

IDE No active process
modelo final proyecto de alina - 24-dic 2015 finalalina modelo final proyecto de alina - 24-dic 2015 final
Uncrunching matrix
fixing discrete vars and re-solving as an LP.
Maximizing LP Proveedores
Original problem has:
  1380 rows      1592 cols      5240 elements
Resolved problem has:
  288 rows       540 cols       2240 elements

Its      Obj Value      S      Ninf  Nneg      Sum Inf  Time
0        .000000      p      20    15      7253.000000  0
497      5122088349.      p      0     0        .000000  0
Uncrunching matrix
497      5122088349.      p      0     0        .000000  0
Optimal solution found

fixed LP solved successfully, objective = 5122088349.09.

Integer solution proven optimal.

MIP solution : 5122088349.092892
Best possible : 5122088349.092892
Absolute gap : 0.000000      optca : 0.000000
Relative gap : 0.000000      optcr : 0.100000

--- Restarting execution
--- MODELO FINAL PROYECTO DE ALINA - 24-DIC 2015 Final.gms(727) 0 Mb
--- Reading solution for model Proveedores
*** Status: Normal completion
--- Job MODELO FINAL PROYECTO DE ALINA - 24-DIC 2015 Final.gms Stop 01/30/16 17:01:53 elapsed 0:00:00.395
  
```

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Resumen GAMS utilizando Neos Solvers soporte web

```

EXECUTION TIME      =      0.005 SECONDS      4 MB  24.5.6 r55090 LEX-LEG
GAMS 24.5.6 r55090 Released Nov 27, 2015 LEX-LEG x86 64bit/Linux 02/06/16 19:47:01 Page 3
General Algebraic Modeling System
Solution Report      SOLVE Proveedores Using MIP From line 719

      S O L V E      S U M M A R Y

MODEL  Proveedores      OBJECTIVE  BT
TYPE   MIP              DIRECTION  MAXIMIZE
SOLVER XPRESS          FROM LINE  719

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    5122088349.0929

RESOURCE USAGE, LIMIT      0.024      1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT    400      2000000000

FICO-Xpress      24.5.6 r55090 Released Nov 27, 2015 LEG x86 64bit/Linux

Xpress Optimizer 28.01
Xpress-Optimizer 64-bit v28.01.05 (Hyper capacity)
fixing discrete vars and re-solving as an LP.
fixed LP solved successfully, objective = 5122088349.09.
Integer solution proven optimal.
MIP solution : 5122088349.092892
Best possible : 5122088349.092893
Absolute gap : 0.000001      optca : 0.000000
Relative gap : 0.000000      optcr : 0.100000
  
```

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Resumen GAMS bajo incertidumbre utilizando solver XPRESS

```

fixing discrete vars and re-solving as an LP.
Maximizing LP Proveedores
Original problem has:
    4263 rows      4203 cols      16827 elements
Presolved problem has:
    864 rows      1620 cols      6720 elements

    Its      Obj Value      S      Ninf      Nneg      Sum Inf      Time
    0          .000000      p      60      19      21759.00000      0
    1467      4908922878.      p      0      0          .000000      0
Uncrunching matrix
    1467      4908922878.      p      0      0          .000000      0
Optimal solution found

fixed LP solved successfully, objective = 4908922878.5.

Integer solution proven optimal.

MIP solution : 4908922878.497942
Best possible : 4908922878.497945
Absolute gap : 0.000003      optca : 0.000000
Relative gap : 0.000000      optcr : 0.100000

--- Restarting execution
--- MODELO FINAL PROYECTO DE ALINA - 24-DIC 2015 Final - ESCENARIOS.gms (748) 0 Mb
--- Reading solution for model Proveedores

```

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Resumen GAMS bajo incertidumbre utilizando Neos Solvers soporte web

```

GENERATION TIME      =      0.014 SECONDS      5 MB 24.5.6 r55090 LEX-LEG

EXECUTION TIME      =      0.014 SECONDS      5 MB 24.5.6 r55090 LEX-LEG
GAMS 24.5.6 r55090 Released Nov 27, 2015 LEX-LEG x86 64bit/Linux 02/06/16 12:22:07 Page 3
General Algebraic Modeling System
Solution Report      SOLVE Proveedores Using MIP From line 753

          S O L V E      S U M M A R Y

MODEL Proveedores      OBJECTIVE BTESP
TYPE MIP                DIRECTION MAXIMIZE
SOLVER XPRESS          FROM LINE 753

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    4908922878.4979

RESOURCE USAGE, LIMIT      0.076      1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT    395      2000000000

FICO-Xpress      24.5.6 r55090 Released Nov 27, 2015 LEG x86 64bit/Linux

Xpress Optimizer 28.01
Xpress-Optimizer 64-bit v28.01.05 (Hyper capacity)
fixing discrete vars and re-solving as an LP.
fixed LP solved successfully, objective = 4908922878.5.
Integer solution proven optimal.
MIP solution : 4908922878.497942
Best possible : 4908922878.497945
Absolute gap : 0.000003      optca : 0.000000
Relative gap : 0.000000      optcr : 0.100000

```

Fuente: elaboración propia.

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA BAJO INCERTIDUMBRE DE UN SISTEMA DE PLANIFICACIÓN EN CADENAS DE SUMINISTRO COLABORATIVA

El modelo entrega para la demanda determinística las cantidades de materia prima a comprar (Tabla 74) y a despachar por parte de los proveedores a las plantas de producción (Tabla 75) y totaliza las cantidades transportadas por proveedor hacia las respectivas plantas (Tabla 77). A su vez calcula los productos terminados a producir por cada recurso de producción por periodo (Tabla 76), en jornada normal (Tabla 78) y extra (Tabla 79), así como las cantidades totales a producir del producto para cada una de las plantas (Tabla 80).

De igual manera suministra las cantidades a transportar desde las plantas a los centros de distribución, en la Tabla 81, su totalización por planta en la tabla 82 y las cantidades a entregar de los distribuidores a los detallistas (Tabla 83), la totalidad de las cantidades a transportar desde el centro de distribución en la tabla 84 y la cantidad de producto desde los detallistas a los clientes (Tabla 85) así como su totalidad en la tabla 86.

Tabla 74. Cantidad de materia prima a comprar por el proveedor en el periodo

		QS (s,m,t) Cantidad de Materia Prima compradas por el Proveedor en el periodo (Ton)					
s	m	1	2	3	4	5	6
1	YESO	48	110	57	73	80	
1	ESCORIA	95	354	213	244	271	
1	CLINKER	491	1.729	857	1.135	1.243	
1	SACO	34	88	45	58	64	
2	YESO	38	110	57	73	80	
2	ESCORIA	131	356	214	245	272	
2	CLINKER	527	1.736	861	1.139	1.248	
2	SACO	42	88	45	58	64	

Fuente: elaboración propia.

A partir del proceso colaborativo de compartir información entre los miembros de la cadena de suministros, los proveedores compran materias primas para despachar a las plantas dependiendo de las cantidades que la planta requiera como entrada para producir sus productos.

La materia prima que se requiere que los proveedores compren en mayor cantidad para despachar a la planta es el Clinker, por ser el componente del producto de mayor presencia. Por cada producto A son necesarias 0,038 unidades de Clinker, 0,0095 de Escoria, 0,0025 de Yeso y 0,002 Sacos. Para el caso del Producto B se necesitan 0,0405 de Clinker, 0,007de Escoria, 0,0025 de Yeso y 0,002 Sacos. El proveedor 2 es quien más cantidad de materia prima compra y somete a su proceso de fabricación.

Tabla 75. Materia prima a transportar desde el proveedor a la planta en el periodo

QTSP (s,p,m,t) Materia Prima a transportar desde el Proveedor a la Planta en el periodo (Ton)								
s	p	m	1	2	3	4	5	6
1	1	YESO	53	53	28	57	23	
1	1	ESCORIA	189	194	105	199	87	
1	1	CLINKER	815	810	421	881	349	
1	1	SACO	42	42	22	45	18	
1	2	YESO	14	56	28	15	56	
1	2	ESCORIA	40	156	105	42	180	
1	2	CLINKER	232	900	427	241	880	
1	2	SACO	11	44	22	12	45	
2	1	YESO	53	53	28	57	23	
2	1	ESCORIA	189	194	105	199	87	
2	1	CLINKER	815	810	421	881	349	
2	1	SACO	42	42	22	45	18	
2	2	YESO	14	56	28	15	56	
2	2	ESCORIA	40	156	105	42	180	
2	2	CLINKER	232	900	427	241	880	
2	2	SACO	11	44	22	12	45	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 76. Cantidad de transporte total desde el proveedor a la planta en el periodo

QTTSP(s,p,t) Cantidad de transporte Total desde el Proveedor a la Planta en el periodo (Ton)							
s	p	1	2	3	4	5	6
1	1	1.098	1.098	576	1.182	478	
1	2	298	1.156	582	310	1.161	
2	1	1.098	1.098	576	1.182	478	
2	2	298	1.156	582	310	1.161	

Fuente: elaboración propia.

La transparencia en la información que se comparte permite reducir la incertidumbre y contar con datos veraces, por lo cual el modelo establece las cantidades a transportar desde el proveedor a la planta. La planta 1 recibe una cantidad superior de materia prima que la planta 2.

En caso de que la demanda hubiese sido mayor a la establecida en esta validación, el modelo prevé inicialmente comprar a quien ofrezca menor precio y las cantidades restantes al segundo proveedor.

Tabla 77. Cantidad a producir del producto en la planta sobre el recurso de producción en el periodo

QPP (p,q,j,t) Cantidad a producir del producto en la Planta sobre el Recurso de Producción en el periodo (Sacos)							
p	q	j	1	2	3	4	5
1	Q1	A	5.755	10.562		4.600	
1	Q1	B	4.792			6.768	
1	Q2	A	10.573	7.748	11.080	11.362	9.187
1	Q2	B		2.811			
2	Q1	A					
2	Q1	B	5.739	11.126			11.182
2	Q2	A		216	10.589		9.620
2	Q2	B		10.892	605	5.960	1.532

Fuente: elaboración propia.

Tabla 78. Cantidad a producir en tiempo normal en la planta sobre el recurso de producción en el periodo

QPPN (p,q,j,t) Cantidad a producir del producto en tiempo Normal en la Planta sobre el Recurso de Producción en el periodo (Sacos)								
p	q	j	1	2	3	4	5	6
1	Q1	A	5.755	10.562		3.916		
1	Q1	B	4.792			6.768		
1	Q2	A	10.573	7.748	10.540	10.681	8.640	
1	Q2	B		2.811				
2	Q1	A						
2	Q1	B	5.739	10.563			10.591	
2	Q2	A			10.589		9.620	
2	Q2	B		10.554	8	5.960	956	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 79. Cantidad a producir en tiempo extra en la planta sobre el recurso de producción en el periodo

QPPEX(p,q,j,t) Cantidad a producir del producto en tiempo Extra en la Planta sobre el Recurso de Producción en el periodo (Sacos)								
p	q	j	1	2	3	4	5	6
1	Q1	A				684		
1	Q1	B						
1	Q2	A			540	681	681	
1	Q2	B						
2	Q1	A						
2	Q1	B		563			591	
2	Q2	A		216				
2	Q2	B		338	597		576	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 80. Cantidad a producir en la planta en el periodo

QP(p,j,t) Cantidad a producir del producto en la Planta en el periodo (Sacos)							
p	j	1	2	3	4	5	6
1	A	16.328	18.310	11.080	15.962	9.187	
1	B	4.792	2.811		6.768		
2	A		216	10.589		9.620	
2	B	5.739	22.018	605	5.960	12.714	

Fuente: elaboración propia.

La planta 1 es quien mayor cantidad de productos elabora enfocándose mayormente en el producto A por presentar una mayor demanda por parte del cliente, adicionalmente los costos unitarios de fabricación de este son menores que los del producto B. Las plantas distribuyen su producción entre los recursos Q1 y Q2, fabricando mayores cantidades en Q2 para los periodos 3 y 4 dado que estos presentan los costos más bajos de fabricación respecto a otros periodos.

Tabla 81. Cantidad de producto a transportar desde la planta al centro de distribución en el periodo

QTPD(p,d,j,t) Cantidad de producto a transportar desde la Planta al Centro de Distribución en el periodo (Sacos)								
p	d	j	1	2	3	4	5	6
1	1	A	7.750	9.000	10.026	7.974	9.000	9.000
1	1	B	5.166	1.090		6.200		1.090
1	2	A	8.361	9.386	921	7.796	77	9.600
1	2	B		1.690		494		1.690
2	1	A						
2	1	B	334	10.910	400		6.200	10.910
2	2	A	239	214	10.483		9.523	
2	2	B	5.580	10.910	200	5.906	6.400	10.910

Fuente: elaboración propia.

Tabla 82. Cantidad de transporte total desde la planta al centro de distribución en el periodo

QTPD(p,d,t) Cantidad de transporte Total desde la Planta al Centro de Distribución en el periodo (Sacos) (Ton)							
p	d	1	2	3	4	5	6
1	1	12.916	10.090	10.026	14.174	9.000	10.090
1	2	8.361	11.076	921	8.290	77	11.290
2	1	334	10.910	400		6.200	10.910
2	2	5.819	11.124	10.683	5.906	15.923	10.910

Fuente: elaboración propia.

Se transporta producto terminado a los centros de distribución D1 y D2 respectivamente, siendo la planta 1 la que mayor cantidad de producto transporta, haciéndolo hacia el centro de distribución D2 en una proporción más alta que a D1. Hasta este momento se ha producido mayor cantidad del producto A y se ha entregado hasta los centros de distribución una mayor cantidad del mismo respecto al producto B.

Es importante aclarar que el producto es almacenado en silos y luego empacado en bolsas que se almacenan en la planta o se despachan directamente a camiones que van hasta el centro de distribución; sin embargo, su rotación es alta.

Tabla 83. Cantidad de producto a transportar desde el centro de distribución al detallista en el periodo

QTDR(d,r,j,t) Cantidad de producto a transportar desde el Centro de Distribución al Detallista en el periodo (Sacos)								
d	r	j	1	2	3	4	5	6
1	1	A	3.400	3.400	3.400	3.400	3.400	3.400
1	1	B	3.400	3.400	3.400	3.400	3.400	3.400
1	2	A	5.600	5.600	5.600	5.600	5.600	5.600
1	2	B	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800
2	1	A	4.400	4.400	4.400	4.400	4.400	4.400
2	1	B	3.800	3.800	3.800	3.800	3.800	3.800
2	2	A	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200
2	2	B	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600

Fuente: elaboración propia.

Tabla 84. Cantidad de transporte total desde el centro de distribución al detallista en el periodo

QTTDR(d,r,t) Cantidad de transporte Total desde el Centro de Distribución al Detallista en el periodo (Sacos)							
d	r	1	2	3	4	5	6
1	1	6.800	6.800	6.800	6.800	6.800	6.800
1	2	8.400	8.400	8.400	8.400	8.400	8.400
2	1	8.200	8.200	8.200	8.200	8.200	8.200
2	2	7.800	7.800	7.800	7.800	7.800	7.800

Fuente: elaboración propia.

A los detallistas se les transporta desde los centros de distribución el producto A en mayor cantidad con respecto al producto B. El detallista 2 recibe una mayor cantidad de productos que el detallista 1, debido a que el precio de venta de producto A desde los centros de distribución a los detallistas es mayor que el del producto B, especialmente desde D2 a R2 y a su vez como ya se dijo la demanda del producto A es mayor que la del producto B.

Tabla 85. Cantidad de producto a transportar desde el detallista al cliente en el periodo

QTRC(r,c,j,t) Cantidad de producto a transportar desde el Detallista al Cliente c en el periodo (Sacos)								
r	c	j	1	2	3	4	5	6
1	1	A	740		4.200		6.740	4.200
1	1	B	2.820	1.740		5.600	6.060	4.600
1	2	A	10.000	5.060	3.200	8.200		7.000
1	2	B	2.240	9.000	8.400			
2	1	A	11.020	1.000	10.800	10.000	1.260	10.800
2	1	B	5.180	5.860	5.400	2.400	940	4.400
2	2	A		9.340		800	10.000	
2	2	B				3.000	4.000	1.000

Fuente: elaboración propia.

Tabla 86. Cantidad de transporte total desde el detallista al cliente en el periodo

QTTRC(r,c,t) Cantidad de transporte Total desde el Detallista al Cliente en el periodo (Sacos)							
r	c	1	2	3	4	5	6
1	1	3.560	1.740	4.200	5.600	12.800	8.800
1	2	12.240	14.060	11.600	8.200		7.000
2	1	16.200	6.860	16.200	12.400	2.200	15.200
2	2		9.340		3.800	14.000	1.000

Fuente: elaboración propia.

Al cliente le es suministrado desde los detallistas en mayor cantidad el producto A que corresponde al 61% del total de las cantidades transportadas, mientras que del producto B se transporta el 38%. El detallista 1 es quien suministra las mayores cantidades de producto B mientras que el detallista 2 abastece en mayor proporción el producto A.

Dados unos inventarios iniciales, unas cantidades transportadas desde cada etapa hacia la siguiente, el modelo calcula los mejores niveles de inventarios finales tanto

de las materias primas como de los productos terminados (Tablas 87 a 91) que puedan no sólo minimizar los costos por almacenamiento sino también cumplir con la demanda y en definitiva maximizar los beneficios a lo largo de toda la cadena de suministro.

Tabla 87. Nivel de inventario sobrante de producto en la planta para el periodo

NISOBP(p,j,t) Nivel de Inventario sobrante de producto en la Planta para el Periodo							
p	j	1	2	3	4	5	6
1	A	296					
1	B						
2	A						
2	B						

Fuente: elaboración propia.

Tabla 88. Nivel de inventario faltante de producto en la planta para el periodo

NIFALP(p,j,t) Nivel de Inventario faltante de producto en la Planta para el Periodo							
p	j	1	2	3	4	5	6
1	A						18.600
1	B						2.780
2	A						
2	B						21.820

Fuente: elaboración propia.

Tabla 89. Nivel de inventario sobrante de producto en el centro de distribución para el periodo

NISOBD(d,j,t) Nivel de Inventario sobrante de producto en el Centro de Distribución para el Periodo							
d	j	1	2	3	4	5	6
1	A			1.026			
1	B		5.800				5.800
2	A			1.804			
2	B		6.200				6.200

Fuente: elaboración propia.

Tabla 90. Nivel de inventario sobrante de producto en el detallista en el periodo

NISOBR(r,j,t) Nivel de Inventario sobrante de producto en el Detallista en el Periodo							
r	j	1	2	3	4	5	6
1	A			400		1.060	
1	B	2.390				390	2.990
2	A		460	460	460		
2	B	460				460	460

Fuente: elaboración propia.

Tabla 91. Nivel de inventario faltante de producto en el detallista en el periodo

NIFALR(r,j,t) Nivel de Inventario faltante de producto en el Detallista en el Periodo							
r	j	1	2	3	4	5	6
1	A	2.740					2.340
1	B		1.150	2.350	750		
2	A						
2	B						

Fuente: elaboración propia.

Los niveles de inventario sobrante son el resultado de la menor demanda en los periodos y de mayor producción en los mismos, el modelo se encarga de cumplir con la demanda y en los casos en donde la demanda supera la cantidad disponible se genera un inventario faltante que conceptualmente es la escasez del producto cuando el cliente lo requiere. Estos niveles de inventarios obtenidos están amarrados a unos costos de almacenamiento por los sobrantes y unos costos por los faltantes.

Como se observa en la Tabla 92, el modelo entrega los costos totales asociados al proveedor y que hacen parte del cálculo de maximización total de la cadena. Así mismo, se muestran los beneficios obtenidos por cada proveedor en su respectivo periodo.

Los costos más significativos en los proveedores se ven representados en los costos de fabricación de la materia prima necesarias para despachar a la planta. Los costos de la materia prima en el proveedor 2 son más altos en el proveedor 1.

En cuanto a los costos totales de transporte, estos dependerán de las cantidades que se despachan desde los proveedores a las plantas y en la medida en que se transporte la mayor cantidad de material las ventas totales serán más altas. Los costos totales de transporte son más altos en el proveedor 2 dado que éste maneja unos costos unitarios de transporte más altos desde la planta 2 a la planta 1.

Para el caso de los costos asociados a la detección de materia prima defectuosa en el proveedor estos fueron más altos en S2 ya que se manipula una mayor cantidad de materia prima especialmente de escoria, clinker y sacos que asociarla a su tasa de detección y sus costos unitarios representan un valor más alto.

Respecto a los costos por manipulación, éstos dependerán de igual forma de las cantidades que se manipulen y de los costos unitarios asociados a cada material. Es el proveedor 2 quien presenta también costos por encima de los calculados para el proveedor 1 debido a que maneja mayores cantidades de escoria, clinker y sacos cuyos costos de manipulación son más altos.

Hasta ahora es el proveedor 2 quien presenta los mayores costos respecto al proveedor 1, pero, a su vez es quien obtiene los mayores beneficios dado que sus ingresos totales por venta son mayores.

Es importante considerar que, al transportar la materia prima desde los proveedores a las plantas, éstas realizan su proceso de calidad y son capaces de detectar materia prima defectuosa que como supuesto de esta implementación establece que la concepción de defectos son menores al punto que generan condición de no rechazo y se entra en una negociación para que la planta compre al proveedor esta materia prima a un menor precio.

Este menor precio le permite de igual forma a los proveedores obtener una ganancia aún mayor que si decidiera la planta devolver el producto al proveedor, ya éste no sólo incurriría en costos adicionales de transporte por la devolución; sino también por verse obligado a disponer de la materia prima que la planta desechó.

Tabla 92. Costos totales y beneficios en el proveedor

BS (s) Beneficios esperados en el Proveedor en el periodo						
	1	2	3	4	5	6
VPS(s,t)	\$ 221.770.000	\$ 358.760.000	\$ 183.140.000	\$ 237.030.000	\$ 260.330.000	
VPDEFS(s,t)	\$ 4.002.100	\$ 6.444.400	\$ 3.301.600	\$ 4.276.300	\$ 4.670.800	
CTCS(s,t)	\$ (10.072.000)	\$ (28.294.000)	\$ (14.536.000)	\$ (18.808.000)	\$ (20.655.000)	
CTTS(s,t)	\$ (5.918.500)	\$ (9.519.200)	\$ (4.950.800)	\$ (6.314.800)	\$ (6.950.000)	
CTDEFS(s,t)	\$ (3.122)	\$ (10.546)	\$ (5.383)	\$ (6.968)	\$ (7.652)	
CTMS(s,t)	\$ (1.022.700)	\$ (1.650.400)	\$ (848.450)	\$ (1.092.300)	\$ (1.200.200)	
BS (s)	\$ 208.755.778	\$ 325.730.254	\$ 166.100.967	\$ 215.084.232	\$ 236.187.948	\$ -

BS (s) Beneficios esperados en el Proveedor en el periodo						
	1	2	3	4	5	6
VPS(s,t)	\$ 221.070.000	\$ 357.640.000	\$ 182.580.000	\$ 236.280.000	\$ 259.530.000	
VPDEFS(s,t)	\$ 6.158.600	\$ 9.925.200	\$ 5.067.300	\$ 6.582.900	\$ 7.184.400	
CTCS(s,t)	\$ (12.073.000)	\$ (28.310.000)	\$ (14.544.000)	\$ (18.819.000)	\$ (20.667.000)	
CTTS(s,t)	\$ (5.979.800)	\$ (9.574.700)	\$ (4.983.600)	\$ (6.380.300)	\$ (6.972.100)	
CTDEFS(s,t)	\$ (4.033)	\$ (12.563)	\$ (6.418)	\$ (8.303)	\$ (9.118)	
CTMS(s,t)	\$ (1.151.400)	\$ (1.857.600)	\$ (955.910)	\$ (1.229.700)	\$ (1.351.200)	
BS (s)	\$ 208.020.367	\$ 327.810.337	\$ 167.157.372	\$ 216.425.597	\$ 237.714.982	\$ -

s	BS (s)
S1	\$ 1.151.859.178
S2	\$ 1.157.128.655

Fuente: elaboración propia.

Con respecto a los beneficios y costos totales en las plantas, el modelo calcula las cantidades que permiten obtener a lo largo de la cadena de suministro la maximización de los beneficios. Tal como se muestra en la Tabla 93, en la Planta; los costos de compra de materia prima representan una alta participación dentro de los costos, debido principalmente al alto precio de las mismas.

A su vez los costos de fabricación también son significativos dentro de los costos totales; ya que el proceso de fabricar cemento implica un alto consumo energético empleándose básicamente gas natural o carbón. La disminución en los costos de fabricación dependerá de la mejora de los procesos pues la posibilidad de recurrir a nuevas tecnologías es escasa.

El modelo no contempla la problemática interna referente a los procesos productivos de fabricación por lo cual sólo nos concentramos en los valores establecidos como costos de fabricación para cada recurso.

La compra de materia prima a los proveedores depende de las unidades necesarias de materia prima para producir el producto y el modelo recurrirá al proveedor que cuente en su inventario con la materia prima disponible. Los costos más altos de compra de materia prima los presenta la planta 1 quien es proveída en mayor proporción por el proveedor 2 tal como se enunció anteriormente. El precio de compra de la materia prima desde el proveedor 2 hasta la planta 1 es uno de los más altos.

En cuanto a los costos de fabricación, las plantas en la mayoría de los periodos dispusieron de la materia prima para producir sus productos. La planta 1 presentó los mayores costos por fabricación considerando que produjo una mayor cantidad de producto respecto a la planta 2 y que además utilizó ambos recursos de producción Q1 y Q2 tanto en jornada normal como jornada extra tal como lo muestra la tabla 78 y la tabla 79.

Por su parte los costos de transporte se vieron también incrementados en la planta 1 por los mayores despachos realizados hacia el centro de distribución 2. Los costos unitarios por transporte desde la planta 1 a los centros de distribución 1 y 2 son ligeramente más bajos que desde la planta 2.

Respecto a los costos por inventario sobrante se presentan en el periodo 1 en la planta 1 para el producto A ya que las cantidades producidas de éste superaron los requerimientos del periodo por parte de los centros de distribución. Sin embargo, en el periodo 6 de la misma planta se evidencian costos por inventario faltante ocasionados tanto por los productos A y B no sólo en la planta 1 sino también en la planta 2 para el producto B. Los costos unitarios de inventario sobrante en la planta 2 son más bajos que en la planta 1, pero, dado que las cantidades que sobraron en la planta 1 fueron mayores, el costo de este se vio incrementado.

Los costos de manipulación se ocasionan por el uso de montacargas para trasladar el producto desde la zona de cargue hasta el punto de almacenamiento temporal y/o desde la zona de cargue hasta los camiones para despacho. En este caso los costos no son representativos respecto a los ingresos totales. Sin embargo, en la planta 1 donde se muestran los mayores costos por este concepto.

Finalmente se evidencia que la planta 1 presenta unos ingresos superiores a los obtenidos por la planta 2, debido a que esta vendió una mayor cantidad a los centros de distribución principalmente del producto A. Adicionalmente, dada la negociación con los centros de distribución de venderle los productos que en sus puntos hayan detectado como defectuosos por el supuesto antes descrito, representó ingresos más altos en la planta 2, pero, estos no fueron suficientes para superar los ingresos totales por venta de productos conformes.

Tabla 93. Costos totales y beneficios en la planta

		BP (p) Beneficios esperados en la Planta en el periodo					
p		1	2	3	4	5	6
1	VPP(p,t)	\$ 543.740.000	\$ 540.930.000	\$ 279.790.000	\$ 574.030.000	\$ 231.980.000	\$ 546.390.000
1	VPDEFPP(p,t)	\$ 5.029.400	\$ 4.572.400	\$ 2.096.400	\$ 5.547.700	\$ 1.739.500	\$ 4.613.000
1	CTCP(p,t)	\$ (355.520.000)	\$ (355.150.000)	\$ (186.020.000)	\$ (382.930.000)	\$ (154.240.000)	
1	CTFP(p,t)	\$ (93.601.000)	\$ (98.577.000)	\$ (45.472.000)	\$ (96.106.000)	\$ (42.177.000)	
1	CTTP(p,t)	\$ (11.377.000)	\$ (11.441.000)	\$ (5.701.100)	\$ (11.987.000)	\$ (4.696.100)	\$ (11.562.000)
1	CTISOBP(p,t)	\$ (131.410)					
1	CTIFALP(p,t)						\$ (82.881.000)
1	CTIDFP(p,t)	\$ (60.670)	\$ (61.156)	\$ (32.442)	\$ (64.902)	\$ (26.899)	
1	CTMP(p,t)	\$ (8.998.700)	\$ (4.362.000)	\$ (4.574.700)	\$ (9.387.400)	\$ (3.793.100)	\$ (8.487.900)
1	BP (p)	\$ 79.080.620	\$ 75.911.244	\$ 40.086.158	\$ 79.102.398	\$ 28.786.401	\$ 448.072.100

		BP (p) Beneficios esperados en la Planta en el periodo					
p		1	2	3	4	5	6
2	VPP(p,t)	\$ 160.490.000	\$ 576.020.000	\$ 270.160.000	\$ 154.500.000	\$ 560.810.000	\$ 570.830.000
2	VPDEFPP(p,t)	\$ 1.265.400	\$ 4.260.300	\$ 5.937.700	\$ 1.132.500	\$ 7.683.100	\$ 4.141.600
2	CTCP(p,t)	\$ (97.485.000)	\$ (377.620.000)	\$ (188.070.000)	\$ (101.230.000)	\$ (377.480.000)	
2	CTFP(p,t)	\$ (27.032.000)	\$ (96.388.000)	\$ (45.968.000)	\$ (28.047.000)	\$ (94.552.000)	
2	CTTP(p,t)	\$ (3.678.300)	\$ (13.143.000)	\$ (6.626.200)	\$ (3.532.000)	\$ (13.211.000)	\$ (13.016.000)
2	CTISOBP(p,t)	\$ -	\$ -				
2	CTIFALP(p,t)						\$ (85.905.000)
2	CTIDFP(p,t)	\$ (11.105)	\$ (43.069)	\$ (23.937)	\$ (11.532)	\$ (45.284)	
2	CTMP(p,t)	\$ (5.893.400)	\$ (7.838.200)	\$ (3.942.700)	\$ (2.101.100)	\$ (7.870.200)	\$ (7.375.200)
2	BP (p)	\$ 27.655.595	\$ 85.248.031	\$ 31.466.863	\$ 20.710.868	\$ 75.334.616	\$ 468.675.400

p	BP (p)
P1	\$ 781.759.620
P2	\$ 741.931.671

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 94, se muestra el cálculo de los costos e ingresos totales generados en los centros de distribución, siendo los costos por compra de producto los más significativos tanto para D1 como para D2 teniendo en cuenta que estos no realizan ninguna modificación al producto, sólo lo reciben, lo almacenan y lo venden. El centro de distribución 2 presenta mayores costos de compra respecto al centro de distribución 1 recibiendo los productos desde la planta 1 tal como se mencionó anteriormente.

Los costos de transporte son más altos en el centro de distribución 2 por la mayor cantidad de producto que este envía hacia el detallista 2. Los costos unitarios de transporte desde D2 a R2 son los más altos que desde cualquier centro de distribución a cualquier otro detallista.

Por otro lado, se presentan costos por inventarios sobrantes tanto en el distribuidor 1 como en el distribuidor 2 principalmente en los periodos 2 y 3. El mayor costo por inventario sobrante se evidencia en el centro de distribución 2.

Para el caso de los defectuosos y sus costos asociados, se aplica de igual forma el supuesto en el que se hace uso de la compra de los productos a las plantas dado que pueden ser sometidos a un pequeño proceso de recuperación y vendidos como productos en buen estado. Se causan en este caso costos por disponer del producto defectuoso en ambos centros de distribución siendo el centro de distribución 2 el que incurre en una mayor cantidad.

Los cálculos de los costos de manipulación corresponden al uso de montacargas y mano de obra que carga y descarga las cantidades que se reciben desde las plantas, así como las que se cargan para envío al detallista. Estos costos son relativamente bajos y están dados en función del número de sacos que se manipulan. Los costos por manipulación en el centro de distribución 2 son mayores

que en el centro de distribución 1, aunque los costos unitarios por manipular son muy parecidos para D1 y D2.

Los ingresos en el centro de distribución son dados básicamente por la venta de las cantidades recibidas desde la planta y a su vez por los productos defectuosos detectadas por los centros de distribución y que luego vende a los detallistas luego de un pequeño proceso de recuperación. El centro de distribución 2 es quien obtiene los mayores ingresos y beneficios totales.

Tabla 94. Costos totales y beneficios en el centro de distribución

		BD (d) Beneficios esperados en el Centro de Distribución en el periodo					
d		1	2	3	4	5	6
1	VPD(d,t)	\$ 262.610.000	\$ 262.610.000	\$ 262.610.000	\$ 262.610.000	\$ 262.610.000	\$ 262.610.000
1	CTCD(d,t)	\$ (171.130.000)	\$ (273.750.000)	\$ (134.360.000)	\$ (183.010.000)	\$ (197.570.000)	\$ (273.750.000)
1	CTTD(d,t)	\$ (4.974.400)	\$ (4.974.400)	\$ (4.974.400)	\$ (4.974.400)	\$ (4.974.400)	\$ (4.974.400)
1	CTISOBD(d,t)		\$ (400.200)	\$ (70.794)			\$ (400.200)
1	CTDEFD(d,t)	\$ (10.926.000)	\$ (17.262.000)	\$ (8.663.500)	\$ (11.683.000)	\$ (12.536.000)	\$ (17.262.000)
1	CTMD(d,t)	\$ (725.520)	\$ (696.780)	\$ (541.200)	\$ (668.800)	\$ (668.800)	\$ (796.400)
1	BD (d)	\$ 74.854.080	\$ (34.473.380)	\$ 114.000.106	\$ 62.273.800	\$ 46.860.800	\$ (34.573.000)

		BD (d) Beneficios esperados en el Centro de Distribución en el periodo					
d		1	2	3	4	5	6
2	VPD(d,t)	\$ 278.040.000	\$ 278.040.000	\$ 278.040.000	\$ 278.040.000	\$ 278.040.000	\$ 278.040.000
2	CTCD(d,t)	\$ (184.140.000)	\$ (289.140.000)	\$ (144.640.000)	\$ (184.590.000)	\$ (203.540.000)	\$ (289.240.000)
2	CTTD(d,t)	\$ (5.250.600)	\$ (5.250.600)	\$ (5.250.600)	\$ (5.250.600)	\$ (5.250.600)	\$ (5.250.600)
2	CTISOBD(d,t)		\$ (427.800)	\$ (124.460)			\$ (427.800)
2	CTDEFD(d,t)	\$ (11.441.000)	\$ (17.943.000)	\$ (9.326.400)	\$ (11.461.000)	\$ (12.910.000)	\$ (17.943.000)
2	CTMD(d,t)	\$ (836.740)	\$ (736.000)	\$ (658.480)	\$ (670.920)	\$ (736.000)	\$ (878.600)
2	BD (d)	\$ 76.371.660	\$ (35.457.400)	\$ 118.040.060	\$ 76.067.480	\$ 55.603.400	\$ (35.700.000)

d	
D1	\$ 232.414.006
D2	\$ 258.747.800

Fuente: elaboración propia.

En los detallistas los costos por la compra del producto a los centros de distribución representan un alto porcentaje dentro de los costos totales, siguiendo en el mismo orden los costos por inventario faltante.

Los costos por compras corresponden al producto recibido desde los centros de distribución. Los detallistas no le hacen ningún tipo de tratamiento distinto a recibir, almacenar y vender. El detallista 2 presenta unos costos más elevados por compra del producto debido a las mayores cantidades que recibe y a su vez los precios unitarios de compra son más elevados frente a los del detallista 1.

En cuanto a los costos por inventarios sobrantes estos se presentan en mayor cantidad en el detallista 1 a pesar de sólo causarse en los periodos 1, 3, 5 y 6, mientras que en el detallista 2 se presentaron en los seis periodos.

Es importante aclarar que en algunos periodos se observan tanto costos faltantes como sobrante, pero, estos no son para el mismo producto al tiempo, en algunos corresponde a sobrante por el producto A y faltante por el producto B o viceversa.

En cuanto a los costos por manipulación éstos son mayores en el detallista 2 dado que este es quien maneja cantidades más altas. En cuanto a los costos unitarios por manipulación los valores para ambos detallistas son muy similares.

Los mayores beneficios totales los obtiene el detallista 2 cuyos ingresos son mayores y costos menores con respecto al detallista 1. (ver Tabla 95).

Tabla 95. Costos totales y beneficios en el detallista

		BR (r) Beneficios esperados en el Detallista en el periodo					
r		1	2	3	4	5	6
1	VPR(r,t)	\$ 345.630.000	\$ 346.730.000	\$ 346.270.000	\$ 302.110.000	\$ 280.380.000	\$ 345.540.000
1	CTCR(r,t)	\$ (260.180.000)	\$ (260.180.000)	\$ (260.180.000)	\$ (260.180.000)	\$ (260.180.000)	\$ (260.180.000)
1	CTISOBR(r,t)	\$ (210.320)		\$ (34.800)		\$ (126.540)	\$ (263.120)
1	CTIFALR(r,t)	\$ (17.931.000)	\$ (7.592.300)	\$ (15.515.000)	\$ (4.951.500)		\$ (15.313.000)
1	CTMR(r,t)	\$ (400.400)	\$ (400.400)	\$ (400.400)	\$ 374.400	\$ (361.400)	\$ (400.400)
1	BR(r)	\$ 66.908.280	\$ 78.557.300	\$ 70.139.800	\$ 37.352.900	\$ 19.712.060	\$ 69.383.480

		BR (r) Beneficios esperados en el Detallista en el periodo					
r		1	2	3	4	5	6
2	VPR(r,t)	\$ 356.360.000	\$ 356.540.000	\$ 356.420.000	\$ 356.420.000	\$ 356.300.000	\$ 356.420.000
2	CTCR(r,t)	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)
2	CTISOBR(r,t)	\$ (40.940)	\$ (40.480)	\$ (40.480)	\$ (40.480)	\$ (40.940)	\$ (40.940)
2	CTIFALR(r,t)						
2	CTMR(r,t)	\$ (421.200)	\$ (421.200)	\$ (421.200)	\$ (421.200)	\$ (421.200)	\$ (421.200)
2	BR(r)	\$ 75.427.860	\$ 75.608.320	\$ 75.488.320	\$ 75.488.320	\$ 75.367.860	\$ 75.487.860

r	BR (r)
R1	\$ 343.242.020
R2	\$ 454.974.540

Fuente: elaboración propia

Finalmente; como se observa en la Tabla 96, GAMS entrega la solución del modelo para la planificación de la cadena de suministro colaborativa objeto de estudio, presentando como valor óptimo para la maximización de los beneficios de toda la cadena de suministro \$ 5.122.057.491 millones.

Este valor ha tenido en cuenta todos los parámetros establecidos como inputs del modelo, contempla todos los costos asociados a las compras, a la fabricación, al transporte, a mantener inventarios sobrantes, costos por faltantes, por desechar defectuoso y costos por manipulación.

Tabla 96. Beneficios esperados en la cadena de suministro

	BT Beneficios esperados en la Cadena de Suministro		BT
	1	2	
BS (s)	\$ 1.151.859.178	\$ 1.157.128.655	\$ 2.308.987.833
BP (p)	\$ 781.759.620	\$ 741.931.671	\$ 1.523.691.292
BD(d)	\$ 232.414.006	\$ 258.747.800	\$ 491.161.806
BR(r)	\$ 343.242.020	\$ 454.974.540	\$ 798.216.560
BT			\$ 5.122.057.491

Fuente: elaboración propia.

Desde un enfoque con incertidumbre, para cada uno de los escenarios el modelo entrega las cantidades a comprar por parte del proveedor (Tabla 97) y a despachar (Tabla 98) hacia las plantas, a su vez totaliza las cantidades transportadas (Tabla 99).

Tabla 97. Cantidad de materia prima a comprar por el proveedor en el periodo en el escenario

QS (s,m,t,e) Cantidad de Materia Prima compradas por el Proveedor en el periodo en el escenario (Ton)								
s	m	e	1	2	3	4	5	6
1	YESO	ALTA	75	83	57	73	80	
1	YESO	MEDIA	75	83	57	73	80	
1	YESO	BAJA	56	83	57	62	80	
1	ESCORIA	ALTA	197	253	213	244	271	
1	ESCORIA	MEDIA	197	253	213	244	271	
1	ESCORIA	BAJA	139	257	214	203	271	
1	CLINKER	ALTA	896	1.323	857	1.135	1.243	
1	CLINKER	MEDIA	896	1.323	857	1.135	1.243	
1	CLINKER	BAJA	595	1.318	856	972	1.243	
1	SACO	ALTA	56	67	45	58	64	
1	SACO	MEDIA	56	67	45	58	64	
1	SACO	BAJA	41	67	45	50	64	
2	YESO	ALTA	64	83	57	73	80	
2	YESO	MEDIA	64	83	57	73	80	
2	YESO	BAJA	45	83	57	62	80	
2	ESCORIA	ALTA	233	254	214	215	272	
2	ESCORIA	MEDIA	233	254	214	215	272	
2	ESCORIA	BAJA	175	258	215	204	272	
2	CLINKER	ALTA	933	1.328	861	1.139	1.248	
2	CLINKER	MEDIA	933	1.328	861	1.139	1.248	
2	CLINKER	BAJA	631	1.324	859	976	1.248	
2	SACO	ALTA	64	67	45	58	64	
2	SACO	MEDIA	64	67	45	58	64	
2	SACO	BAJA	49	67	45	50	64	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 98. Materia prima a transportar desde el proveedor a la planta en el periodo en el escenario

QTSP (s,p,m,t,e) Materia Prima a transportar desde el Proveedor a la Planta en el periodo en el escenario (Ton)									
s	p	m	e	1	2	3	4	5	6
1	1	YESO	ALTA	53	26	28	57	23	
1	1	YESO	MEDIA	53	26	28	57	23	
1	1	YESO	BAJA	53	26	28	57	23	
1	1	ESCORIA	ALTA	201	93	105	199	87	
1	1	ESCORIA	MEDIA	201	93	105	199	87	
1	1	ESCORIA	BAJA	201	98	105	188	87	
1	1	CLINKER	ALTA	803	408	421	881	349	
1	1	CLINKER	MEDIA	803	408	421	881	349	
1	1	CLINKER	BAJA	803	404	421	891	349	
1	1	SACO	ALTA	42	21	22	45	18	
1	1	SACO	MEDIA	42	21	22	45	18	
1	1	SACO	BAJA	42	21	22	45	18	
1	2	YESO	ALTA	40,69	55,59	27,99	14,90	55,84	
1	2	YESO	MEDIA	40,69	55,59	27,99	14,90	55,84	
1	2	YESO	BAJA	22,00	55,59	27,99	4,30	55,84	
1	2	ESCORIA	ALTA	128,33	156,18	104,83	41,72	180,39	
1	2	ESCORIA	MEDIA	128,33	156,18	104,83	41,72	180,39	
1	2	ESCORIA	BAJA	71,39	156,18	106,34	12,03	180,39	
1	2	CLINKER	ALTA	644,83	899,94	426,89	241,38	880,48	
1	2	CLINKER	MEDIA	644,83	899,94	426,89	241,38	880,48	
1	2	CLINKER	BAJA	346,59	899,94	425,37	69,58	880,48	
1	2	SACO	ALTA	32,55	44,47	22,39	11,92	44,67	
1	2	SACO	MEDIA	32,55	44,47	22,39	11,92	44,67	
1	2	SACO	BAJA	17,60	44,47	22,39	3,44	44,67	
2	1	YESO	ALTA	52,80	26,41	27,70	56,83	22,97	
2	1	YESO	MEDIA	52,80	26,41	27,70	56,83	22,97	
2	1	YESO	BAJA	52,80	26,41	27,70	56,83	22,97	
2	1	ESCORIA	ALTA	200,64	93,31	105,26	199,02	87,28	
2	1	ESCORIA	MEDIA	200,64	93,31	105,26	199,02	87,28	
2	1	ESCORIA	BAJA	200,64	97,86	105,26	188,39	87,28	
2	1	CLINKER	ALTA	802,56	408,38	421,04	880,66	349,10	
2	1	CLINKER	MEDIA	802,56	408,38	421,04	880,66	349,10	
2	1	CLINKER	BAJA	802,56	403,83	421,04	891,29	349,10	
2	1	SACO	ALTA	42,24	21,12	22,16	45,46	18,37	
2	1	SACO	MEDIA	42,24	21,12	22,16	45,46	18,37	
2	1	SACO	BAJA	42,24	21,12	22,16	45,46	18,37	
2	2	YESO	ALTA	41	56	28	15	56	
2	2	YESO	MEDIA	41	56	28	15	56	
2	2	YESO	BAJA	22	56	28	4	56	
2	2	ESCORIA	ALTA	128	156	105	42	180	
2	2	ESCORIA	MEDIA	128	156	105	42	180	
2	2	ESCORIA	BAJA	71	156	106	12	180	
2	2	CLINKER	ALTA	645	900	427	241	880	
2	2	CLINKER	MEDIA	645	900	427	241	880	
2	2	CLINKER	BAJA	347	900	425	70	880	
2	2	SACO	ALTA	33	44	22	12	45	
2	2	SACO	MEDIA	33	44	22	12	45	
2	2	SACO	BAJA	18	44	22	3	45	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 99. Cantidad de transporte Total desde el Proveedor a la Planta en el periodo en el escenario

QTSP(s,p,t,e) Cantidad de transporte Total desde el Proveedor a la Planta en el periodo en el escenario (Ton)								
s	p	e	1	2	3	4	5	6
1	1	ALTA	1.098	549	576	1.182	478	
1	1	MEDIA	1.098	549	576	1.182	478	
1	1	BAJA	1.098	549	576	1.182	478	
1	2	ALTA	846	1.156	582	310	1.161	
1	2	MEDIA	846	1.156	582	310	1.161	
1	2	BAJA	458	1.156	582	89	1.161	
2	1	ALTA	1.098	549	576	1.182	478	
2	1	MEDIA	1.098	549	576	1.182	478	
2	1	BAJA	1.098	549	576	1.182	478	
2	2	ALTA	846	1.156	582	310	1.161	
2	2	MEDIA	846	1.156	582	310	1.161	
2	2	BAJA	458	1.156	582	89	1.161	

Fuente: elaboración propia.

Determina los productos terminados a producir por cada recurso de producción por periodo (Tabla 100), en jornada normal (Tabla 101) y extra (Tabla 102), así como las cantidades totales a producir del producto para cada una de las plantas (Tabla 103), todo esto en cada escenario.

Así mismo, calcula las cantidades a transportar desde las plantas a los centros de distribución (Tabla 104), totaliza por planta (Tabla 105) y las cantidades a entregar de los distribuidores a los detallistas (Tabla 106), también suministra el total de las cantidades a transportar desde el centro de distribución (Tabla 107) y la cantidad de producto desde los detallistas a los clientes (Tabla 108) incluido su totalidad por escenario. (Tabla 109).

Tabla 100. Cantidad a producir del producto en la planta sobre el recurso de producción en el periodo en el escenario

QPP (p,q,j,t,e) Cantidad a producir del producto en la Planta sobre el Recurso de Producción en el periodo en el escenario (Sacos)									
p	q	j	e	1	2	3	4	5	6
1	Q1	A	ALTA	10.547	7.751		4.600		
1	Q1	A	MEDIA	10547	7.751		4.600		
1	Q1	A	BAJA	10547	9571,1		349,437		
1	Q1	B	ALTA		2810,92		6768,163		
1	Q1	B	MEDIA		2810,92		6768,163		
1	Q1	B	BAJA		990,9		11018,563		
1	Q2	A	ALTA	10573		11080	11362	9186,868	
1	Q2	A	MEDIA	10573		11080	11362	9186,868	
1	Q2	A	BAJA	10573		11080	11362	9186,868	
1	Q2	B	ALTA						
1	Q2	B	MEDIA						
1	Q2	B	BAJA						
2	Q1	A	ALTA						
2	Q1	A	MEDIA						
2	Q1	A	BAJA						
2	Q1	B	ALTA	10521,695	11126			11182	
2	Q1	B	MEDIA	10521,695	11126			11182	
2	Q1	B	BAJA	4880,928	11126			11182	
2	Q2	A	ALTA	5755,247	215,837	10588,551		9619,57	
2	Q2	A	MEDIA	5755,247	215,837	10588,551		9619,57	
2	Q2	A	BAJA	3918,702	215,837	11194		9619,57	
2	Q2	B	ALTA		10892,163	605,449	5959,926	1532,43	
2	Q2	B	MEDIA		10892,163	605,449	5959,926	1532,43	
2	Q2	B	BAJA		10892,163		1718,104	1532,43	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 101. Cantidad a producir del producto en tiempo Normal en la Planta sobre el Recurso de Producción en el periodo en el escenario

QPPN (p,q,j,t,e) Cantidad a producir del producto en tiempo Normal en la Planta sobre el Recurso de Producción en el periodo en el escenario (Sacos)									
p	q	j	e	1	2	3	4	5	6
1	Q1	A	ALTA	10.547	7.751		3.916		
1	Q1	A	MEDIA	10547	7.751		4599,837		
1	Q1	A	BAJA	10547	9571,1				
1	Q1	B	ALTA		2810,92		6768,163		
1	Q1	B	MEDIA		2810,92		6084,163		
1	Q1	B	BAJA		990,9		10684		
1	Q2	A	ALTA	10573		10540	10681	8639,868	
1	Q2	A	MEDIA	10573		10540	10681	8639,868	
1	Q2	A	BAJA	10573		10540	10681	8639,868	
1	Q2	B	ALTA						
1	Q2	B	MEDIA						
1	Q2	B	BAJA						
2	Q1	A	ALTA						
2	Q1	A	MEDIA						
2	Q1	A	BAJA						
2	Q1	B	ALTA	10521,695	10563			10591	
2	Q1	B	MEDIA	10521,695	10563			10591	
2	Q1	B	BAJA	4880,928	10563			10591	
2	Q2	A	ALTA	5755,247		10588,551		9619,57	
2	Q2	A	MEDIA	5755,247		10588,551		9619,57	
2	Q2	A	BAJA	3918,702	215,837	10597		9619,57	
2	Q2	B	ALTA		10554	8,449	5290,926	956,43	
2	Q2	B	MEDIA		10554	8,449	5290,926	956,43	
2	Q2	B	BAJA		10338,163		1718,104	956,43	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 102. Cantidad a producir del producto en tiempo Extra en la Planta sobre el Recurso de Producción en el periodo en el escenario

QPPEX(p,q,j,t,e) Cantidad a producir del producto en tiempo Extra en la Planta sobre el Recurso de Producción en el periodo en el escenario (Sacos)									
p	q	j	e	1	2	3	4	5	6
1	Q1	A	ALTA				684		
1	Q1	A	MEDIA						
1	Q1	A	BAJA				349,437		
1	Q1	B	ALTA						
1	Q1	B	MEDIA				684		
1	Q1	B	BAJA				334,563		
1	Q2	A	ALTA			540	681	547	
1	Q2	A	MEDIA			540	681	547	
1	Q2	A	BAJA			540	681	547	
1	Q2	B	ALTA						
1	Q2	B	MEDIA						
1	Q2	B	BAJA						
2	Q1	A	ALTA						
2	Q1	A	MEDIA						
2	Q1	A	BAJA						
2	Q1	B	ALTA		563			591	
2	Q1	B	MEDIA		563			591	
2	Q1	B	BAJA		563			591	
2	Q2	A	ALTA		215,837				
2	Q2	A	MEDIA		215,837				
2	Q2	A	BAJA			597			
2	Q2	B	ALTA		338,163	597	669	576	
2	Q2	B	MEDIA		338,163	597		576	
2	Q2	B	BAJA		554			576	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 103. Cantidad a producir del producto en la Planta en el periodo en el escenario

QP(p,j,t,e) Cantidad a producir del producto en la Planta en el periodo en el escenario (Sacos)								
p	j	e	1	2	3	4	5	6
1	A	ALTA	21.120	7.751	11.080	15.962	9.187	
1	A	MEDIA	21.120	7.751	11.080	15.962	9.187	
1	A	BAJA	21.120	9.571	11.080	11.711	9.187	
1	B	ALTA		2.811		6.768		
1	B	MEDIA		2.811		6.768		
1	B	BAJA		991		11.019		
2	A	ALTA	5.755	216	10.589		9.620	
2	A	MEDIA	5.755	216	10.589		9.620	
2	A	BAJA	3.919	216	11.194		9.620	
2	B	ALTA	10.522	22.018	605	5.960	12.714	
2	B	MEDIA	10.522	22.018	605	5.960	12.714	
2	B	BAJA	4.881	22.018		1.718	12.714	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 104. Cantidad de producto a transportar desde la planta al centro de distribución en el periodo en el escenario

QTPD(p,d,j,t,e) Cantidad de producto a transportar desde la Planta al Centro de Distribución en el periodo en el escenario (Sacos)									
p	d	j	e	1	2	3	4	5	6
1	1	A	ALTA	10.026	4.472	10.026	7.974	9.000	9.000
1	1	A	MEDIA	10.026	4.472	10.026	7.974	9.000	9.000
1	1	A	BAJA	10.026	6.290	10.026	7.802	9.000	9.000
1	1	B	ALTA	427	1.090		6.200		1.090
1	1	B	MEDIA	427	1.090		6.200		1.090
1	1	B	BAJA	427	980		6.200		1.090
1	2	A	ALTA	11.116	3.186	921	7.796	77	9.600
1	2	A	MEDIA	11.116	3.186	921	7.796	77	9.600
1	2	A	BAJA	11.116	3.186	921	3768,96	77	9.600
1	2	B	ALTA		1690		493,714		1690
1	2	B	MEDIA		1690		493,714		1690
1	2	B	BAJA				4697,359		1690
2	1	A	ALTA	2252,255					
2	1	A	MEDIA	2252,255					
2	1	A	BAJA	434,075		172,06			
2	1	B	ALTA	5.073	10.910	400		6.200	10.910
2	1	B	MEDIA	5.073	10.910	400		6.200	10.910
2	1	B	BAJA	3.743	10.910			6.200	10.910
2	2	A	ALTA	3.684	214	10.483		9.523	
2	2	A	MEDIA	3.684	214	10.483		9.523	
2	2	A	BAJA	3.684	214	10.910		9.523	
2	2	B	ALTA	5.580	10.910	200	5.906	6.400	10.910
2	2	B	MEDIA	5.580	10.910	200	5.906	6.400	10.910
2	2	B	BAJA	1.320	10.910		1.703	6.400	10.910

Fuente: elaboración propia.

Tabla 105. Cantidad de producto a transportar desde la planta al centro de distribución en el periodo en el escenario

QTPPD(p,d,t,e) Cantidad de transporte Total desde la Planta al Centro de Distribución en el periodo en el escenario (Sacos)								
p	d	e	1	2	3	4	5	6
1	1	ALTA	10.453	5.562	10.026	14.174	9.000	10.090
1	1	MEDIA	10.453	5.562	10.026	14.174	9000	10090
1	1	BAJA	10.453	7.270	10.026	14.174	9000	10090
1	2	ALTA	11.116	4.876	921	8.290	76,626	11.290
1	2	MEDIA	11.116	4.876	921	8.290	76,626	11.290
1	2	BAJA	11.116	3.166	921	8.466	76,626	11.290
2	1	ALTA	7.325	10.910	400		6200	10.910
2	1	MEDIA	7.325	10.910	400		6200	10910
2	1	BAJA	4.177	10.910	172		6200	10910
2	2	ALTA	9.264	11.124	10.683	5.906	15923,374	10910
2	2	MEDIA	9.264	11.124	10.683	5.906	15923,374	10910
2	2	BAJA	5.004	11.124	10.910	1.703	15923,374	10910

Fuente: elaboración propia.

Tabla 106. Cantidad de producto a transportar desde el centro de distribución al detallista en el periodo

QTDR(d,r,j,t,e) Cantidad de producto a transportar desde el Centro de Distribución al Detallista en el periodo en el escenario (Sacos)									
d	r	j	e	1	2	3	4	5	6
1	1	A	ALTA	3.400	3.400	3.400	3.400	3.400	3.400
1	1	A	MEDIA	3.400	3.400	3.400	3.400	3.400	3.400
1	1	A	BAJA	3.400	3.400	3.400	3.400	3.400	3.400
1	1	B	ALTA	3.400	3.400	3.400	3.400	3.400	3.400
1	1	B	MEDIA	3.400	3.400	3.400	3.400	3.400	3.400
1	1	B	BAJA	2.070	3.290	3.000	3.400	3.400	3.400
1	2	A	ALTA	5.600	5.600	5.600	5.600	5.600	5.600
1	2	A	MEDIA	5.600	5.600	5.600	5.600	5.600	5.600
1	2	A	BAJA	5.600	5.600	5.600	5.600	5.600	5.600
1	2	B	ALTA	2800	2800	2800	2800	2800	2800
1	2	B	MEDIA	2800	2800	2800	2800	2800	2800
1	2	B	BAJA	2800	2800	2800	2800	2800	2800
2	1	A	ALTA	4400	4400	4400	4400	4400	4400
2	1	A	MEDIA	4400	4400	4400	4400	4400	4400
2	1	A	BAJA	4400	4380	4400	800	4400	4400
2	1	B	ALTA	3.800	3.800	3.800	3.800	3.800	3.800
2	1	B	MEDIA	3.800	3.800	3.800	3.800	3.800	3.800
2	1	B	BAJA		3.310	2.400	3.800	3.800	3.800
2	2	A	ALTA	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200
2	2	A	MEDIA	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200
2	2	A	BAJA	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200
2	2	B	ALTA	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600
2	2	B	MEDIA	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600
2	2	B	BAJA	2.140	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600

Fuente: elaboración propia.

Tabla 107. Cantidad de transporte Total desde el Centro de Distribución al Detallista en el periodo

QTTDR(d,r,t,e) Cantidad de transporte Total desde el Centro de Distribución al Detallista en el periodo en el escenario (Sacos)								
p	d	e	1	2	3	4	5	6
1	1	ALTA	6.800	6.800	6.800	6.800	6.800	6.800
1	1	MEDIA	6.800	6.800	6.800	6.800	6.800	6.800
1	1	BAJA	5.470	6.690	6.400	6.800	6.800	6.800
1	2	ALTA	8.400	8.400	8.400	8.400	8.400	8.400
1	2	MEDIA	8.400	8.400	8.400	8.400	8.400	8.400
1	2	BAJA	8.400	8.400	8.400	8.400	8.400	8.400
2	1	ALTA	8.200	8.200	8.200	8.200	8.200	8.200
2	1	MEDIA	8.200	8.200	8.200	8.200	8.200	8.200
2	1	BAJA	4.400	7.690	6.800	4.600	8.200	8.200
2	2	ALTA	7.800	7.800	7.800	7.800	7.800	7.800
2	2	MEDIA	7.800	7.800	7.800	7.800	7.800	7.800
2	2	BAJA	7.340	7.800	7.800	7.800	7.800	7.800

Fuente: elaboración propia.

Tabla 108. Cantidad de producto a transportar desde el detallista al cliente en el periodo

QTRC(r,c,j,t,e) Cantidad de producto a transportar desde el Detallista al Cliente c en el periodo en el escenario (Sacos)									
r	c	j	e	1	2	3	4	5	6
1	1	A	ALTA	8.000	200				
1	1	A	MEDIA	10.740	1.000				2.740
1	1	A	BAJA	12.980		2.200			7.400
1	1	B	ALTA				3.100	2.600	6.800
1	1	B	MEDIA		1.740		2.600	1.600	4.060
1	1	B	BAJA	820	6.600	400	3.600	7.400	1.800
1	2	A	ALTA		7.600	7.800	7.900	8.200	9.000
1	2	A	MEDIA		4.060	7.400	8.200	7.200	8.000
1	2	A	BAJA		2400	6000	4200	3200	5000
1	2	B	ALTA	7450	7200	7200	4800	5000	
1	2	B	MEDIA	5060	9000	8400	3000	4000	1000
1	2	B	BAJA	1500		3200	2000	2000	800
2	1	A	ALTA	10560		8600	7700	8000	9800
2	1	A	MEDIA	6260		10200	10000	8000	11260
2	1	A	BAJA	2020	800	10800	8000	6000	5600
2	1	B	ALTA	4.090	2.600	1.800	5.400	5.400	4.200
2	1	B	MEDIA	2.240	5.860	4.800	5.400	5.400	4.940
2	1	B	BAJA	5.180	3.400	5.400	5.400	2.600	7.200
2	2	A	ALTA		10.800	2.200	3.100	2.800	1.000
2	2	A	MEDIA	4.760	10.340	600	800	2.800	
2	2	A	BAJA	9.000	10.000		2.800	4.800	
2	2	B	ALTA	1.550	2.800	3.600			1.200
2	2	B	MEDIA	2.940		600			
2	2	B	BAJA		2.000				

Fuente: elaboración propia.

Tabla 109. Cantidad de transporte Total desde el Detallista al Cliente en el periodo

QTTRC(r,c,t,e) Cantidad de transporte Total desde el Detallista al Cliente en el periodo en el escenario (Sacos)								
r	c	e	1	2	3	4	5	6
1	1	ALTA	8.000	200		3.100	2.600	6.800
1	1	MEDIA	10.740	2.740		2.600	1.600	6.800
1	1	BAJA	13.800	6.600	2.600	3.600	7.400	9.200
1	2	ALTA	7.450	14.800	15.000	12.700	13.200	9.000
1	2	MEDIA	5.060	13.060	15.800	11.200	11.200	9.000
1	2	BAJA	1.500	2.400	9.200	6.200	5.200	5.800
2	1	ALTA	14.650	2.600	10.400	13.100	13.400	14.000
2	1	MEDIA	8.500	5.860	15.000	15.400	13.400	16.200
2	1	BAJA	7.200	4.200	16.200	13.400	8.600	12.800
2	2	ALTA	1.550	13.600	5.800	3.100	2.800	2.200
2	2	MEDIA	7.700	10.340	1.200	800	2.800	
2	2	BAJA	9.000	12.000		2.800	4.800	

Fuente: elaboración propia.

El modelo calcula los mejores niveles de inventarios finales para los tres escenarios tanto de las materias primas como de los productos terminados (Tablas 110 a 113)

Tabla 110. Nivel de inventario faltante de producto j en la planta para el periodo en el escenario e

NIFALP(p,j,t) Nivel de Inventario faltante de producto en la Planta para el Periodo en el escenario								
p	j	e	1	2	3	4	5	6
1	A	ALTA						18.600
1	A	MEDIA						18.600
1	A	BAJA						18.600
1	B	ALTA						2.780
1	B	MEDIA						2.780
1	B	BAJA						2.780
2	A	ALTA						
2	A	MEDIA						
2	A	BAJA						
2	B	ALTA						21.820
2	B	MEDIA						21.820
2	B	BAJA						21.820

Fuente: elaboración propia.

Tabla 111. Nivel de Inventario sobrante de producto en el Centro de Distribución para el Periodo en el escenario

NISOBD(d,j,t) Nivel de Inventario sobrante de producto en el Centro de Distribución para el Periodo en el escenario								
d	j	e	1	2	3	4	5	6
1	A	ALTA	4.528		1.026			
1	A	MEDIA	4.528		1.026			
1	A	BAJA	2.710		1.198			
1	B	ALTA		5.800				5.800
1	B	MEDIA		5.800				5.800
1	B	BAJA		5.800				5.800
2	A	ALTA	6.200		1.804			
2	A	MEDIA	6.200		1.804			
2	A	BAJA	6.200		2.231			
2	B	ALTA		6.200				6.200
2	B	MEDIA		6.200				6.200
2	B	BAJA		5.000				6.200

Fuente: elaboración propia.

Tabla 112. Nivel de Inventario sobrante de producto en el Detallista en el Periodo en el escenario

NISOBR(r,j,t) Nivel de Inventario sobrante de producto en el Detallista en el Periodo en el escenario								
r	j	e	1	2	3	4	5	6
1	A	ALTA						
1	A	MEDIA			400		600	
1	A	BAJA		400			4.600	
1	B	ALTA						
1	B	MEDIA	2390				850	2.990
1	B	BAJA			2.390	3.400	1.200	5.800
2	A	ALTA	460	460	460	460	460	460
2	A	MEDIA		460	460	460	460	
2	A	BAJA						5.200
2	B	ALTA						
2	B	MEDIA	460					460
2	B	BAJA					2.800	1.000

Fuente: elaboración propia.

Tabla 113. Nivel de Inventario faltante de producto en el Detallista en el Periodo en el escenario

NIFALR(r,j,t) Nivel de Inventario faltante de producto en el Detallista en el Periodo en el escenario								
r	j	e	1	2	3	4	5	6
1	A	ALTA				100	500	1.700
1	A	MEDIA	2.740					2.340
1	A	BAJA	4.980					
1	B	ALTA				700	1.100	700
1	B	MEDIA		1.150	2350	750		
1	B	BAJA						
2	A	ALTA						
2	A	MEDIA						
2	A	BAJA						
2	B	ALTA						
2	B	MEDIA						
2	B	BAJA						

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 114 y Tabla 115 se muestra al proveedor 2 quien, en escenarios alto, medio y bajo obtiene los mayores beneficios, frente al proveedor 1. Esto es debido a la mayor cantidad de ventas que realiza a lo largo de los periodos. El proveedor 2 suministra a la planta 1 la mayor cantidad de toneladas de materia prima.

Los costos en éste proveedor están por encima en comparación con el proveedor 1, pero, estos no logran superar el margen de diferencia. Los costos más representativos son los causados por compra de materia prima y transporte de la misma hacia las plantas, los costos por desechar inventario defectuoso detectado en la planta y los costos por manipulación no son tan representativos a tal punto que en los escenarios medio y bajo siguen siendo la compra de materia prima y transporte los más altos frente al resto.

Es importante anotar que los proveedores transportan la materia prima solicitada por la planta, pero, estas en su inspección de calidad son capaces de detectar una

fracción de la misma como defectuosa lo cual le permite entrar en un proceso de negociación para obtener un mejor precio por la misma y teniendo en cuenta que los costos de transporte son tan altos para la devolución del material, se realiza la venta a la planta por un valor inferior al precio original, pero, que al tiempo le permite obtener ganancias en lugar de pérdidas por devolución y por tener que almacenar este producto y luego disponerlo.

Tal como lo muestra la Tabla 116 y Tabla 117 los resultados para las plantas en los escenarios alto y medio es la planta 2 quien obtiene unos beneficios más altos que la planta 1. Sin embargo, en el escenario bajo la planta 1 obtiene mejores beneficios específicamente en los periodos 1, 3 y 4. Al final del horizonte de tiempo los costos por compra de materia prima, fabricación y manipulación estuvieron por debajo respecto a la planta 2 y esto le permitió alcanzar mayores ingresos.

En la Tabla 118 y Tabla 119, se muestra que, para los escenarios alto, medio y bajo el centro de distribución 2 obtiene mejores beneficios totales que el centro de distribución 1 debido a que sus ingresos por venta de producto son mayores. Es en los periodos 2, 3 y 4 donde el centro de distribución 2 logra los mayores beneficios respecto al distribuidor 1 quien presenta costos más bajos en algunos periodos en escenarios alto y medio, pero, esta diferencia no es suficiente para superar los valores obtenidos por el centro de distribución 2.

El detallista 2 es quien presenta los mayores beneficios totales tanto en el escenario alto, como medio y bajo debido a la mayor venta de producto en cada escenario. Se evidencia menores costos respecto al detallista 1 especialmente por costos de inventario faltante que no se causan dado que cumple en la totalidad con la demanda. Los costos por compras corresponden al producto recibido desde los centros de distribución, el detallista 2 presenta unos costos más elevados por compra del producto, sin embargo, se compensan con la venta del mismo. (ver Tabla 120 y Tabla 121).

Tabla 114. Costos totales y beneficios en el proveedor en el escenario

BS (s) Beneficios esperados en el Proveedor en el periodo en el escenario								
s			1	2	3	4	5	6
1	VPS(s,t)	ALTA	\$ 308.390.000	\$ 271.980.000	\$ 183.140.000	\$ 237.030.000	\$ 260.330.000	
		MEDIA	\$ 308.390.000	\$ 271.980.000	\$ 183.140.000	\$ 237.030.000	\$ 260.330.000	
		BAJA	\$ 246.380.000	\$ 271.800.000	\$ 183.080.000	\$ 202.160.000	\$ 260.330.000	
1	VPDEFS(s,t)	ALTA	\$ 5.554.900	\$ 4.870.700	\$ 3.301.600	\$ 4.276.300	\$ 4.670.800	
		MEDIA	\$ 5.554.900	\$ 4.870.700	\$ 3.301.600	\$ 4.276.300	\$ 4.670.800	
		BAJA	\$ 4.448.500	\$ 4.869.200	\$ 3.301.100	\$ 3.651.300	\$ 4.670.800	
1	CTCS(s,t)	ALTA	\$ (16.907.000)	\$ (21.445.000)	\$ (14.536.000)	\$ (18.808.000)	\$ (20.655.000)	
		MEDIA	\$ (16.907.000)	\$ (21.445.000)	\$ (14.536.000)	\$ (18.808.000)	\$ (20.655.000)	
		BAJA	\$ (12.018.000)	\$ (21.432.000)	\$ (14.531.000)	\$ (16.041.000)	\$ (20.655.000)	
1	CTTS(s,t)	ALTA	\$ (8.263.500)	\$ (7.173.400)	\$ (4.950.800)	\$ (6.314.800)	\$ (6.950.000)	
		MEDIA	\$ (8.263.500)	\$ (7.173.400)	\$ (4.950.800)	\$ (6.314.800)	\$ (6.950.000)	
		BAJA	\$ (6.626.900)	\$ (7.182.000)	\$ (4.953.800)	\$ (5.371.400)	\$ (6.950.000)	
1	CTDEFS(s,t)	ALTA	\$ (5.668)	\$ (7.995)	\$ (5.383)	\$ (6.968)	\$ (7.652)	
		MEDIA	\$ (5.668)	\$ (7.995)	\$ (5.383)	\$ (6.968)	\$ (7.652)	
		BAJA	\$ (3.845)	\$ (7.990)	\$ (5.381)	\$ (5.943)	\$ (7.652)	
1	CTMS(s,t)	ALTA	\$ (1.424.100)	\$ (1.248.200)	\$ (848.450)	\$ (1.092.300)	\$ (1.200.200)	
		MEDIA	\$ (1.424.100)	\$ (1.248.200)	\$ (848.450)	\$ (1.092.300)	\$ (1.200.200)	
		BAJA	\$ (1.139.500)	\$ (1.248.300)	\$ (848.470)	\$ (930.750)	\$ (1.200.200)	
1	BS (s)		\$ 805.729.518	\$ 740.751.121	\$ 498.244.382	\$ 613.630.670	\$ 708.563.844	\$ -

Fuente: elaboración propia

Tabla 115. Costos totales y beneficios en el proveedor en el escenario

			BS (s) Beneficios esperados en el Proveedor en el periodo en el escenario					
s			1	2	3	4	5	6
2	VPS(s,t)	ALTA	\$ 307.440.000	\$ 271.130.000	\$ 182.580.000	\$ 236.280.000	\$ 259.530.000	
		MEDIA	\$ 307.440.000	\$ 271.130.000	\$ 182.580.000	\$ 236.280.000	\$ 259.530.000	
		BAJA	\$ 245.620.000	\$ 270.960.000	\$ 182.580.000	\$ 201.510.000	\$ 259.530.000	
2	VPDEFS(s,t)	ALTA	\$ 8.540.200	\$ 7.509.000	\$ 5.067.300	\$ 6.582.900	\$ 7.184.400	
		MEDIA	\$ 8.540.200	\$ 7.509.000	\$ 5.067.300	\$ 6.582.900	\$ 7.184.400	
		BAJA	\$ 6.835.000	\$ 7.504.000	\$ 5.065.700	\$ 5.624.500	\$ 7.184.400	
2	CTCS(s,t)	ALTA	\$ (18.912.000)	\$ (21.457.000)	\$ (14.544.000)	\$ (18.819.000)	\$ (20.667.000)	
		MEDIA	\$ (18.912.000)	\$ (21.457.000)	\$ (14.544.000)	\$ (18.819.000)	\$ (20.667.000)	
		BAJA	\$ (14.020.000)	\$ (21.445.000)	\$ (14.540.000)	\$ (16.050.000)	\$ (20.667.000)	
2	CTTS(s,t)	ALTA	\$ (8.324.000)	\$ (7.196.100)	\$ (4.983.600)	\$ (6.380.300)	\$ (6.972.100)	
		MEDIA	\$ (8.324.000)	\$ (7.196.100)	\$ (4.983.600)	\$ (6.380.300)	\$ (6.972.100)	
		BAJA	\$ (6.689.900)	\$ (7.205.500)	\$ (4.986.800)	\$ (5.437.000)	\$ (6.972.100)	
2	CTDEFS(s,t)	ALTA	\$ (7.069)	\$ (9.521)	\$ (6.418)	\$ (8.303)	\$ (9.118)	
		MEDIA	\$ (7.069)	\$ (9.521)	\$ (6.418)	\$ (8.303)	\$ (9.118)	
		BAJA	\$ (4.898)	\$ (9.516)	\$ (6.417)	\$ (7.081)	\$ (9.118)	
2	CTMS(s,t)	ALTA	\$ (1.603.700)	\$ (1.404.400)	\$ (955.910)	\$ (1.229.700)	\$ (1.351.200)	
		MEDIA	\$ (1.603.700)	\$ (1.404.400)	\$ (955.910)	\$ (1.229.700)	\$ (1.351.200)	
		BAJA	\$ (1.283.500)	\$ (1.404.700)	\$ (955.995)	\$ (1.047.700)	\$ (1.351.200)	
2	BS (s)		\$ 804.723.565	\$ 745.543.242	\$ 501.471.231	\$ 617.443.914	\$ 713.144.946	\$ -

s								BS (s)		
S1	ALTA	\$	287.344.632	\$	246.976.105	\$	166.100.967	\$ 215.084.232	\$ 236.187.948	\$ 1.151.693.884
S1	MEDIA	\$	287.344.632	\$	246.976.105	\$	166.100.967	\$ 215.084.232	\$ 236.187.948	\$ 1.151.693.884
S1	BAJA	\$	231.040.255	\$	246.798.910	\$	166.042.449	\$ 183.462.207	\$ 236.187.948	\$ 1.063.531.768
S2	ALTA	\$	287.133.431	\$	248.571.979	\$	167.157.372	\$ 216.425.597	\$ 237.714.982	\$ 1.157.003.361
S2	MEDIA	\$	287.133.431	\$	248.571.979	\$	167.157.372	\$ 216.425.597	\$ 237.714.982	\$ 1.157.003.361
S2	BAJA	\$	230.456.702	\$	248.399.284	\$	167.156.488	\$ 184.592.719	\$ 237.714.982	\$ 1.068.320.176

Fuente: elaboración propia

Tabla 116. Costos totales y beneficios en la planta en el escenario

			BP (p) Beneficios esperados en la Planta en el periodo en el escenario					
p			1	2	3	4	5	6
1	VPP(p,t)	ALTA	\$ 551.280.000	\$ 266.720.000	\$ 279.790.000	\$ 574.030.000	\$ 231.980.000	\$ 546.390.000
		MEDIA	\$ 551.280.000	\$ 266.720.000	\$ 279.790.000	\$ 574.030.000	\$ 231.980.000	\$ 546.390.000
		BAJA	\$ 551.280.000	\$ 266.720.000	\$ 279.790.000	\$ 574.030.000	\$ 231.980.000	\$ 546.390.000
1	VPDEF(p,t)	ALTA	\$ 4.192.400	\$ 2.528.200	\$ 2.096.400	\$ 5.547.700	\$ 1.739.500	\$ 4.613.000
		MEDIA	\$ 4.192.400	\$ 2.528.200	\$ 2.096.400	\$ 5.547.700	\$ 1.739.500	\$ 4.613.000
		BAJA	\$ 4.192.400	\$ 2.177.600	\$ 2.096.400	\$ 6.376.400	\$ 1.739.500	\$ 4.613.000
1	CTCP(p,t)	ALTA	\$ (354.580.000)	\$ (177.870.000)	\$ (186.020.000)	\$ (382.930.000)	\$ (154.240.000)	
		MEDIA	\$ (354.580.000)	\$ (177.870.000)	\$ (186.020.000)	\$ (382.930.000)	\$ (154.240.000)	
		BAJA	\$ (354.580.000)	\$ (177.520.000)	\$ (186.020.000)	\$ (383.760.000)	\$ (154.240.000)	
1	CTFP(p,t)	ALTA	\$ (93.764.000)	\$ (47.423.000)	\$ (45.472.000)	\$ (96.106.000)	\$ (42.177.000)	
		MEDIA	\$ (93.764.000)	\$ (47.423.000)	\$ (45.472.000)	\$ (96.106.000)	\$ (42.177.000)	
		BAJA	\$ (93.764.000)	\$ (48.018.000)	\$ (45.472.000)	\$ (95.094.000)	\$ (42.177.000)	
1	CTTP(p,t)	ALTA	\$ (11.651.000)	\$ (5.615.900)	\$ (5.701.100)	\$ (11.987.000)	\$ (4.696.100)	\$ (11.562.000)
		MEDIA	\$ (11.651.000)	\$ (5.615.900)	\$ (5.701.100)	\$ (11.987.000)	\$ (4.696.100)	\$ (11.562.000)
		BAJA	\$ (11.651.000)	\$ (5.538.000)	\$ (5.701.100)	\$ (11.997.000)	\$ (4.696.100)	\$ (11.562.000)
1	CTISOBP(p,t)	ALTA						
		MEDIA						
		BAJA						
1	CTIFALP(p,t)	ALTA						\$ (82.881.000)
		MEDIA						\$ (82.881.000)
		BAJA						\$ (82.881.000)
1	CTDEF(p,t)	ALTA	\$ (61.839)	\$ (30.240)	\$ (32.442)	\$ (64.902)	\$ (26.899)	
		MEDIA	\$ (61.839)	\$ (30.240)	\$ (32.442)	\$ (64.902)	\$ (26.899)	
		BAJA	\$ (61.839)	\$ (30.684)	\$ (32.442)	\$ (63.865)	\$ (26.899)	
1	CTMP(p,t)	ALTA	\$ (8.998.700)	\$ (4.362.000)	\$ (4.574.700)	\$ (9.387.400)	\$ (3.793.100)	\$ (8.487.900)
		MEDIA	\$ (8.998.700)	\$ (4.362.000)	\$ (4.574.700)	\$ (9.387.400)	\$ (3.793.100)	\$ (8.487.900)
		BAJA	\$ (8.998.700)	\$ (4.361.200)	\$ (4.574.700)	\$ (9.389.100)	\$ (3.793.100)	\$ (8.487.900)
1	BP (p)		\$ 259.250.582	\$ 101.323.837	\$ 120.258.473	\$ 238.307.231	\$ 86.359.203	\$ 1.344.216.300

Fuente: elaboración propia.

Tabla 117. Costos totales y beneficios en la planta en el escenario

		BP (p)						
		Beneficios esperados en la Planta en el periodo en el escenario						
p			1	2	3	4	5	6
2	VPP(p,t)	ALTA	\$ 422.790.000	\$ 576.020.000	\$ 270.160.000	\$ 154.500.000	\$ 560.810.000	\$ 570.830.000
		MEDIA	\$ 422.790.000	\$ 576.020.000	\$ 270.160.000	\$ 154.500.000	\$ 560.810.000	\$ 570.830.000
		BAJA	\$ 232.430.000	\$ 576.020.000	\$ 269.010.000	\$ 44.538.000	\$ 560.810.000	\$ 570.830.000
2	VPDEFPP(p,t)	ALTA	\$ 5.334.200	\$ 4.260.300	\$ 5.937.700	\$ 1.132.500	\$ 7.683.100	\$ 4.141.600
		MEDIA	\$ 5.334.200	\$ 4.260.300	\$ 5.937.700	\$ 1.132.500	\$ 7.683.100	\$ 4.141.600
		BAJA	\$ 3.247.000	\$ 4.260.300	\$ 6.158.200	\$ 326.470	\$ 7.683.100	\$ 4.141.600
2	CTCP(p,t)	ALTA	\$ (275.350.000)	\$ (377.620.000)	\$ (188.070.000)	\$ (101.230.000)	\$ (377.480.000)	
		MEDIA	\$ (275.350.000)	\$ (377.620.000)	\$ (188.070.000)	\$ (101.230.000)	\$ (377.480.000)	
		BAJA	\$ (148.700.000)	\$ (377.620.000)	\$ (187.950.000)	\$ (29.183.000)	\$ (377.480.000)	
2	CTFP(p,t)	ALTA	\$ (73.965.000)	\$ (96.388.000)	\$ (45.968.000)	\$ (28.047.000)	\$ (94.552.000)	
		MEDIA	\$ (73.965.000)	\$ (96.388.000)	\$ (45.968.000)	\$ (28.047.000)	\$ (94.552.000)	
		BAJA	\$ (39.608.000)	\$ (96.388.000)	\$ (45.537.000)	\$ (8.085.400)	\$ (94.552.000)	
2	CTTP(p,t)	ALTA	\$ (9.898.700)	\$ (13.143.000)	\$ (6.626.200)	\$ (3.532.000)	\$ (13.211.000)	\$ (13.016.000)
		MEDIA	\$ (9.898.700)	\$ (13.143.000)	\$ (6.626.200)	\$ (3.532.000)	\$ (13.211.000)	\$ (13.016.000)
		BAJA	\$ (5.478.000)	\$ (13.143.000)	\$ (6.626.200)	\$ (1.018.200)	\$ (13.211.000)	\$ (13.016.000)
2	CTISOBP(p,t)	ALTA						
		MEDIA						
		BAJA						
2	CTIFALP(p,t)	ALTA						\$ (85.905.000)
		MEDIA						\$ (85.905.000)
		BAJA						\$ (85.905.000)
2	CTDEFPP(p,t)	ALTA	\$ (32.733)	\$ (43.069)	\$ (23.937)	\$ (11.532)	\$ (45.284)	
		MEDIA	\$ (32.733)	\$ (43.069)	\$ (23.937)	\$ (11.532)	\$ (45.284)	
		BAJA	\$ (17.870)	\$ (43.069)	\$ (24.067)	\$ (3.325)	\$ (45.284)	
2	CTMP(p,t)	ALTA	\$ (5.893.400)	\$ (7.838.200)	\$ (3.942.700)	\$ (2.101.100)	\$ (7.870.200)	\$ (7.375.200)
		MEDIA	\$ (5.893.400)	\$ (7.838.200)	\$ (3.942.700)	\$ (2.101.100)	\$ (7.870.200)	\$ (7.375.200)
		BAJA	\$ (3.258.000)	\$ (7.838.200)	\$ (3.942.500)	\$ (605.690)	\$ (7.870.200)	\$ (7.375.200)
2	BP (p)		\$ 164.583.864	\$ 255.744.092	\$ 94.022.159	\$ 47.390.591	\$ 226.003.847	\$ 1.406.026.200

p									BP (p)
P1	ALTA	\$ 86.416.861	\$ 33.947.060	\$ 40.086.158	\$ 79.102.398	\$ 28.786.401	\$ 448.072.100	\$ 716.410.978	
P1	MEDIA	\$ 86.416.861	\$ 33.947.060	\$ 40.086.158	\$ 79.102.398	\$ 28.786.401	\$ 448.072.100	\$ 716.410.978	
P1	BAJA	\$ 86.416.861	\$ 33.429.716	\$ 40.086.158	\$ 80.102.435	\$ 28.786.401	\$ 448.072.100	\$ 716.893.671	
P2	ALTA	\$ 62.984.367	\$ 85.248.031	\$ 31.466.863	\$ 20.710.868	\$ 75.334.616	\$ 468.675.400	\$ 744.420.144	
P2	MEDIA	\$ 62.984.367	\$ 85.248.031	\$ 31.466.863	\$ 20.710.868	\$ 75.334.616	\$ 468.675.400	\$ 744.420.144	
P2	BAJA	\$ 38.615.130	\$ 85.248.031	\$ 31.088.433	\$ 5.968.855	\$ 75.334.616	\$ 468.675.400	\$ 704.930.465	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 118. Costos totales y beneficios en el centro de distribución en el escenario

			BD (d) Beneficios esperados en el Centro de Distribución en el periodo en el escenario					
d			1	2	3	4	5	6
1	VPD(d,t)	ALTA	\$ 262.610.000	\$ 262.610.000	\$ 262.610.000	\$ 262.610.000	\$ 262.610.000	\$ 262.610.000
		MEDIA	\$ 262.610.000	\$ 262.610.000	\$ 262.610.000	\$ 262.610.000	\$ 262.610.000	\$ 262.610.000
		BAJA	\$ 239.510.000	\$ 260.700.000	\$ 255.660.000	\$ 262.610.000	\$ 262.610.000	\$ 262.610.000
1	CTCD(d,t)	ALTA	-\$ 229.420.000	-\$ 215.450.000	-\$ 134.360.000	-\$ 183.010.000	-\$ 197.570.000	-\$ 273.750.000
		MEDIA	-\$ 229.420.000	-\$ 215.450.000	-\$ 134.360.000	-\$ 183.010.000	-\$ 197.570.000	-\$ 273.750.000
		BAJA	-\$ 189.320.000	-\$ 237.430.000	-\$ 131.220.000	-\$ 180.800.000	-\$ 197.570.000	-\$ 273.750.000
1	CTTD(d,t)	ALTA	-\$ 4.974.400	-\$ 4.974.400	-\$ 4.974.400	-\$ 4.974.400	-\$ 4.974.400	-\$ 4.974.400
		MEDIA	-\$ 4.974.400	-\$ 4.974.400	-\$ 4.974.400	-\$ 4.974.400	-\$ 4.974.400	-\$ 4.974.400
		BAJA	-\$ 4.556.800	-\$ 4.939.900	-\$ 4.848.000	-\$ 4.974.400	-\$ 4.974.400	-\$ 4.974.400
1	CTISOBD(d,t)	ALTA	-\$ 312.450	-\$ 400.200	-\$ 70.794			-\$ 400.200
		MEDIA	-\$ 312.450	-\$ 400.200	-\$ 70.794			-\$ 400.200
		BAJA	-\$ 187.000	-\$ 400.200	-\$ 82.666			-\$ 400.200
1	CTDEFD(d,t)	ALTA	-\$ 14.692.000	-\$ 13.496.000	-\$ 8.663.500	-\$ 11.683.000	-\$ 12.536.000	-\$ 17.262.000
		MEDIA	-\$ 14.692.000	-\$ 13.496.000	-\$ 8.663.500	-\$ 11.683.000	-\$ 12.536.000	-\$ 17.262.000
		BAJA	-\$ 12.096.000	-\$ 14.919.000	-\$ 8.480.700	-\$ 11.540.000	-\$ 12.536.000	-\$ 17.262.000
1	CTMD(d,t)	ALTA	-\$ 725.520	-\$ 696.780	-\$ 563.770	-\$ 646.230	-\$ 668.800	-\$ 796.400
		MEDIA	-\$ 725.520	-\$ 696.780	-\$ 563.770	-\$ 646.230	-\$ 668.800	-\$ 796.400
		BAJA	-\$ 627.000	-\$ 731.940	-\$ 549.960	-\$ 642.440	-\$ 668.800	-\$ 796.400
1	BD (d)		\$ 57.694.460	\$ 57.464.200	\$ 338.433.746	\$ 189.245.900	\$ 140.582.400	\$ (103.719.000)

Fuente: elaboración propia.

Tabla 119. Costos totales y beneficios en el centro de distribución en el escenario

		BD (d)						
		Beneficios esperados en el Centro de Distribución en el periodo en el escenario						
d			1	2	3	4	5	6
2	VPD(d,t)	ALTA	\$ 278.040.000	\$ 278.040.000	\$ 278.040.000	\$ 278.040.000	\$ 278.040.000	\$ 278.040.000
		MEDIA	\$ 278.040.000	\$ 278.040.000	\$ 278.040.000	\$ 278.040.000	\$ 278.040.000	\$ 278.040.000
		BAJA	\$ 203.490.000	\$ 269.120.000	\$ 253.540.000	\$ 215.780.000	\$ 278.040.000	\$ 278.040.000
2	CTCD(d,t)	ALTA	-\$ 262.380.000	-\$ 209.320.000	-\$ 144.640.000	-\$ 184.590.000	-\$ 203.540.000	-\$ 289.240.000
		MEDIA	-\$ 262.380.000	-\$ 209.320.000	-\$ 144.640.000	-\$ 184.590.000	-\$ 203.540.000	-\$ 289.240.000
		BAJA	-\$ 206.250.000	-\$ 187.160.000	-\$ 147.310.000	-\$ 131.830.000	-\$ 203.540.000	-\$ 289.240.000
2	CTTD(d,t)	ALTA	-\$ 5.250.600	-\$ 5.250.600	-\$ 5.250.600	-\$ 5.250.600	-\$ 5.250.600	-\$ 5.250.600
		MEDIA	-\$ 5.250.600	-\$ 5.250.600	-\$ 5.250.600	-\$ 5.250.600	-\$ 5.250.600	-\$ 5.250.600
		BAJA	-\$ 3.896.300	-\$ 5.089.000	-\$ 4.809.000	-\$ 4.116.600	-\$ 5.250.600	-\$ 5.250.600
2	CTISOBD(d,t)	ALTA	-\$ 427.800	-\$ 427.800	-\$ 124.460			-\$ 427.800
		MEDIA	-\$ 427.800	-\$ 427.800	-\$ 124.460			-\$ 427.800
		BAJA	-\$ 427.800	-\$ 345.000	-\$ 153.940			-\$ 427.800
2	CTDEFD(d,t)	ALTA	-\$ 16.423.000	-\$ 12.961.000	-\$ 9.326.400	-\$ 11.461.000	-\$ 12.910.000	-\$ 17.943.000
		MEDIA	-\$ 16.423.000	-\$ 12.961.000	-\$ 9.326.400	-\$ 11.461.000	-\$ 12.910.000	-\$ 17.943.000
		BAJA	-\$ 12.965.000	-\$ 11.573.000	-\$ 9.507.400	-\$ 8.224.300	-\$ 12.910.000	-\$ 17.943.000
2	CTMD(d,t)	ALTA	-\$ 836.740	-\$ 736.000	-\$ 634.890	-\$ 694.510	-\$ 736.000	-\$ 878.600
		MEDIA	-\$ 836.740	-\$ 736.000	-\$ 634.890	-\$ 694.510	-\$ 736.000	-\$ 878.600
		BAJA	-\$ 640.780	-\$ 684.940	-\$ 607.910	-\$ 519.090	-\$ 736.000	-\$ 878.600
2	BD (d)		\$ (35.246.160)	\$ 162.957.260	\$ 327.279.050	\$ 223.177.790	\$ 166.810.200	\$ (107.100.000)

d															
D1	ALTA	\$	12.485.630	\$	27.592.620	\$	113.977.536	\$	62.296.370	\$	46.860.800	\$	(34.573.000)	\$	228.639.956
D1	MEDIA	\$	12.485.630	\$	27.592.620	\$	113.977.536	\$	62.296.370	\$	46.860.800	\$	(34.573.000)	\$	228.639.956
D1	BAJA	\$	32.723.200	\$	2.278.960	\$	110.478.674	\$	64.653.160	\$	46.860.800	\$	(34.573.000)	\$	222.421.794
D2	ALTA	\$	(7.278.140)	\$	49.344.600	\$	118.063.650	\$	76.043.890	\$	55.603.400	\$	(35.700.000)	\$	256.077.400
D2	MEDIA	\$	(7.278.140)	\$	49.344.600	\$	118.063.650	\$	76.043.890	\$	55.603.400	\$	(35.700.000)	\$	256.077.400
D2	BAJA	\$	(20.689.880)	\$	64.268.060	\$	91.151.750	\$	71.090.010	\$	55.603.400	\$	(35.700.000)	\$	225.723.340

Fuente: elaboración propia.

Tabla 120. Costos totales y beneficios en el detallista en el escenario

			BR (r) Beneficios esperados en el Detallista en el periodo en el escenario					
r			1	2	3	4	5	6
1	VPR(r,t)	ALTA	\$ 338.460.000	\$ 328.590.000	\$ 328.590.000	\$ 346.180.000	\$ 346.120.000	\$ 345.960.000
		MEDIA	\$ 345.630.000	\$ 346.730.000	\$ 346.270.000	\$ 302.110.000	\$ 280.290.000	\$ 345.630.000
		BAJA	\$ 334.190.000	\$ 197.600.000	\$ 258.090.000	\$ 214.850.000	\$ 276.670.000	\$ 327.700.000
1	CTISOBR(r,t)	ALTA						
		MEDIA	\$ (210.320)		\$ (34.800)		\$ (127.000)	\$ (263.120)
		BAJA		\$ (34.800)	\$ (158.400)	\$ (299.200)	\$ (505.800)	\$ (510.400)
1	CTIFALR(r,t)	ALTA				\$ (5.275.800)	\$ (10.534.000)	\$ (15.746.000)
		MEDIA	\$ (17.931.000)	\$ (7.592.300)	\$ (15.515.000)	\$ (4.951.500)		\$ (15.313.000)
		BAJA	\$ (32.589.000)					
1	CTCR(r,t)	ALTA	\$ (260.180.000)	\$ (260.180.000)	\$ (260.180.000)	\$ (260.180.000)	\$ (260.180.000)	\$ (260.180.000)
		MEDIA	\$ (260.180.000)	\$ (260.180.000)	\$ (260.180.000)	\$ (260.180.000)	\$ (260.180.000)	\$ (260.180.000)
		BAJA	\$ (170.580.000)	\$ (249.350.000)	\$ (228.730.000)	\$ (197.910.000)	\$ (260.180.000)	\$ (260.180.000)
1	CTMR(r,t)	ALTA	\$ (395.850)	\$ (390.000)	\$ (390.000)	\$ (400.400)	\$ (400.400)	\$ (400.400)
		MEDIA	\$ (400.400)	\$ (400.400)	\$ (400.400)	\$ (374.400)	\$ (361.400)	\$ (400.400)
		BAJA	\$ (327.210)	\$ (303.940)	\$ (325.000)	\$ (275.600)	\$ (358.800)	\$ (390.000)
1	BR(r)		\$ 275.486.220	\$ 94.488.560	\$ 167.036.400	\$ 133.293.100	\$ 110.252.600	\$ 205.726.680

Fuente: elaboración propia.

Tabla 121. Costos totales y beneficios en el detallista en el escenario

		BR (r)						
		Beneficios esperados en el Detallista en el periodo en el escenario						
r		1	2	3	4	5	6	
2	VPR(r,t)	ALTA	\$ 356.490.000	\$ 356.420.000	\$ 356.420.000	\$ 356.420.000	\$ 356.420.000	\$ 356.420.000
		MEDIA	\$ 356.360.000	\$ 356.540.000	\$ 356.540.000	\$ 356.540.000	\$ 356.540.000	\$ 356.300.000
		BAJA	\$ 356.360.000	\$ 356.540.000	\$ 356.540.000	\$ 356.540.000	\$ 294.320.000	\$ 282.390.000
2	CTISOBR(r,t)	ALTA	\$ (40.480)	\$ (40.480)	\$ (40.480)	\$ (40.480)	\$ (40.480)	\$ (40.480)
		MEDIA	\$ (40.940)	\$ (40.480)	\$ (40.480)	\$ (40.480)	\$ (40.480)	\$ (40.940)
		BAJA					\$ (249.200)	\$ (546.600)
2	CTIFALR(r,t)	ALTA						
		MEDIA						
		BAJA						
2	CTCR(r,t)	ALTA	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)
		MEDIA	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)
		BAJA	\$ (272.420.000)	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)	\$ (280.470.000)
2	CTMR(r,t)	ALTA	\$ (421.200)	\$ (421.200)	\$ (421.200)	\$ (421.200)	\$ (421.200)	\$ (421.200)
		MEDIA	\$ (421.200)	\$ (421.200)	\$ (421.200)	\$ (421.200)	\$ (421.200)	\$ (421.200)
		BAJA	\$ (415.220)	\$ (421.200)	\$ (421.200)	\$ (421.200)	\$ (384.800)	\$ (377.000)
2	BR(r)		\$ 234.510.960	\$ 226.745.440	\$ 226.745.440	\$ 226.745.440	\$ 164.312.640	\$ 151.852.580

r		BR (r)						
R1	ALTA	\$ 77.884.150	\$ 68.020.000	\$ 68.020.000	\$ 80.323.800	\$ 75.005.600	\$ 69.633.600	\$ 438.887.150
R1	MEDIA	\$ 66.908.280	\$ 78.557.300	\$ 70.139.800	\$ 36.604.100	\$ 19.621.600	\$ 69.473.480	\$ 341.304.560
R1	BAJA	\$ 130.693.790	\$ (52.088.740)	\$ 28.876.600	\$ 16.365.200	\$ 15.625.400	\$ 66.619.600	\$ 206.091.850
R2	ALTA	\$ 75.558.320	\$ 75.488.320	\$ 75.488.320	\$ 75.488.320	\$ 75.488.320	\$ 75.488.320	\$ 452.999.920
R2	MEDIA	\$ 75.427.860	\$ 75.608.320	\$ 75.608.320	\$ 75.608.320	\$ 75.608.320	\$ 75.367.860	\$ 453.229.000
R2	BAJA	\$ 83.524.780	\$ 75.648.800	\$ 75.648.800	\$ 75.648.800	\$ 13.216.000	\$ 996.400	\$ 324.683.580

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 122, se muestra la solución del modelo para la planificación de la cadena de suministro colaborativa en contexto de incertidumbre objeto de estudio en los tres escenarios establecidos alto, medio y bajo para unos beneficios en cada escenario de \$ 5.146.132.791, \$ 5.048.779.281 y 4.532.596.643 millones respectivamente. Adicionalmente obtenemos el valor del beneficio total esperado \$4.909.164.663 millones cuyo resultado es el producto de la probabilidad de cada escenario por su beneficio esperado.

Estos valores han considerado parámetros establecidos como inputs del modelo, las variables en cada escenario, los costos por compra, transporte, sobrante, faltante, por disposición de defectuosos y por manipulación.

Tabla 122. Beneficios totales y esperados en la cadena de suministro en el escenario

	BT(r)	
ALTA	\$	5.146.132.792
MEDIA	\$	5.048.779.282
BAJA	\$	4.532.596.643

	BTESP (r)	
ALTA	\$	1.715.375.882
MEDIA	\$	1.682.924.744
BAJA	\$	1.510.864.037
	\$	4.909.164.663

Fuente: elaboración propia.

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

6.1 INTRODUCCIÓN

La investigación a través de metodologías en programación dinámica ha abordado el problema de planificar cadenas de suministro colaborativa en un contexto de incertidumbre a través de un modelo aplicado a una cadena de suministro cementera. El modelo propuesto busca aportar en el proceso de toma de decisiones colaborativas a nivel táctico y operativo, como la cantidad a comprar y transportar, las cantidades a producir, las ventas a efectuar y los niveles de inventario requeridos para el mayor beneficio global de la cadena.

El modelo matemático puede ser aplicado y adaptado a cualquier caso, independientemente del sector al que pertenezca ya que tiene en cuenta variables de decisión críticas que permitirán a partir de la solución encontrada mostrar el mejor comportamiento de dichas variables teniendo en cuenta el objetivo establecido en la cadena.

6.2 SOBRE LA PLANIFICACIÓN USANDO METODOLOGÍAS DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA BAJO INCERTIDUMBRE EN CADENAS DE SUMINISTRO COLABORATIVA

La revisión de la literatura permitió establecer un gran número de definiciones de cadena de suministro que son importantes en la meta de entender la complejidad en la integración de una red que contiene diferentes sistemas de negocio. Así mismo, se identificó la tipología de las cadenas de suministro, se contextualizó la planificación de tipo colaborativa analizando las posibles formas y relaciones de colaboración que deben establecer los diferentes socios, los beneficios que dicha colaboración les puede dar y la clarificación en la toma de decisiones alrededor de

la colaboración mutua entre eslabones mediante el intercambio fluido de información. Adicionalmente, se analizó la estructura del proceso genérico de colaboración para poder entender el contexto de incertidumbre.

En coincidencia con Shapiro (1998); Chopra y Meindl, (2001); Van Landeghem y Vanmaele, (2002). Rohde et al. (2000), Fleischmann, Meyr y Wagner (2005) y Stadtler (2005) se estableció una perspectiva respecto a los niveles de planificación de la cadena de suministro haciendo referencia a los niveles jerárquicos táctico y operativo ya que estos están más relacionados con la tipología de toma de decisiones del modelo propuesto en cada una de las etapas de la cadena de suministro.

Teniendo en cuenta la clasificación de los métodos de modelado para la planificación jerárquica en la cadena de suministro colaborativa que han hecho distintos autores y entre los que se pueden mencionar: modelos deterministas, estocásticos, híbridos y modelos IT, se analizaron los tipos de modelo en el contexto de incertidumbre.

Con base en la utilización de metodologías de Programación Dinámica se ha abordado el problema de planificación de cadenas de suministro colaborativa en contexto de incertidumbre con el fin de maximizar el margen de beneficios de todos los eslabones de la cadena de suministro.

Es así como, el modelo propuesto parte de parámetros bajo incertidumbre logrando incluir variables aleatorias de decisión que son críticas y poco utilizadas en investigaciones como la consideración de defectuosos, sobrantes y faltantes; variables relevantes al momento de tomar decisiones y que generan a su vez la posibilidad de analizar el comportamiento de los beneficios para toda la cadena. La

incertidumbre en la demanda es abordada a través de la construcción de escenarios: alto, medio y bajo con sus respectivas probabilidades asociadas.

El modelo es validado a partir de los datos de una empresa del sector cementero como una contribución hacia la implementación de investigaciones alrededor de la planificación de la cadena de suministros colaborativa en la búsqueda de maximización de los beneficios para todos los miembros de la cadena, por ello se considera esta investigación como un aporte importante a la literatura que se encuentra sobre cadenas de suministro relacionadas con el sector cementero.

Por ser un modelo de gran tamaño que contempla un alto número de variables y restricciones, se debió utilizar un software especializado.

El lenguaje de modelado utilizado fue GAMS, al cual se le suministró la estructura matemática del modelo de acuerdo con su propia sintaxis y se corrió a través de un servidor totalmente gratis en Internet, NEOS Server, el cual permitió encontrar el resultado óptimo para la función objetivo y para las variables definidas como cantidad a comprar y transportar de materia prima y producto terminado en cada una de las etapas de la cadena, los niveles de inventario al final de cada periodo y las ventas efectuadas de cada producto final.

Por todo lo anterior, este proyecto abre la oportunidad de extender el campo de trabajo investigativo hacia el planteamiento y desarrollo de nuevos modelos que permitan dar solución a problemas de planificación de cadenas de suministro.

6.3 SOBRE LA VIABILIDAD DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO COLABORATIVA EN UN CONTEXTO DE INCERTIDUMBRE

El modelo matemático que se desarrolló para la planificación de cadena de suministro colaborativa en contexto de Incertidumbre aplicado al sector cementero en un caso específico de estudio, utilizando la metodología de Programación Dinámica, demostró que es una herramienta valiosa para agilizar la toma de decisiones en la organización hacia el objetivo de maximizar el margen de beneficios a lo largo de toda la cadena.

A su vez se analizó profundamente la estructura de la cadena de suministro específica del sector cementero para entender más claramente el comportamiento de esta y poder implementarla en el modelo propuesto a fin de mostrar los beneficios de éste.

Así mismo, a partir de los datos históricos reales recopilados de la empresa del sector cementero, se puso en funcionamiento el modelo en el lenguaje GAMS y se analizaron los resultados obtenidos. Logrando concluir que el modelo cumple con las restricciones de fabricación, transporte e inventario, convirtiéndose en una herramienta importante para la toma de decisiones alrededor de una cadena de suministro.

La metodología implementada presenta alternativas para posibilitar la realización de nuevas investigaciones alrededor de la implementación de modelos basados en programación dinámica para cadenas de suministro.

6.4 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

El modelo propuesto e implementado para la panificación de la cadena de suministro colaborativa en contexto de incertidumbre deja grandes oportunidades para futuras investigaciones entre las cuales se proponen: incluir dentro del modelo la problemática interna referente a los procesos productivos de fabricación, consideración de restricciones de inventarios de seguridad, capacidad financiera, costos por mantenimiento de equipos y costos por asesorías técnicas.

BIBLIOGRAFÍA

Alarcón, F. y Ortíz, A. (2004). Planificación colaborativa en un contexto de varias cadenas de suministro: ventajas y desventajas. *VIII Congreso de Ingeniería de Organización*, Leganés, Madrid.

Angeles, R. y Nath, R. (2001). Partner congruence in electronic data interchange (EDI) enabled relationships. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 109–127.

APICS (Diccionario, Edición 11, 2005). The educational society for resource management announces the release of the 11th edition of the industry standard. APICS Dictionary and the APICS Illustrated Dictionary on CD-ROM.

Arns, M., Fischer, M., Kemper, P. y Tepper, C. (2002). Supply chain modelling and its analytical evaluation. *Journal of the Operational Research Society*, 53, 885-894.

Arrow, K.A., Harris, T.E., y Marschak, J. (1951). Optimal inventory policy. *Econometrica*, 19, 250–272.

Barrat, M. (2004). Understanding the meaning of collaboration in the supply chain. *Supply Chain Management: An International Journal*, 9(1), 30-42.

Beamon, B.M. (1999). Measuring supply chain performance. *International Journal of Operations & Production Management*, 19(3), 275-292.

Bellman, R.E. (1957). *Dynamic programming*. London: Princeton University Press.

Bès, C. y Sethi, S. (1987). Concepts of forecast and decision horizons: applications to dynamic stochastic optimization problems. *Mathematics of Operations Research*, 13, 295-310.

Birendra, M., Srinivasan, R. y Xiaohang, Y. (2007). Information sharing in supply chains: incentives for information distortion. *IEE Transactions*, 39(9), 863-877.

Bowersox, D. (1990). The strategic benefits of logistic alliances. *Harvard Business Review*, 68(4), 36-43.

Brown, R. (1828). A brief account of microscopical observations made in the months of June, July and August, 1827, on the particles contained in the pollen of plants, and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies. *Philosophical Magazine N.S.*, 4, 161-173.

Burton, R.M. y Obel, B. (1980). A computer simulation test of the m-form hypotheses. *Administrative Science Quarterly*, 25(3), 457-566.

Burton, R.M. y Obel, B. (1984). *Designing efficient organization: modelling and experimentation*. Amsterdam: North Holland.

Burton, R.M. y Obel, B. (1988). Opportunism, incentives, and the m-form hypothesis: a laboratory study. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 10, 99-119.

Burton, R.M. y Obel, B. (1989). Using historical information in the design of a decentralized firm's budgetary planning system. *Computers and Operations Research*, 16(2), 129-143.

Burton, R. M. y Obel, B. (1995). *Design models for hierarchical organizations: computation, information, and decentralization*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Buzzell, R. y Ortmeyer, G. (1995). Channel partnerships streamline distribution. *Sloan Management Review*, 36(3), 83-96.

Cannella S., Ciancimino E., Framinan J.M. y Disney S.M. (2010). Los cuatro arquetipos de cadenas de suministro. *Universia Business Review*, 26, 134-149.

Chen, C.L. y Lee, W.C. (2004). Multi-objective optimization of multi-echelon supply chain networks with uncertain product demands and prices. *Computer & Chemical Engineering*, 28(6-7), 1131-1144.

Chopra, S. y Meindl, P. (2001). *Supply chain management: strategy, planning and operations* (1ra edición). New Jersey: Prentice Hall, 35-36.

Chopra, S. y Meindl, P. (2007). *Supply chain management: strategy, planning and operations* (3ra edición). New Jersey: Prentice Hall.

Company, R. (2003). *Teoría de la decisión*. Barcelona: CpdA-ETSEIB.

Company, R. (2005). *Diseño de sistemas productivos y logísticos*. Barcelona: EPSEB-UPC.

Corbett, C., Blackburn, J. y Wassenhove, L. (1999). Case study partnerships to improve supply chains. *Sloan Management Review*, 40(4), 71-82.

Coronado-Hernández, J., García-Sabater, J. y Maheut, J. (2010). Modelo de optimización estocástica para la planificación de cadenas de suministro para productos con ciclo de vida cortos. *XIV Congreso Ingeniería de Organización*. Donostia, San Sebastián.

CSCM (Diccionario, 2010). Council of supply chain of management professionals. Recuperado de: <http://cscmp.org/aboutcscmp/definitions/definition.asp>.

Dávila, J.G. (2012). Modelo Matemático para la optimización de una cadena de suministro global con consideraciones de cupos de compra y periodos de pago. *El Hombre y La Máquina*, 38, 6-21.

Delgado, M. C., Cortés, P., Muñuzuri, J. y Onieva, L. (2009). Una revisión sobre los sistemas multiagente en la ingeniería de organización. *Dirección y organización*, 38, 58-65.

Ellram, L. M. (1991). Supply chain management: the industrial organization perspective. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 21, 13–22.

Ellram, L. y Hendrick, T. (1995). Partnering characteristics: a dyadic perspective. *Journal of Business Logistics*, 16(1), 41–64.

Escudero, L.F., Galindo, E., García, G., Gómez, E. y Sabau, V. (1999). Schumann, a modelling framework for supply chain management under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 119(1), 14-34.

Fleischmann, B., Meyr, H. y Wagner, M. (2002). *Advanced planning*. En H. Stadler y C. Kilger (Ed.), *Supply chain management and advanced planning*. Berlín: Springer.

Fleischmann, B., Meyr, H. y Wagner, M. (2005). *Advanced planning*. En H. Stadler y C. Kilger (Ed.), *Supply chain management and advanced planning* (pp. 81-106). Berlín: Springer.

Forrester, J. W. (1961). Industrial dynamics: a major breakthrough for decision makers. *Harvard Business Review*, 36 (4), 37-66.

Gamboa, J. y Tabares, J. R. (2012). Diseño de un modelo matemático aplicado a la planeación de la producción y distribución de la supply chain de una empresa de consumo masivo (Tesis de maestría). Universidad ICESI, Santiago de Cali, Colombia.

García A. y Smith R.L. (2000). Solving nonstationary infinite horizon dynamic optimization problems. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 244(2), 304-317.

Golicic, S., Foggin, J., y Mentzer, J. (2003). Relationship magnitude and its role in interorganizational relationship structure. *Journal of Business Logistics*, 24(1), 57–75.

Green, K. y Inman, R. (2005). Using a just-in-time selling strategy to strengthen supply chain linkages. *International Journal of Production Research*, 43(16), 3437 - 3453.

Handfield, R. B. y Nichols, E. L. (1997). *Introduction to supply chain management*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.

Heizaer, J. y Render, B. (2004). *Principios de administración de operaciones*. México: Pearson Education, 409-432.

Holweg, M., Disney, S., Holmström, J. y Smàros, J. (2005). Supply chain collaboration: making sense of the strategy continuum. *European Management Journal*, 23(2), 170–181.

Hong, L. y Shang, J. (2001) Integrated model for production planning in a large iron and steel manufacturing environment. *International Journal of production research*, 39(9), 2037-2062.

Jiménez, J. E. y Hernández, S. (2002). *Marco conceptual de la cadena de suministro: Un nuevo enfoque logístico*. México: CEDEX.

Kleywegt A.J. y Shapiro A. (2000). *Stochastic optimization, school of industrial and systems engineering*. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 120-128.

Lambert, D., Emmelhainz, M. y Gardner, T. (1999). Building successful partnerships. *Journal of Business Logistics*, 21(1), 165-181.

Lario, F.C. y Vicens, E. (2006). Modelos conceptuales de la cadena/red de suministro (R/CdS) en un contexto de modelado de procesos de negocio. X Congreso de Ingeniería de Organización CIO'2006. Valencia, España.

Lariviere, M.A. (1999). *Supply chain contracting and coordination with stochastic demand*. En S. Tayur, R. Ganeshan, M. Magazine (eds). *Quantitative methods for supply chain management*. Norwell, M.A: Kluwe Academia Publishers.

Leontief, W. (1966). *Input–Output economics*. New York: Oxford University Press.

Li, J., Sikora, R., Shaw, M. y Woo, G. (2006). A strategic analysis of inter organizational information sharing. *Decision Support Systems*, 42, 251-266.

Manthou, V., Vlachopoulou, M. y Folinas, D. (2004). Virtual e-Chain (VeC) model for supply chain collaboration. *International Journal of Production Economics*, 87(3), 241–250.

Mena O'meara, N.A. (2010). Planificación maestra de operaciones en la gestión de la cadena de suministro en contexto de incertidumbre en el sector cerámico. Propuesta de modelado y resolución basada en redes neuronales artificiales (ANN) (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. doi:10.4995/Thesis/10251/9088.

Mena, N., Lario, F.C. y Vicens, E. (2009). Modelo Matemático con incertidumbre para una red de suministro: un enfoque a las redes neuronales. *3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*. Barcelona.

Mentzer, J., Foggin, J. y Golicic, S. (2000). Collaboration: the enablers, impediments, and benefits. *Supply Chain Management Review*, 5(6), 52–58.

Mentzer, W., DeWitt, J.S., Keebler, S., Min, N.W., Nix, C.D. y Zacharia, Z.G. (2001). Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1–25.

Min, H. y Zhou, G. (2002). Supply chain modeling: past, present and future. *Computers & Industrial Engineering*, 43(1-2), 231-249.

Mishra, B., Raghunathan, S. y Yue, X. (2007). Information sharing in supply chains: incentives for information distortion. *International Journal of Production Research*, 39, 863-877.

Morse, M.P. y Kimbal, G.E. (1951). *Methods of operations research*. Cambridge, MA: MIT Press.

Mula, J., Poler, R. y Lario, F.C. (2002). Modelos y métodos para la planificación de la producción de la cadena de suministro bajo incertidumbre: una introducción al estado del arte. *II Conferencia de Ingeniería de Organización*, 447-456. Vigo, España.

Organización SAP. (2006). Cumplimiento colaborativo con mySAP SCM. Recuperado de: <http://www.sap.com/spain/industries/hightech/brochures/index.epx>.

Paulraj, A. (2002). Towards a unified theory in supply chain management: critical constructs and their effect on performance (Tesis de doctorado). Cleveland State University, Estados Unidos.

Pidd, M. (1996). "Tools for Thinking" John Wiley, 187-196.

Peñalosa, M. (2004). La clave para el éxito empresarial ¡la satisfacción del cliente! *Visión Gerencial. CIDE*, 3, Enero-Julio, 39-40.

Ribas, I. y Companys, R. (2007). Estado del arte de la planificación colaborativa en la cadena de suministro: Contexto determinista e incierto. *Intangible Capital*, 3(3), 91-121.

Rohde, J., Meyr, H. y Wagner, M. (2000). Die supply chain planning matrix. *PPS. Management*, 5, 10-15.

Schneeweiss, C. (1995). Hierarchical structures in organizations: a conceptual framework. *European Journal of Operational Research*, 86, 4-31.

Schneeweiss, C. (1998). Hierarchical planning in organizations: elements of a general theory. *International Journal of Production Economics*, 56-57, 547-556.

Schneeweiss, C. (2002). Distributed decision making in supply chain management. *Int. J. Production Economics*, 84, 71–83. SCOR 9.0. DOI: 10.1016/S0925-5273(96)00109-0.

Seifert, D. (2003). *Collaborative planning, forecasting, and replenishment: how to create a supply chain advantage*. New York: AMACOM.

Shapiro, J. (1998). *Bottom-up versus top-down approaches to supply chain modelling*. En *Quantitative Models for Supply Chain Management* (739–759). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Sheu, C., Yen, H. y Chae, D. (2006). Determinants of supplier-retailer collaboration: evidence from an international study. *International Journal of Operations and Production Management*, 26(1), 24–49.

Simatupang, T. y Sridharan, R. (2002). The collaborative supply chain. *International Journal of Logistics Management*, 13(1), 15-30.

Simatupang, T. y Sridharan, R. (2005). An integrative framework for supply chain collaboration. *International Journal of Logistics Management*, 16(2), 257–274.

Simatupang, T. y Sridharan, R. (2008). Design for supply chain collaboration. *Business Process Management Journal*, 14(3), 401-418.

Simchi-Levi, D., Kaminsky, P. y Sinchi-Levi, E. (2000). *Designing and managing the supply chain: concepts, strategies and case studies*. New York: Irwin McGraw-Hill.

Soosay, C. (2008). Supply chain collaboration: capabilities for continuous innovation. *Supply Chain Management: An International Journal*, 13(2), 160-169.

Spekman, R., Kamauff, J. y Myhr, N. (1998). An empirical investigation into supply chain management: a perspective on partnership. *Supply Chain Management: An International Journal*, 3(2), 53-67.

Stadler, H. (2005). Supply chain management and advanced planning-basics, overview and challenges. *European Journal of Operational Research*, 163, 575-588.

Stadler, H. y Kilger, C. (2000). *Supply chain management and advanced planning, concepts, models, software and case studies*. Berlin: Springer, 427-438.

Stadler, H. y Kilger, C. (2002). *Supply chain management and advanced planning*. Berlin: Springer.

Stadler, H. y Kilger, C. (2008a). *Supply chain management an overview in supply chain management and advanced planning*. Berlin: Springer-Verlag.

Stadler, H. y Kilger, C. (2008b). *Supply chain management and advanced planning: concepts, models, software and case studies*. 4th Edition, Berlin: Springer.

Stank, T., Keller, S. y Daugherty, P. (2001). Supply chain collaboration and logistical service performance. *Journal of Business Logistics*, 22(1), 29–48.

Thompson, SD. y Davis, WJ. (1990). An integrated approach for modeling uncertainty in aggregate production planning. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 20(5), 1000-1012.

Thompson, SD., Watanabe, DT. y Davis, WJ. (1993). A comparative study of aggregate production planning strategies under conditions of uncertainty and cyclic product demands. *International of Production Research*, 31(8), 1957-1979.

Vachon, S. y Klassen, R. (2002). An Exploratory Investigation an the effects of Supply Chain Complexity an delivery Performance. *IEEE Transaction on Engineering Management*, 49(3), 218-230.

Van Landeghem, H. y Vanmaele, H. (2002). Robust planning: a new paradigm for demand chain planning. *Journal of Operations Management*, 20(6), 769–783.

Vilana, J.R. (2010). *La gestión de la cadena de suministro*. Nota técnica: 2.01. Madrid: Escuela de organización industrial.

Wooldridge, M. (2002). *An introduction to multiagent systems*. Chichester, UK: Wiley.

Wu, S.D. y Meixell, M.J. (1998). *Relating demand behavior and production policies in the manufacturing supply chain*. IMSE Technical Report 98T-007. Bethlehem, PA, USA: Lehigh University.

Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8, 338-353.

Zimmermann, H.J. (1996). *Fuzzy set theory – and its applications* (3ra edición). Dordrecht, MA: Kluwer Academic Publishers.

ANEXOS

ANEXO 1. Programación en GAMS. Modelo Matemático para la cadena de suministro colaborativa

```

C:\ALINA PERSONAL\Tesis\BackUp Tesis 27 de Noviembre 2015\Proyecto Investigación Noviembre 27 2015\MODI

SETS

s proveedores /1,2/
m materias primas /YESO, ESCORIA, CLINKER,SACO/
j productos /A, B/
p plantas /1,2/
q recursos de produccion /Q1, Q2/
d centros de distribución /1,2/
r detallistas /1,2/
c clientes /1,2/
t periodos /1, 2, 3, 4, 5, 6/;

TABLE
PUMSP (s,p,m) ($ por Ton) Precio Unitario de la Materia Prima Componente o Ítem m en el»
Proveedor s para la Planta p
YESO ESCORIA CLINKER SACO
1.1 20825 20298 59358 2958501
1.2 20825 20298 59358 2958501
2.1 20630 20546 59894 2988086
2.2 20630 20546 59894 2988086;

TABLE
PUMDEFSP (s,p,m) ($ por Ton) Precio Unitario de la Materia Prima Componente o Ítem m en el»
Proveedor s para la Planta p
YESO ESCORIA CLINKER SACO
1.1 13101 11979 44712 2218876
1.2 13101 11979 44712 2218876
2.1 12958 12158 44809 2241064
2.2 12958 12158 44809 2241064;

TABLE
CUFMS (s,m,t) ($ por Ton) Costo por Unidad de Fabricación de la Materia Prima Componen»
te o Ítem m en el Proveedor
1 2 3 4 5 6
1.YESO 1101 1101 1101 1101 1101 1101
1.ESCORIA 1979 1979 1979 1979 1979 1979
1.CLINKER 4712 4712 4809 4809 4809 4809
1.SACO 218876 218876 218876 218876 218876 218876
2.YESO 1101 1101 1101 1101 1101 1101
2.ESCORIA 1979 1979 1979 1979 1979 1979
2.CLINKER 4712 4712 4809 4809 4809 4809
2.SACO 218876 218876 218876 218876 218876 218876;

TABLE
CUTSP (s,p,m) ($ por Ton) Costo por Unidad de Transporte de la Materia Prima Componente»
o Ítem m desde el Proveedor s a la Planta p
YESO ESCORIA CLINKER SACO
1.1 3374 3099 1200 69344
1.2 3585 3148 1150 70037
2.1 3189 3281 1230 69691
2.2 3368 3292 1180 68994;

```

TABLE

CUMS (s,m) (\$ por Ton) Costo por Unidad de Manipulación de la Materia Prima Compo»
nente o ítem m en el Proveedor s

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	641	500	483	6693
2	565	630	579	6760;

TABLE

CUISOBS (s,m) (\$ por Ton) Costo por Unidad de Inventario Sobrante de la Materia Prima »
Componente o ítem m en el Proveedor s

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	367	276	430	8284
2	251	269	383	8367;

TABLE

CUIFALS (s,m) (\$ por Ton) Costo por Unidad de Inventario Faltante de la Materia Prima»
Componente o ítem m en el Proveedor s

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	5348	4889	16607	887550
2	5289	4964	16408	887550;

TABLE

CUDEFS (s,m) (\$ por Ton) Costo por Unidad de desechar defectuoso de Materia Prima C»
omponente o ítem m en el Proveedor s

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	367	276	430	284
2	251	269	383	367;

TABLE

NISinc (s,m) (Ton) Nivel de Inventario Inicial de Materia Prima Componente o ítem m en»
el Proveedor s

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	20	135	561	20
2	30	100	528	12;

TABLE

NCTSP (s,p,m) (Ton) Nivel de Capacidad de Transporte para la Materia Prima Componente o»
ítem m desde el Proveedor s a la Planta p

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1.1	140000	135000	173500	112880
1.2	140000	135000	173500	112880
2.1	138000	134000	172000	111019
2.2	138000	134000	172000	111019;

PARAMETER

CMIS (s) (Ton) Capacidad Máxima de Inventarios en el Proveedor s
/ 1 380186
2 370759/;

TABLE

CMAXFS (s,m) (Ton) Capacidad Máxima de Fabricación el Proveedor s

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	50000	55000	53500	22880
2	48000	44000	82000	21019;

TABLE

ALFA(s,m) Fracción de artículos defectuosos de Materia Prima Componente o Ítem m » en el Proveedor s

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	0.016	0.013	0.011	0.018
2	0.015	0.017	0.015	0.017;

TABLE

tasa(s,m) Tasa de detección de artículos defectuosos de Materia Prima Componente » o Ítem m en el Proveedor s

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	0.98	0.99	0.99	0.97
2	0.99	0.98	0.97	0.96;

TABLE

TTSP(s,p) Periodo de tiempo de Transporte desde el Proveedor s hasta la Planta p

	1	2
1	0	0
2	0	0;

TABLE

PUPPD(p,d,j) (\$ por Saco) Precio Unitario del Producto j desde la Planta p hasta el Ce » ntro de Distribución d

	A	B
1.1	12907	13022
1.2	12907	13022
2.1	12505	13210
2.2	12505	13210;

TABLE

PUPDEFPD(p,d,j) (\$ por Saco) Precio Unitario del Producto j defectuoso desde la Planta » p para el Centro de Distribución d

	A	B
1.1	9680	9766
1.2	9680	9766
2.1	9449	9684
2.2	9449	9684;

TABLE

CFCP(p,q,j,t) (\$ por Saco) Costo Fijo de Cambio de Partida de la Planta p sobre el Rec » urso de Producción q del producto j en el periodo t

	1	2	3	4	5	6
1.Q1.A	0	0	0	0	0	0
1.Q1.B	0	0	0	0	0	0
1.Q2.A	0	0	0	0	0	0
1.Q2.B	0	0	0	0	0	0
2.Q1.A	0	0	0	0	0	0
2.Q1.B	0	0	0	0	0	0
2.Q2.A	0	0	0	0	0	0
2.Q2.B	0	0	0	0	0	0;

TABLE

CUFPN(p,q,j,t) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Fabricación del producto j utilizando tiempo regular en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo t

	1	2	3	4	5	6
1.Q1.A	4374	4577	4741	4316	4697	4588
1.Q1.B	4340	4250	4843	4078	4514	4472
1.Q2.A	4505	4848	4104	4282	4591	4087
1.Q2.B	4751	4508	4446	4972	4824	4269
2.Q1.A	4737	4201	4693	4351	4031	4525
2.Q1.B	4710	4224	4940	4739	4383	4660
2.Q2.A	4241	4320	4068	4738	4033	4724
2.Q2.B	4972	4449	4779	4706	4402	4409;

TABLE

CUFPX(p,q,j,t) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Fabricación del producto j utilizando tiempo Extra en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo t

	1	2	3	4	5	6
1.Q1.A	14374	14577	4741	4316	4697	4588
1.Q1.B	14340	14250	4843	4078	4514	4472
1.Q2.A	14505	14848	4104	4282	4591	4087
1.Q2.B	14751	14508	4446	4972	4824	4269
2.Q1.A	14737	14201	4693	4351	4031	4525
2.Q1.B	14710	4224	4940	4739	4383	4660
2.Q2.A	14241	4320	4068	4738	4033	4724
2.Q2.B	14972	4449	4779	4706	4402	4409;

TABLE

CUSUBP(p,j) (\$ por Saco) Costo por unidad del producto j subcontractada por la Planta p

	A	B
1	15000	15000
2	15500	15500;

TABLE

CUTPD(p,d,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Transporte del producto j desde la Planta p al Centro de Distribución d

	A	B
1.1	517	517
1.2	562	562
2.1	595	595
2.2	598	598;

TABLE

CUMP(p,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Manipulación del producto j en la Planta p

	A	B
1	397	397
2	338	338;

TABLE

CUISOBP(p,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Inventario Sobrante del producto j en la Planta p

	A	B
1	444	444
2	482	482;

TABLE

CUIFALP(p,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Inventario Faltante del producto j en la »
Planta p

	A	B
1	3872	3907
2	3890	3937;

TABLE

CUDEFPP(p,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de desechar defectuoso de producto j en la »
Planta p

	A	B
1	244	244
2	215	215;

TABLE

NIPinc(p,j) (Saco) Nivel de Inventario inicial de producto j en la Planta p

	A	B
1	275	427
2	239	226;

TABLE

NCTPD(p,d,j) (Ton) Nivel de Capacidad de Transporte desde la Planta p hasta el Centro »
de Distribución d para el producto j

	A	B
1.1	10026	10926
1.2	19026	10926
2.1	10910	10910
2.2	10910	10910;

TABLE

MCFPN(p,q,t) (Sacos) Capacidad Máxima de fabricación utilizando tiempo regular en la P»
lanta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo de tiempo t

	1	2	3	4	5	6
1.Q1	10547	10562	10512	10684	10563	10522
1.Q2	10573	10559	10540	10681	10547	10554
2.Q1	10543	10563	10565	10688	10591	10592
2.Q2	10537	10554	10597	10669	10576	10524;

TABLE

MCFPEX(p,q,t) (Saco) Capacidad Máxima de fabricación utilizando tiempo extra en la Pla»
nta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo de tiempo t

	1	2	3	4	5	6
1.Q1	547	562	512	684	563	522
1.Q2	573	559	540	681	547	554
2.Q1	543	563	565	688	591	592
2.Q2	537	554	597	669	576	524;

PARAMETER

CMETP(p) (Ton) Capacidad Máxima de Entrada de Transporte en la Planta p

/ 1	49580
2	49200/;

PARAMETER

CMSTP(p) (Sacos) Capacidad Máxima de Salida de Transporte en la Planta p

/ 1	48643
2	42249/;

PARAMETER

CMIP (p) (Ton) Capacidad Máxima de Inventario en la Planta p
 / 1 89580
 2 89200/;

TABLE

BETA (p, j) Fracción de defectuosos para el producto j en la Planta p
 A B
 1 0.012 0.011
 2 0.010 0.009;

TABLE

ratep (p, j) Tasa de detección de Producto j defectuoso en la Planta p
 A B
 1 0.99 0.98
 2 0.97 0.99;

TABLE

tasap (p, m) Tasa de detección de artículos defectuosos de Materia Prima Componente »
 o Ítem m detectado en la Planta p
 YESO ESCORIA CLINKER SACO
 1 0.99 0.97 0.99 0.98
 2 0.98 0.98 0.97 0.97;

TABLE

MA (m, j) Unidad de Materia Prima Componente o Ítem m necesarias para la fabricació»
 n del Producto j
 A B
 YESO 0.0025 0.0025
 ESCORIA 0.0095 0.007
 CLINKER 0.038 0.0405
 SACO 0.002 0.002;

TABLE

PQSP (p, j) Porcentaje para definir la Cantidad a Subcontratar a partir de la cantidad »
 a Fabricar del Producto j en la Planta p
 A B
 1 0.1 0.1
 2 0.1 0.1;

TABLE

TTPD (p, d) Periodo de tiempo de Transporte desde la Planta p hasta el Centro de Distr»
 ibución d
 1 2
 1 0 0
 2 0 0;

TABLE

YY (p, q, j)
 A B
 1.Q1 0 0
 1.Q2 0 0
 2.Q1 0 0
 2.Q2 0 0;

TABLE

PUPDR(d,r,j) (\$ por Saco) Precio Unitario del Producto j desde el Centro de Distribución d al Detallista r

	A	B
1.1	17216	17365
1.2	17216	17365
2.1	17296	17500
2.2	17296	17500;

TABLE

CUTDR(d,r,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Transporte del productos j desde el Centro de Distribución d al Detallista r

	A	B
1.1	314	314
1.2	338	338
2.1	315	315
2.2	342	342;

TABLE

CUMD(d,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Manipulación del producto j en el Centro de Distribución d

	A	B
1	22	22
2	23	23;

TABLE

CUISOBD(d,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Inventario Sobrante del producto j en el Centro de Distribución d

	A	B
1	69	69
2	69	69;

TABLE

CUIFALD(d,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Inventario Faltante del producto j en el Centro de Distribución d

	A	B
1	5165	5209
2	5189	5250;

TABLE

CUDEFD(d,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de desechar defectuoso de producto j en el Centro de Distribución d

	A	B
1	840	840
2	820	820;

TABLE

NIDinc(d,j) Nivel de Inventario inicial de producto j en el Centro de Distribución d

	A	B
1	1250	700
2	1000	820;

PARAMETER

CMID(d) (Saco)Capacidad Máxima de Inventario en el Centro de Distribución d

/1	5800
2	6200/;

PARAMETER

CMSTD(d) (Saco)Capacidad Máxima de Salida de Transporte en el Centro de Distribución »
d
/1 15800
2 16200/;

TABLE

PUPRC(r,c,j) (\$ por Saco) Precio Unitario del Producto j desde el Detallista r al Cli»
ente c

	A	B
1.1	21813	22007
1.2	21813	22007
2.1	21913	22178
2.2	21913	22178;

TABLE

CUMR(r,j) (\$ por Saco)Costo por Unidad de Manipulación del producto j en el Detalli»
sta r

	A	B
1	13	13
2	13	13;

TABLE

CUISOBR(r,j) (\$ por Saco)Costo por Unidad de Inventario Sobrante del producto j en el »
Detallista r

	A	B
1	87	88
2	88	89;

TABLE

CUIFALR(r,j) (\$ por Saco)Costo por Unidad de Inventario Faltante del producto j en el »
Detallista r

	A	B
1	6544	6602
2	6574	6653;

TABLE

NCTDR(d,r,j) (Saco)Nivel de Capacidad de Transporte para el producto j desde el Centr»
o de Distribución d hasta el Detallista r

	A	B
1.1	3400	3400
1.2	5600	2800
2.1	4400	3800
2.2	5200	2600;

TABLE

NIRinc(r,j) (Saco)Nivel de Inventario inicial de producto j en el Detallista

	A	B
1	200	250
2	220	240;

PARAMETER

CMIR(r) (Saco)Capacidad Máxima de Inventario en el Detallista r
/1 5800
2 6200/;

PARAMETER

CMSTR(r) (Saco) Capacidad Máxima de Salida de Transporte en el Detallista r
 /1 15800
 2 16200/;

TABLE

tasad(d,j) Tasa de detección de Producto j defectuoso en la el Centro de Dis-
 tribución d

	A	B
1	0.99	0.97
2	0.98	0.99;

TABLE

TTDR(d,r) Periodo de tiempo de Transporte desde el Centro de Distribución d hast-
 a el Detallista r

	1	2
1	0	0
2	0	0;

TABLE

DEMC(c,j,t) (Saco) Demanda del cliente c del producto j en el periodo de tiempo t

	1	2	3	4	5	6
1.A	17000	1000	15000	10000	8000	15000
1.B	8000	14000	8000	8000	7000	9000
2.A	10000	14400	8000	9000	10000	8000
2.B	8000	9000	9000	3000	4000	1000;

FREE VARIABLES

BT Beneficio Total esperado de toda la cadena de suministro(\$)
 NIS(s,m,t) Nivel de Inventario de Materia Prima Componente o Ítem m en el Proveedor s para el Periodo t
 NIP(p,j,t) Nivel de Inventario de producto j en la Planta p para el Periodo t
 NID(d,j,t) Nivel de Inventario de producto j en el Centro de Distribución d para el Periodo t
 NIR(r,j,t) Nivel de Inventario de producto j en el Detallista r en el Periodo t
 BS(s) Beneficios esperados en el Proveedor s en el periodo t
 BP(p) Beneficios esperados en la Planta p en el periodo t
 BD(d) Beneficios esperados en el Centro de Distribución d en el periodo t
 BR(r) Beneficios esperados en el Detallista r en el periodo t

POSITIVE VARIABLES

QS(s,m,t) Cantidad de Materia Prima Componente o Ítem m compradas por el Proveedor s en el periodo t (Ton)
 QP(p,j,t) Cantidad a producir del producto j en la Planta p en el periodo t (Sacos)
 QPP(p,q,j,t) Cantidad a producir del producto j en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo t (Sacos)
 QPPN(p,q,j,t) Cantidad a producir del producto j en tiempo Normal en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo t (Sacos)
 QPPEX(p,q,j,t) Cantidad a producir del producto j en tiempo Extra en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo t (Sacos)
 QSUBP(p,j,t) Cantidad a Subcontratar del producto j en la Planta p en el periodo t

QTSP (s,p,m,t)	Materia Prima Componente o ítem a transportar desde el Proveedor s a la Planta p en el periodo t (Ton)
QTPD (p,d,j,t)	Cantidad de producto j a transportar desde la Planta p al Centro de Distribución d en el periodo t (Sacos)
QTDR (d,r,j,t)	Cantidad de producto j a transportar desde el Centro de Distribución d al Detallista r en el periodo t (Sacos)
QTRC (r,c,j,t)	Cantidad de producto j a transportar desde el Detallista r al Cliente c en el periodo t (Sacos)
QTISP (s,p,t)	Cantidad de transporte Total desde el Proveedor s a la Planta p en el periodo t (Ton)
QTTPD (p,d,t)	Cantidad de transporte Total desde la Planta p al Centro de Distribución d en el periodo t (Sacos)
QTDDR (d,r,t)	Cantidad de transporte Total desde el Centro de Distribución d al Detallista r en el periodo t (Sacos)
QTTRC (r,c,t)	Cantidad de transporte Total desde el Detallista r al Cliente c en el periodo t (Sacos)
NISOBS (s,m,t)	Nivel de Inventario sobrante de Materia Prima Componente o ítem m en el Proveedor s para el Periodo t
NIFALS (s,m,t)	Nivel de Inventario faltante de Materia Prima Componente o ítem m en el Proveedor s para el Periodo t
NISOBP (p,j,t)	Nivel de Inventario sobrante de producto j en la Planta p para el Periodo t
NIFALP (p,j,t)	Nivel de Inventario faltante de producto j en la Planta p para el Periodo t
NISOBD (d,j,t)	Nivel de Inventario sobrante de producto j en el Centro de Distribución d para el Periodo t
NIFALD (d,j,t)	Nivel de Inventario faltante de producto j en el Centro de Distribución d para el Periodo t
NISOBR (r,j,t)	Nivel de Inventario sobrante de producto j en el Detallista r en el Periodo t
NIFALR (r,j,t)	Nivel de Inventario faltante de producto j en el Detallista r en el Periodo t
CTTS (s,t)	Costo Total de Transporte del Proveedor s en t
CTTP (p,t)	Costo Total de Transporte de la Planta p en t
CTTD (d,t)	Costo Total de Transporte del Centro de Distribución d en t
CTISOBS (s,t)	Costo total del inventario sobrante del Proveedor s en el Periodo t
CTISOBP (p,t)	Costo Total del Inventario sobrante de la Planta p en el Periodo t
CTISOBD (d,t)	Costo Total del Inventario sobrante del Centro de Distribución d en el Periodo t
CTISOBR (r,t)	Costo Total del Inventario sobrante del Detallista r en el Periodo t
CTIFALS (s,t)	Costo total del inventario faltante del Proveedor s en el Periodo t
CTIFALP (p,t)	Costo Total del Inventario faltante de la Planta p en el Periodo t
CTIFALD (d,t)	Costo Total del Inventario faltante del Centro de Distribución d en el Periodo t
CTIFALR (r,t)	Costo Total del Inventario faltante del Detallista r en el Periodo t
CTMS (s,t)	Costo Total de Manipulación en el Proveedor s en el periodo t
CTMP (p,t)	Costo Total de Manipulación en la Planta p en el periodo t
CTMD (d,t)	Costo total de Manipulación en el Centro de Distribución d en el periodo t
CTMR (r,t)	Costo total de Manipulación en el Detallista r en el periodo t

CTFP(p,t) Costo total de fabricación en la Planta p en el periodo t
 CTSUBP(p,t) Costo total de Subcontratación en la Planta p en el periodo t

CTCS(s,t) Costo total de compras en el Proveedor s en el periodo t
 CTCF(p,t) Costo total de compras en la Planta p en el periodo t
 CTCD(d,t) Costo total de compras en el Centro de Distribución d en el periodo t
 CTCR(r,t) Costo total de compras en el Detallista r en el periodo t

CTDEFS(s,t) Costo Total de disponer defectuosos en el Proveedor s en el periodo t
 CTDEFP(p,t) Costo Total de disponer defectuosos en la Planta p en el periodo t
 CTDEFD(d,t) Costo Total de disponer defectuosos en el Centro de Distribución d en el periodo t

VPS(s,t) Ventas en el Proveedor s en el periodo t
 VPP(p,t) Ventas en la Planta p en el periodo t
 VPD(d,t) Ventas en el Centro de Distribución d en el periodo t
 VPR(r,t) Ventas en el Detallista r en el periodo t

VPDEFS(s,t) Ventas de defectuosos en el Proveedor s en el periodo t
 VPDEFP(p,t) Ventas de defectuosos en la Planta p en el periodo t;

BINARY VARIABLES

XSP(s,p,m,t) Variable que toma el valor de 1 si CFTS spm>0 y 0 para los demás casos (Nivel de Capacidad de Transporte desde el Proveedor s a la Planta p de la Materia Prima Componente o item m en el periodo t)

XPD(p,d,j,t) Variable que toma el valor de 1 si CFTPD pdj>0 y 0 para los demás casos (Nivel de Capacidad de Transporte desde la Planta p al Centro de Distribución d para el producto j en el periodo t)

XDR(d,r,j,t) Variable que toma el valor de 1 si CFDR drj>0 y 0 para los demás casos (Nivel de Capacidad de Transporte desde Centro de Distribución de a Detallista r del producto j en el periodo t)

Y(p,q,j,t) Variable que toma el valor de 1 si CFMP pqj>0 y 0 para los demás casos (Tiempo de Preparación en la Planta p sobre el Recurso de Producción q para el producto j en el periodo t)

W(p,q,j,t) Variable que toma el valor de 1 si CFPC pqj>0 y 0 para los demás casos (Cambio de partida en la Planta p sobre el Recurso de Producción q del producto j);

EQUATIONS

FuncionObjetivoTotal
 FuncionObjetivoS(s)
 FuncionObjetivoF(p)
 FuncionObjetivoD(d)
 FuncionObjetivoR(r)

CostoTotalFabriS(s,t)
 CostoTotalManipulacionS(s,t)
 CostoTotalTransporteS(s,t)
 CostoTotalInveSobranteS(s,t)
 CostoTotalInveFaltanteS(s,t)

CostoTotalDefecS (s, t)

CostoTotalComprasP (p, t)
CostoTotalFabriP (p, t)
CostoTotalSubcontraP (p, t)
CostoTotalManipP (s, p, t)
CostoTotalTransporteP (p, t)
CostoTotalInveSobranteP (p, t)
CostoTotalInveFaltanteP (p, t)
CostoTotalProdDefecP (p, t)

CostoTotalComprasD (d, t)
CostoTotalManipulacionD (d, t)
CostoTotalTransporteD (d, t)
CostoTotalInveSobranteD (d, t)
CostoTotalInveFaltanteD (d, t)
CostoTotalProdDefecD (d, t)

CostoTotalComprasR (r, t)
CostoTotalManipulacionR (r, t)
CostoTotalInveSobranteR (r, t)
CostoTotalInveFaltanteR (r, t)

IngresosS (s, t)
IngresosdefectuososS (s, t)
IngresosP (p, t)
IngresosdefectuososP (p, t)
IngresosD (d, t)
IngresosR (r, t)

Eq1 (s, m, t)
Eq2 (s, p, m, t)
Eq3a (s, m, t)
Eq3b (s, m, t)
Eq4 (s, t)
Eq5 (s, p, m, t)
Eq6 (s, p, t)
Eq7 (s, m, t)
Eq8 (p, t)
Eq9 (p, q, j, t)
Eq10 (p, q, t)
Eq11 (p, q, t)
Eq12 (p, q, j, t)
Eq13a (p, q, j, t)
Eq13b (p, q, j, t)
Eq13c (p, q, j, t)
Eq14 (p, j, t)
Eq15 (p, j, t)
Eq16a (p, j, t)
Eq16b (p, j, t)
Eq17 (p, t)
Eq18 (p, d, j, t)
Eq19 (p, d, t)
Eq20 (p, t)

Eq21 (p, j, t)
 Eq22a (d, j, t)
 Eq22b (d, j, t)
 Eq23 (d, t)
 Eq24 (d, r, j, t)
 Eq25 (d, r, t)
 Eq26 (d, t)
 Eq27 (d, j, t)
 Eq28a (r, j, t)
 Eq28b (r, j, t)
 Eq29 (r, t)
 Eq30 (r, c, t)
 Eq31 (r, t)
 Eq32 (r, j, t)
 Eq33 (c, j, t);

*----->

 *ECUACIONES UTILIZADAS EN LA FUNCION OBJETIVO

FuncionObjetivototal.. BT =E= **sum**(s,BS(s))+**sum**(p,BP(p))+**sum**(d,BD(d))+**sum**(r,»
 BR(r));
 FuncionObjetivoS(s).. BS(s) =E= **sum**(t,VPS(s,t) + VPDEFS(s,t) - CTCS(s,t) ->
 CTIS(s,t) - CTISOBS(s,t) - CTIFALS(s,t) - CTMS(s,t) - CTDEFS(s,t));
 FuncionObjetivoP(p).. BP(p) =E= **sum**(t,VPP(p,t) + VPDEFP(p,t) - CTCP(p,t) ->
 CTFP(p,t) - CTPP(p,t) - CTISOBP(p,t) - CTIFALP(p,t) - CTMP(p,t) - CTDEFP(p,t) - CTSUB»
 P(p,t));
 FuncionObjetivoD(d).. BD(d) =E= **sum**(t,VPD(d,t) - CTCDD(d,t) - CTID(d,t) - C»
 TISOBD(d,t) - CTIFALD(d,t) - CTMD(d,t) - CTDEFD(d,t));
 FuncionObjetivoR(r).. BR(r) =E= **sum**(t,VPR(r,t) - CTCR(r,t) - CTISOBR(r,t) »
 - CTIFALR(r,t) - CTMR(r,t));

*----->

 *RESTRICCIONES DE COMPRA, PRODUCCION, TRANSPORTE, INVENTARIO, DEMANDA

Eq1 (s,m,t).. QS(s,m,t) =L= CMAXFS(s,m);
 Eq2 (s,p,m,t).. QTSP(s,p,m,t) =E= **sum**(j,MA(m,j))***sum**(q, QPP(p,q,j,t) »
);
 Eq3a (s,m,t)\$(ord(t) eq 1).. NIS(s,m,t) =E= NISinc(s,m) + (1-ALFA(s,m))*QS(s,m,t) »
 - **sum**(p,QTSP(s,p,m,t));
 Eq3b (s,m,t)\$(ord(t) ne 1).. NIS(s,m,t) =E= NIS(s,m,t-1) + (1-ALFA(s,m))*QS(s,m,t»
) - **sum**(p,QTSP(s,p,m,t));
 Eq4 (s,t).. **sum**(m,NIS(s,m,t))=L=CMIS(s);
 Eq5 (s,p,m,t).. QTSP(s,p,m,t) =L= NCTSP(s,p,m)*XSP(s,p,m,t);
 Eq6 (s,p,t).. QTSP(s,p,t) =E= **sum**(m, QTSP(s,p,m,t));
 Eq7 (s,m,t).. NIS(s,m,t)=E= NISOBS(s,m,t) - NIFALS(s,m,t);

 Eq8 (p,t).. **sum**(s, QTSP(s,p,t)) =L= CMETP(p);
 Eq9 (p,q,j,t).. QPP(p,q,j,t) =E= QPPN(p,q,j,t) + QPPEX(p,q,j,t);
 Eq10 (p,q,t).. **sum**(j, QPPN(p,q,j,t)) =L= MCFPN(p,q,t);
 Eq11 (p,q,t).. **sum**(j, QPPEX(p,q,j,t)) =L= MCFPEX(p,q,t);
 Eq12 (p,q,j,t).. Y(p,q,j,t) =E=1;
 Eq13a (p,q,j,t)\$(ord(t) eq 1).. W(p,q,j,t) =G=Y(p,q,j,t) - YY(p,q,j);
 Eq13b (p,q,j,t)\$(ord(t) ne 1).. W(p,q,j,t) =G= Y(p,q,j,t) - W(p,q,j,t-1);
 Eq13c (p,q,j,t)\$(ord(t) eq 6).. W(p,q,j,t) =G=Y(p,q,j,t) - YY(p,q,j);

```

Eq14(p,j,t).. QP(p,j,t) =E= sum(q, QPP(p,q,j,t));
Eq15(p,j,t).. QSUBP(p,j,t) =L= PQSP(p,j)*QP(p,j,t);
Eq16a(p,j,t)$(ord(t) eq 1).. NIP(p,j,t) =E= NIPinc(p,j) + (1-BETA(p,j))*QP(p,j,t)»
+ QSUBP(p,j,t) - sum(d,QTPD(p,d,j,t));
Eq16b(p,j,t)$(ord(t) ne 1).. NIP(p,j,t) =E= NIP(p,j,t-1) + (1-BETA(p,j))*QP(p,j,t)»
+ QSUBP(p,j,t) - sum(d,QTPD(p,d,j,t));
Eq17(p,t).. sum(j,NIP(p,j,t)) =L= CMIP(p);
Eq18(p,d,j,t).. QTPD(p,d,j,t) =L= NCTPD(p,d,j)*XPD(p,d,j,t);
Eq19(p,d,t).. QTTPD(p,d,t) =E= sum(j,QTPD(p,d,j,t));
Eq20(p,t).. sum(d, QTTPD(p,d,t)) =L= CMSTP(p);
Eq21(p,j,t).. NIP(p,j,t) =E= NISOBP(p,j,t) - NIFALP(p,j,t);

Eq22a(d,j,t)$(ord(t) eq 1).. NID(d,j,t) =E= NIDinc(d,j) + sum(p,QTPD(p,d,j,t-TTPD»
(p,d)) - sum(x,QTDR(d,r,j,t));
Eq22b(d,j,t)$(ord(t) ne 1).. NID(d,j,t) =E= NID(d,j,t-1) + sum(p,QTPD(p,d,j,t-TTP»
D(p,d)) - sum(x,QTDR(d,r,j,t));
Eq23(d,t).. sum(j,NID(d,j,t)) =L= CMID(d);
Eq24(d,r,j,t).. QTDR(d,r,j,t) =L= NCTDR(d,r,j)*XDR(d,r,j,t);
Eq25(d,r,t).. QTDR(d,r,t) =E= sum(j,QTDR(d,r,j,t));
Eq26(d,t).. sum(x, QTDR(d,r,t)) =L= CMSTD(d);
Eq27(d,j,t).. NID(d,j,t) =E= NISOBD(d,j,t) - NIFALD(d,j,t);

Eq28a(x,j,t)$(ord(t) eq 1).. NIR(x,j,t) =E= NIRinc(x,j) + sum(d,QTDR(d,r,j,t-TTDR»
(d,r)) - sum(c,QTRC(r,c,j,t));
Eq28b(x,j,t)$(ord(t) ne 1).. NIR(x,j,t) =E= NIR(x,j,t-1) + sum(d,QTDR(d,r,j,t-TTD»
R(d,r)) - sum(c,QTRC(r,c,j,t));
Eq29(x,t).. sum(j,NIR(x,j,t)) =L= CMIR(x);
Eq30(x,c,t).. QTTRC(x,c,t) =E= sum(j,QTRC(r,c,j,t));
Eq31(x,t).. sum(c, QTTRC(x,c,t)) =L= CMSTR(x);
Eq32(x,j,t).. NIR(x,j,t) =E= NISOBR(x,j,t) - NIFALR(x,j,t);

Eq33(c,j,t).. sum(x,QTRC(r,c,j,t)) =L= DEMC(c,j,t);

*-----»
*-----
*ECUACIONES DE COSTOS

CostoTotalFabriS(s,t).. CTCS(s,t) =E= sum(m,CUFMS(s,m,t)*QS(s,m,t));
CostoTotalManipulacionS(s,t).. CTMS(s,t) =E= sum((m,p),CUMS(s,m)*QTSP(s,p,m,t));
CostoTotalTransporteS(s,t).. CTTS(s,t) =E= sum((p,m),CUTSP(s,p,m)*QTSP(s,p,m,t));
CostoTotalInveSobranteS(s,t).. CTISOBS(s,t) =E= sum(m,CUISOBS(s,m)*NISOBS(s,m,t));
CostoTotalInveFaltanteS(s,t).. CTIFALS(s,t) =E= sum(m,CUIFALS(s,m)*NIFALS(s,m,t));
CostoTotalDefecS(s,t).. CTDEFS(s,t) =E= sum(m,CUDEFS(s,m)*ALFA(s,m)*QS(s,m»
,t));

CostoTotalComprasp(p,t).. CTCP(p,t) =E= sum((s,m),PUMSP(s,p,m)*(1-tasap(p,m)*(»
1-tasas(s,m)))*QTSP(s,p,m,t) + PUMDEFSP(s,p,m)*tasap(p,m)*(1-tasas(s,m))*QTSP(s,p,m,t)»
);
CostoTotalFabriP(p,t).. CTFP(p,t) =E= sum((q,j),CFPCP(p,q,j,t)*Y(p,q,j,t) + C»
UFPN(p,q,j,t)*QPPN(p,q,j,t) + CUFPEX(p,q,j,t)*QPPEX(p,q,j,t));
CostoTotalSubcontraP(p,t).. CTSUBP(p,t) =E= sum(j,CUSUBP(p,j)*QSUBP(p,j,t));
CostoTotalManipP(s,p,t)$(ord(t) eq 1).. CTMP(p,t) =E= sum(j,CUMP(p,j)*[sum(m, MA(m,j)»
*sum(q, QPP(p,q,j,t-TTSP(s,p)))+ sum(d,QTPD(p,d,j,t))]);
CostoTotalTransporteP(p,t).. CTPP(p,t) =E= sum((d,j),CUTPD(p,d,j)*QTPD(p,d,j,t));
CostoTotalInveSobranteP(p,t).. CTISOBP(p,t) =E= sum(j,CUISOBP(p,j)*NISOBP(p,j,t));
CostoTotalInveFaltanteP(p,t).. CTIFALP(p,t) =E= sum(j,CUIFALP(p,j)*NIFALP(p,j,t));
CostoTotalProdDefecP(p,t).. CTDEFP(p,t) =E= sum(j,CUDEFP(p,j)*BETA(p,j)*QP(p,j,t)»

```

));

```
CostoTotalComprasD(d,t)..          CTCD(d,t) =E= sum((p,j),PUPPD(p,d,j)*(1-tasad(d,j)*(1-
1-ratep(p,j)))*QTPD(p,d,j,t) + PUPDEFPD(p,d,j)*tasad(d,j)*(1-ratep(p,j))*QTPD(p,d,j,t)»
);
CostoTotalManipulacionD(d,t)$ (ord(t) eq 1).. CTMD(d,t) =E= sum(j, CUMD(d,j)*[sum(p, Q»
TPD(p,d,j,t-TTPD(p,d)) + sum(r,QTDR(d,r,j,t))] );
CostoTotalTransporteD(d,t)..       CTTD(d,t) =E= sum((r,j),CUTDR(d,r,j)*QTDR(d,r,j,t));
CostoTotalInveSobranteD(d,t)..     CTISOBD(d,t) =E= sum(j,CUIISOBD(d,j)*NISOBD(d,j,t));
CostoTotalInveFaltanteD(d,t)..    CTIFALD(d,t) =E= sum(j,CUIFALD(d,j)*NIFALD(d,j,t));
CostoTotalProdDefecD(d,t)..       CTDEFD(d,t) =E= sum((p,j), CUDEFD(d,j)*tasad(d,j)*QT»
PD(p,d,j,t));
```

```
CostoTotalComprasR(r,t)..          CTCR(r,t) =E= sum((d,j),PUPDR(d,r,j)*QTDR(d,r,j,t));
CostoTotalManipulacionR(r,t)$ (ord(t) eq 1).. CTMR(r,t) =E= sum(j, CUMR(r,j)*[sum(d, Q»
TDR(d,r,j,t-TTDR(d,r)) + sum(c,QTRC(r,c,j,t))] );
CostoTotalInveSobranteR(r,t)..     CTISOBR(r,t) =E= sum(j,CUIISOBR(r,j)*NISOBR(r,j,t));
CostoTotalInveFaltanteR(r,t)..    CTIFALR(r,t) =E= sum(j,CUIFALR(r,j)*NIFALR(r,j,t));
```

*-----»
-----»

*ECUACIONES DE INGRESOS

```
IngresosS(s,t)..                  VPS(s,t) =E= sum((p,m),PUMSP(s,p,m)*(1-tasap(p,m)*(1»
-tasas(s,m)))*QTSP(s,p,m,t));
IngresosdefectuososS(s,t)..       VPDEFS(s,t) =E= sum((p,m),PUMDEFSP(s,p,m)*tasap(p,m)»
*(1-tasas(s,m))*QTSP(s,p,m,t));
```

```
IngresosP(p,t)..                  VPP(p,t) =E= sum((d,q,j),PUPPD(p,d,j)*(1-tasad(d,j)»
*(1-ratep(p,j)))*QTPD(p,d,j,t));
IngresosdefectuososP(p,t)..       VPDEFP(p,t) =E= sum((d,q,j),PUPDEFPD(p,d,j)*tasad(d,»
j)*(1-ratep(p,j))*QTPD(p,d,j,t));
```

```
IngresosD(d,t)..                  VPD(d,t) =E= sum((r,j),PUPDR(d,r,j)*QTDR(d,r,j,t));
```

```
IngresosR(r,t)..                  VPR(r,t) =E= sum((c,j),PUPRC(r,c,j)*QTRC(r,c,j,t));
```

*-----»
-----»

```
MODEL Proveedores /all/;
*OPTION ITERLIM=300000;
*OPTION RESLIM=100000;
*option subsystems;
option mip = xa ;
option mip=express;
*option optca= 0;
*option optcr= 0.01;
SOLVE Proveedores using MIP maximizing BT;
```

ANEXO 2. Programación en GAMS. Modelo Matemático para la cadena de suministro colaborativa bajo Incertidumbre

C:\ALINA PERSONAL\Tesis\BackUp Tesis 27 de Noviembre 2015\Proyecto Investigación Noviembre 27 2015\MODI

SETS

```
s proveedores /1,2/
m materias primas /YESO, ESCORIA, CLINKER,SACO/
j productos /A, B/
p plantas /1,2/
q recursos de produccion /Q1, Q2/
d centros de distribución /1,2/
r detallistas /1,2/
c clientes /1,2/
e escenarios para la demanda /alta,media,baja/
t periodos /1, 2, 3, 4, 5, 6/;
```

TABLE

PUCMS (s,m,t) (\$ por Ton) Precio Unitario de compra de Materia Prima Componente o Ítem m en el Proveedor s en el periodo t

	1	2	3	4	5	6
1.YESO	12478	12478	12478	12478	12478	12478
1.ESCORIA	11408	11408	11408	11408	11408	11408
1.CLINKER	42583	42583	42583	42583	42583	42583
1.SACO	2070951	2070951	2070951	2070951	2070951	2070951
2.YESO	12341	12341	12341	12341	12341	12341
2.ESCORIA	11579	11579	11579	11579	11579	11579
2.CLINKER	42675	42675	42675	42675	42675	42675
2.SACO	2091660	2091660	2091660	2091660	2091660	2091660;

TABLE

PUMSP (s,p,m) (\$ por Ton) Precio Unitario de la Materia Prima Componente o Ítem m en el Proveedor s para la Planta p

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1.1	20825	20298	59358	2958501
1.2	20825	20298	59358	2958501
2.1	20630	20546	59894	2988086
2.2	20630	20546	59894	2988086;

TABLE

PUMDEFSP (s,p,m) (\$ por Ton) Precio Unitario de la Materia Prima Componente o Ítem m en el Proveedor s para la Planta p

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1.1	13101	11979	44712	2218876
1.2	13101	11979	44712	2218876
2.1	12958	12158	44809	2241064
2.2	12958	12158	44809	2241064;

TABLE

CUFMS (s,m,t) (\$ por Ton) Costo por Unidad de Fabricación de la Materia Prima Componente o Ítem m en el Proveedor

	1	2	3	4	5	6
1.YESO	1101	1101	1101	1101	1101	1101
1.ESCORIA	1979	1979	1979	1979	1979	1979
1.CLINKER	4712	4712	4809	4809	4809	4809
1.SACO	218876	218876	218876	218876	218876	218876
2.YESO	1101	1101	1101	1101	1101	1101
2.ESCORIA	1979	1979	1979	1979	1979	1979
2.CLINKER	4712	4712	4809	4809	4809	4809

2.SACO 218876 218876 218876 218876 218876 218876;

TABLE

CUTSP (s,p,m) (\$ por Ton) Costo por Unidad de Transporte de la Materia Prima Componente o ítem m desde el Proveedor s a la Planta p

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1.1	3374	3099	1200	69344
1.2	3585	3148	1150	70037
2.1	3189	3281	1230	69691
2.2	3368	3292	1180	68994;

TABLE

CUMS (s,m) (\$ por Ton) Costo por Unidad de Manipulación de la Materia Prima Componente o ítem m en el Proveedor s

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	641	500	483	6693
2	565	630	579	6760;

TABLE

CUISOBS (s,m) (\$ por Ton) Costo por Unidad de Inventario Sobrante de la Materia Prima Componente o ítem m en el Proveedor s

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	367	276	430	8284
2	251	269	383	8367;

TABLE

CUIFALS (s,m) (\$ por Ton) Costo por Unidad de Inventario Faltante de la Materia Prima Componente o ítem m en el Proveedor s

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	5348	4889	16607	887550
2	5289	4964	16408	887550;

TABLE

CUDEFS (s,m) (\$ por Ton) Costo por Unidad de desechar defectuoso de Materia Prima Componente o ítem m en el Proveedor s

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	367	276	430	284
2	251	269	383	367;

TABLE

NISinc (s,m) (Ton) Nivel de Inventario Inicial de Materia Prima Componente o ítem m en el Proveedor s

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	20	135	561	20
2	30	100	528	12;

TABLE

NCTSP (s,p,m) (Ton) Nivel de Capacidad de Transporte para la Materia Prima Componente o ítem m desde el Proveedor s a la Planta p

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1.1	140000	135000	173500	112880
1.2	140000	135000	173500	112880

2.1 138000 134000 172000 111019
 2.2 138000 134000 172000 111019;

PARAMETER

CMIS(s) (Ton)Capacidad Máxima de Inventarios en el Proveedor s
 / 1 380186
 2 370759/;

TABLE

CMAF(s,m) (Ton)Capacidad Máxima de Fabricación el Proveedor s
 YESO ESCORIA CLINKER SACO
 1 50000 55000 53500 22880
 2 48000 44000 82000 21019;

TABLE

ALFA(s,m) Fracción de artículos defectuosos de Materia Prima Componente o Ítem m »
 en el Proveedor s
 YESO ESCORIA CLINKER SACO
 1 0.016 0.013 0.011 0.018
 2 0.015 0.017 0.015 0.017;

TABLE

tasas(s,m) Tasa de detección de artículos defectuosos de Materia Prima Componente»
 o Ítem m en el Proveedor s
 YESO ESCORIA CLINKER SACO
 1 0.98 0.99 0.99 0.97
 2 0.99 0.98 0.97 0.96;

TABLE

TTSP(s,p) Periodo de tiempo de Transporte desde el Proveedor s hasta la Planta p
 1 2
 1 0 0
 2 0 0;

TABLE

PUPPD(p,d,j) (\$ por Saco)Precio Unitario del Producto j desde la Planta p hasta el Ce»
 ntro de Distribución d
 A B
 1.1 12907 13022
 1.2 12907 13022
 2.1 12505 13210
 2.2 12505 13210;

TABLE

PUPDEFDP(p,d,j) (\$ por Saco)Precio Unitario del Producto j defectuoso desde la Planta »
 p para el Centro de Distribución d
 A B
 1.1 9680 9766
 1.2 9680 9766
 2.1 9449 9684
 2.2 9449 9684;

TABLE

CFCP(p,q,j,t) (\$ por Saco) Costo Fijo de Cambio de Partida de la Planta p sobre el Rec»
 ursos de Producción q del producto j en el periodo t
 1 2 3 4 5 6
 1.Q1.A 0 0 0 0 0 0

1.Q1.B	0	0	0	0	0	0
1.Q2.A	0	0	0	0	0	0
1.Q2.B	0	0	0	0	0	0
2.Q1.A	0	0	0	0	0	0
2.Q1.B	0	0	0	0	0	0
2.Q2.A	0	0	0	0	0	0
2.Q2.B	0	0	0	0	0	0;

TABLE

CUFFPN(p,q,j,t) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Fabricación del producto j utilizando » tiempo regular en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo t

	1	2	3	4	5	6
1.Q1.A	4374	4577	4741	4316	4697	4588
1.Q1.B	4340	4250	4843	4078	4514	4472
1.Q2.A	4505	4848	4104	4282	4591	4087
1.Q2.B	4751	4508	4446	4972	4824	4269
2.Q1.A	4737	4201	4693	4351	4031	4525
2.Q1.B	4710	4224	4940	4739	4383	4660
2.Q2.A	4241	4320	4068	4738	4033	4724
2.Q2.B	4972	4449	4779	4706	4402	4409;

TABLE

CUFPEX (p,q,j,t) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Fabricación del producto j utilizando » o tiempo Extra en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo t

	1	2	3	4	5	6
1.Q1.A	14374	14577	4741	4316	4697	4588
1.Q1.B	14340	14250	4843	4078	4514	4472
1.Q2.A	14505	14848	4104	4282	4591	4087
1.Q2.B	14751	14508	4446	4972	4824	4269
2.Q1.A	14737	14201	4693	4351	4031	4525
2.Q1.B	14710	4224	4940	4739	4383	4660
2.Q2.A	14241	4320	4068	4738	4033	4724
2.Q2.B	14972	4449	4779	4706	4402	4409;

TABLE

CUSUBP(p,j) (\$ por Saco) Costo por unidad del producto j subcontratada por la Planta » p

	A	B
1	15000	15000
2	15500	15500;

TABLE

CUTPD(p,d,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Transporte del producto j desde la Planta » p al Centro de Distribución d

	A	B
1.1	517	517
1.2	562	562
2.1	595	595
2.2	598	598;

TABLE

CUMP(p,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Manipulación del producto j en la Plan » ta p

	A	B
1	397	397
2	338	338;

TABLE

CUISOBP(p,j) (\$ por Saco)Costo por Unidad de Inventario Sobrante del producto j en la »
Planta p

	A	B
1	444	444
2	482	482;

TABLE

CUIFALP(p,j) (\$ por Saco)Costo por Unidad de Inventario Faltante del producto j en la »
Planta p

	A	B
1	3872	3907
2	3890	3937;

TABLE

CUDEFPP(p,j) (\$ por Saco)Costo por Unidad de desechar defectuoso de producto j en la »
Planta p

	A	B
1	244	244
2	215	215;

TABLE

NIPinc(p,j) (Saco) Nivel de Inventario inicial de producto j en la Planta p

	A	B
1	275	427
2	239	226;

TABLE

NCTPD(p,d,j) (Ton) Nivel de Capacidad de Transporte desde la Planta p hasta el Centro »
de Distribución d para el producto j

	A	B
1.1	10026	10926
1.2	19026	10926
2.1	10910	10910
2.2	10910	10910;

TABLE

MCFPN(p,q,t) (Sacos) Capacidad Máxima de fabricación utilizando tiempo regular en la P»
lanta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo de tiempo t

	1	2	3	4	5	6
1.Q1	10547	10562	10512	10684	10563	10522
1.Q2	10573	10559	10540	10681	10547	10554
2.Q1	10543	10563	10565	10688	10591	10592
2.Q2	10537	10554	10597	10669	10576	10524;

TABLE

MCFPEX(p,q,t) (Saco) Capacidad Máxima de fabricación utilizando tiempo extra en la Pla»
nta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo de tiempo t

	1	2	3	4	5	6
1.Q1	547	562	512	684	563	522
1.Q2	573	559	540	681	547	554
2.Q1	543	563	565	688	591	592
2.Q2	537	554	597	669	576	524;

PARAMETER

CMETP (p) (Ton) Capacidad Máxima de Entrada de Transporte en la Planta p
 / 1 49580
 2 49200/;

PARAMETER

CMSTP (p) (Sacos) Capacidad Máxima de Salida de Transporte en la Planta p
 / 1 48643
 2 42249/;

PARAMETER

CMIP (p) (Ton) Capacidad Máxima de Inventario en la Planta p
 / 1 89580
 2 89200/;

TABLE

BETA (p,j) Fracción de defectuosos para el producto j en la Planta p

	A	B
1	0.012	0.011
2	0.010	0.009;

TABLE

ratep (p,j) Tasa de detección de Producto j defectuoso en la Planta p

	A	B
1	0.99	0.98
2	0.97	0.99;

TABLE

tasap (p,m) Tasa de detección de artículos defectuosos de Materia Prima Componente »
 o ítem m detectado en la Planta p

	YESO	ESCORIA	CLINKER	SACO
1	0.99	0.97	0.99	0.98
2	0.98	0.98	0.97	0.97;

TABLE

MA (m,j) Unidad de Materia Prima Componente o ítem m necesarias para la fabricació»
 n del Producto j

	A	B
YESO	0.0025	0.0025
ESCORIA	0.0095	0.007
CLINKER	0.038	0.0405
SACO	0.002	0.002;

TABLE

PQSP (p,j) Porcentaje para definir la Cantidad a Subcontratar a partir de la cantidad »
 a Fabricar del Producto j en la Planta p

	A	B
1	0.1	0.1
2	0.1	0.1;

TABLE

TFPD (p,d) Periodo de tiempo de Transporte desde la Planta p hasta el Centro de Distr»
 ibución d

	1	2
1	0	0
2	0	0;

TABLE

YY(p,q,j)

	A	B
1.Q1	0	0
1.Q2	0	0
2.Q1	0	0
2.Q2	0	0;

TABLE

PUPDR(d,r,j) (\$ por Saco) Precio Unitario del Producto j desde el Centro de Distribución d al Detallista r

	A	B
1.1	17216	17365
1.2	17216	17365
2.1	17296	17500
2.2	17296	17500;

TABLE

CUTDR(d,r,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Transporte del productos j desde el Centro de Distribución d al Detallista r

	A	B
1.1	314	314
1.2	338	338
2.1	315	315
2.2	342	342;

TABLE

CUMD(d,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Manipulación del producto j en el Centro de Distribución d

	A	B
1	22	22
2	23	23;

TABLE

CUISOBD(d,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Inventario Sobrante del producto j en el Centro de Distribución d

	A	B
1	69	69
2	69	69;

TABLE

CUIFALD(d,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Inventario Faltante del producto j en el Centro de Distribución d

	A	B
1	5165	5209
2	5189	5250;

TABLE

CUDEFD(d,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de desechar defectuoso de producto j en el Centro de Distribución d

	A	B
1	840	840
2	820	820;

TABLE

NIDinc(d,j) Nivel de Inventario inicial de producto j en el Centro de Distribución d

	A	B
1	1250	700
2	1000	820;

PARAMETER

CMID(d) (Saco) Capacidad Máxima de Inventario en el Centro de Distribución d

/1	5800
2	6200/;

PARAMETER

CMSTD(d) (Saco) Capacidad Máxima de Salida de Transporte en el Centro de Distribución d

/1	15800
2	16200/;

TABLE

PUPRC(r,c,j) (\$ por Saco) Precio Unitario del Producto j desde el Detallista r al Cliente c

	A	B
1.1	21813	22007
1.2	21813	22007
2.1	21913	22178
2.2	21913	22178;

TABLE

CUMR(r,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Manipulación del producto j en el Detallista r

	A	B
1	13	13
2	13	13;

TABLE

CUISOBR(r,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Inventario Sobrante del producto j en el Detallista r

	A	B
1	87	88
2	88	89;

TABLE

CUIFALR(r,j) (\$ por Saco) Costo por Unidad de Inventario Faltante del producto j en el Detallista r

	A	B
1	6544	6602
2	6574	6653;

TABLE

NCTDR(d,r,j) (Saco) Nivel de Capacidad de Transporte para el producto j desde el Centro de Distribución d hasta el Detallista r

	A	B
1.1	3400	3400
1.2	5600	2800
2.1	4400	3800
2.2	5200	2600;

TABLE

NIRinc(r,j) (Saco) Nivel de Inventario inicial de producto j en el Detallista

	A	B
1	200	250
2	220	240;

PARAMETER

CMIR(r) (Saco) Capacidad Máxima de Inventario en el Detallista r

/1	5800
2	6200/;

PARAMETER

CMSTR(r) (Saco) Capacidad Máxima de Salida de Transporte en el Detallista r

/1	15800
2	16200/;

TABLE

tasad(d,j) Tasa de detección de Producto j defectuoso en la el Centro de Dis-
tribución d

	A	B
1	0.99	0.97
2	0.98	0.99;

TABLE

TTDR(d,r) Periodo de tiempo de Transporte desde el Centro de Distribución d hast-
a el Detallista r

	1	2
1	0	0
2	0	0;

TABLE

DEMCE(c,j,e,t) (Saco) Demanda del cliente c del producto j en el escenario e en el peri-
odo de tiempo t

	1	2	3	4	5	6
1.A.baja	15000	800	13000	8000	6000	13000
1.B.baja	6000	10000	5800	9000	10000	9000
2.A.baja	9000	12400	6000	7000	8000	5000
2.B.baja	1500	2000	3200	2000	2000	800
1.A.media	17000	1000	15000	10000	8000	15000
1.B.media	8000	14000	8000	8000	7000	9000
2.A.media	10000	14400	8000	9000	10000	8000
2.B.media	8000	9000	9000	3000	4000	1000
1.A.alta	19000	1200	17000	12000	10000	17000
1.B.alta	10000	20000	8500	8500	8000	11000
2.A.alta	17000	18400	10000	11000	11000	10000
2.B.alta	9000	10000	10800	4800	5000	1200;

PARAMETER

pr(e) probabilidad de escenarios

/alta	0.333333
media	0.333333
baja	0.333333/;

FREE VARIABLES

BTESP Beneficio Total esperado (\$)
 BT (e) Beneficio en el escenario e (\$)
 NIS(s,m,t,e) Nivel de Inventario de Materia Prima Componente o Ítem m en el Proveedor s para el Periodo t en el escenario e
 NIP(p,j,t,e) Nivel de Inventario de producto j en la Planta p para el Periodo t en el escenario
 NID(d,j,t,e) Nivel de Inventario de producto j en el Centro de Distribución d para el Periodo t en el escenario e
 NIR(r,j,t,e) Nivel de Inventario de producto j en el Detallista r en el Periodo t en el escenario
 BS(s,e) Beneficios esperados en el Proveedor s en el periodo t en el escenario e
 BP(p,e) Beneficios esperados en la Planta p en el periodo t en el escenario e
 BD(d,e) Beneficios esperados en el Centro de Distribución d en el periodo t en el escenario e
 BR(r,e) Beneficios esperados en el Detallista r en el periodo t en el escenario e

POSITIVE VARIABLES

QS(s,m,t,e) Cantidad de Materia Prima Componente o Ítem m compradas por el Proveedor s en el periodo t en el escenario e (Ton)
 QP(p,j,t,e) Cantidad a producir del producto j en la Planta p en el periodo t en el escenario e (Sacos)
 QPP(p,q,j,t,e) Cantidad a producir del producto j en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo t en el escenario e (Sacos)
 QPPN(p,q,j,t,e) Cantidad a producir del producto j en tiempo Normal en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo t en el escenario e (Sacos)
 QPPEX(p,q,j,t,e) Cantidad a producir del producto j en tiempo Extra en la Planta p sobre el Recurso de Producción q en el periodo t en el escenario e (Sacos)
 QSUBP(p,j,t,e) Cantidad a Subcontratar del producto j en la Planta p en el periodo t en el escenario e (Sacos)
 QTSP(s,p,m,t,e) Materia Prima Componente o Ítem a transportar desde el Proveedor s a la Planta p en el periodo t en el escenario e (Ton)
 QTPD(p,d,j,t,e) Cantidad de producto j a transportar desde la Planta p al Centro de Distribución d en el periodo t en el escenario e (Sacos)
 QTDR(d,r,j,t,e) Cantidad de producto j a transportar desde el Centro de Distribución d al Detallista r en el periodo t en el escenario e (Sacos)
 QTRC(r,c,j,t,e) Cantidad de producto j a transportar desde el Detallista r al Cliente c en el periodo t en el escenario e (Sacos)
 QITSP(s,p,t,e) Cantidad de transporte Total desde el Proveedor s a la Planta p en el periodo t en el escenario e (Ton)
 QITPD(p,d,t,e) Cantidad de transporte Total desde la Planta p al Centro de Distribución d en el periodo t en el escenario e (Sacos)
 QITDR(d,r,t,e) Cantidad de transporte Total desde el Centro de Distribución d al Detallista r en el periodo t en el escenario e (Sacos)
 QITRC(r,c,t,e) Cantidad de transporte Total desde el Detallista r al Cliente c en el periodo t en el escenario e (Sacos)
 NISOBS(s,m,t,e) Nivel de Inventario sobrante de Materia Prima Componente o ítem m en el Proveedor s para el Periodo t en el escenario e
 NIFALS(s,m,t,e) Nivel de Inventario faltante de Materia Prima Componente o Ítem m en el Proveedor s para el Periodo t en el escenario e
 NISOBF(p,j,t,e) Nivel de Inventario sobrante de producto j en la Planta p para el Periodo t en el escenario e

NIFALP(p,j,t,e) Nivel de Inventario faltante de producto j en la Planta p para el
 Periodo t en el escenario e
 NISOBD(d,j,t,e) Nivel de Inventario sobrante de producto j en el Centro de Distri-
 bución d para el Periodo t en el escenario e
 NIFALD(d,j,t,e) Nivel de Inventario faltante de producto j en el Centro de Distri-
 bución d para el Periodo t en el escenario e
 NISOBR(r,j,t,e) Nivel de Inventario sobrante de producto j en el Detallista r en
 el Periodo t en el escenario e
 NIFALR(r,j,t,e) Nivel de Inventario faltante de producto j en el Detallista r en
 el Periodo t en el escenario e

CTIS(s,t,e) Costo Total de Transporte del Proveedor s en t en el escenario e
 CTPP(p,t,e) Costo Total de Transporte de la Planta p en t en el escenario e
 CTTD(d,t,e) Costo Total de Transporte del Centro de Distribución d en t en e-
 l escenario e

CTISOBS(s,t,e) Costo total del inventario sobrante del Proveedor s en el Periodo
 t en el escenario e
 CTISOBP(p,t,e) Costo Total del Inventario sobrante de la Planta p en el Periodo
 t en el escenario e
 CTISOBD(d,t,e) Costo Total del Inventario sobrante del Centro de Distribución d
 en el Periodo t en el escenario e
 CTISOBR(r,t,e) Costo Total del Inventario sobrante del Detallista r en el Periodo
 t en el escenario e

CTIFALS(s,t,e) Costo total del inventario faltante del Proveedor s en el Periodo
 t en el escenario e
 CTIFALP(p,t,e) Costo Total del Inventario faltante de la Planta p en el Periodo
 t en el escenario e
 CTIFALD(d,t,e) Costo Total del Inventario faltante del Centro de Distribución d
 en el Periodo t en el escenario e
 CTIFALR(r,t,e) Costo Total del Inventario faltante del Detallista r en el Periodo
 t en el escenario e

CTIMS(s,t,e) Costo Total de Manipulación en el Proveedor s en el periodo t en
 el escenario e
 CTMP(p,t,e) Costo Total de Manipulación en la Planta p en el periodo t en e-
 l escenario e
 CTMD(d,t,e) Costo total de Manipulación en el Centro de Distribución d en el
 periodo t en el escenario e
 CTMR(r,t,e) Costo total de Manipulación en el Detallista r en el periodo t en
 el escenario e

CTFP(p,t,e) Costo total de fabricación en la Planta p en el periodo t en el e-
 escenario e
 CTSUBP(p,t,e) Costo total de Subcontratación en la Planta p en el periodo t en
 el escenario e

CTCS(s,t,e) Costo total de compras en el Proveedor s en el periodo t en el es-
 cenario e
 CTCPP(p,t,e) Costo total de compras en la Planta p en el periodo t en el escena-
 rio e
 CTCDD(d,t,e) Costo total de compras en el Centro de Distribución d en el perio-
 do t en el escenario e
 CTCRR(r,t,e) Costo total de compras en el Detallista r en el periodo t en el e-
 escenario e

CTDEFS(s, t, e) Costo Total de disponer defectuosos en el Proveedor s en el periodo t en el escenario e
 CTDEFP(p, t, e) Costo Total de disponer defectuosos en la Planta p en el periodo t en el escenario e
 CTDEFD(d, t, e) Costo Total de disponer defectuosos en la Planta p en el periodo t en el escenario e
 VPS(s, t, e) Ventas en el Proveedor s en el periodo t en el escenario e
 VPP(p, t, e) Ventas en la Planta p en el periodo t en el escenario e
 VPD(d, t, e) Ventas en el Centro de Distribución d en el periodo t en el escenario e
 VPR(r, t, e) Ventas en el Detallista r en el periodo t en el escenario e
 VPDEFS(s, t, e) Ventas de defectuosos en el Proveedor s en el periodo t en el escenario e
 VPDEFP(p, t, e) Ventas de defectuosos en la Planta p en el periodo t en el escenario e ;

BINARY VARIABLES

XSP(s, p, m, t) Variable que toma el valor de 1 si CFTS $s_{pm} > 0$ y 0 para los demás casos (Nivel de Capacidad de Transporte desde el Proveedor s a la Planta p de la Materia Prima Componente o item m en el periodo t)
 XPD(p, d, j, t) Variable que toma el valor de 1 si CFTPD $p_{dj} > 0$ y 0 para los demás casos (Nivel de Capacidad de Transporte desde la Planta p al Centro de Distribución d para el producto j en el periodo t)
 XDR(d, r, j, t) Variable que toma el valor de 1 si CFTDR $drj > 0$ y 0 para los demás casos (Nivel de Capacidad de Transporte desde Centro de Distribución d a Detallista r del producto j en el periodo t)
 Y(p, q, j, t) Variable que toma el valor de 1 si CFMP $p_{qj} > 0$ y 0 para los demás casos (Tiempo de Preparación en la Planta p sobre el Recurso de Producción q para el producto j en el periodo t)
 W(p, q, j, t) Variable que toma el valor de 1 si CFPC $p_{qj} > 0$ y 0 para los demás casos (Cambio de partida en la Planta p sobre el Recurso de Producción q del producto j);

EQUATIONS

FuncionObjetivoTotalespe
 FuncionObjetivoTotalesc(e)
 FuncionObjetivoS(s, e)
 FuncionObjetivoP(p, e)
 FuncionObjetivoD(d, e)
 FuncionObjetivoR(r, e)
 CostoTotalFabriS(s, t, e)
 CostoTotalManipulacionS(s, t, e)
 CostoTotalTransporteS(s, t, e)
 CostoTotalInveSobranteS(s, t, e)
 CostoTotalInveFaltanteS(s, t, e)
 CostoTotalDefecS(s, t, e)
 CostoTotalComprasP(p, t, e)
 CostoTotalFabriP(p, t, e)

CostoTotalSubcontraP(p,t,e)
CostoTotalManipP(s,p,t,e)
CostoTotalManipulacionP(s,p,t,e)
CostoTotalTransporteP(p,t,e)
CostoTotalInveSobranteP(p,t,e)
CostoTotalInveFaltanteP(p,t,e)
CostoTotalProdDefecP(p,t,e)

CostoTotalComprasD(d,t,e)
CostoTotalManipulacionD(d,t,e)
CostoTotalTransporteD(d,t,e)
CostoTotalInveSobranteD(d,t,e)
CostoTotalInveFaltanteD(d,t,e)
CostoTotalProdDefecD(d,t,e)

CostoTotalComprasR(r,t,e)
CostoTotalManipulacionR(r,t,e)
CostoTotalInveSobranteR(r,t,e)
CostoTotalInveFaltanteR(r,t,e)

IngresosS(s,t,e)
IngresosdefectuososS(s,t,e)
IngresosP(p,t,e)
IngresosdefectuososP(p,t,e)
IngresosD(d,t,e)
IngresosR(r,t,e)

Eq1(s,m,t,e)
Eq2(s,p,m,t,e)
Eq3a(s,m,t,e)
Eq3b(s,m,t,e)
Eq4(s,t,e)
Eq5(s,p,m,t,e)
Eq6(s,p,t,e)
Eq7(s,m,t,e)
Eq8(p,t,e)
Eq9(p,q,j,t,e)
Eq10(p,q,t,e)
Eq11(p,q,t,e)
Eq12(p,q,j,t,e)
Eq13a(p,q,j,t,e)
Eq13b(p,q,j,t,e)
Eq13c(p,q,j,t,e)
Eq14(p,j,t,e)
Eq15(p,j,t,e)
Eq16a(p,j,t,e)
Eq16b(p,j,t,e)
Eq17(p,t,e)
Eq18(p,d,j,t,e)
Eq19(p,d,t,e)
Eq20(p,t,e)
Eq21(p,j,t,e)
Eq22a(d,j,t,e)
Eq22b(d,j,t,e)

Eq23(d,t,e)
 Eq24(d,r,j,t,e)
 Eq25(d,r,t,e)
 Eq26(d,t,e)
 Eq27(d,j,t,e)

Eq28a(r,j,t,e)
 Eq28b(r,j,t,e)
 Eq29(r,t,e)
 Eq30(r,c,t,e)
 Eq31(r,t,e)
 Eq32(r,j,t,e)
 Eq33(c,j,t,e):

*----->

*ECUACIONES UTILIZADAS EN LA FUNCION OBJETIVO

FuncionObjetivototalespe.. BTESP =E= **sum**(e,pr(e)* BT(e));
 FuncionObjetivototalesc(e).. BT(e) =E= **sum**(s, BS(s,e))+**sum**(p,BP(p,e))+**sum**(d,BD(d,»
 e))+**sum**(x,BR(r,e));
 FuncionObjetivoS(s,e).. BS(s,e) =E= **sum**(t,VPS(s,t,e) + VPDEFS(s,t,e) - CTCS(»
 s,t,e) - CTIS(s,t,e) - CTISOBS(s,t,e) - CTIFALS(s,t,e) - CTMS(s,t,e) - CTDEFS(s,t,e));
 FuncionObjetivoP(p,e).. BP(p,e) =E= **sum**(t,VPP(p,t,e) + VPDEFP(p,t,e) - CTCP(»
 p,t,e) - CTFP(p,t,e) - CTFP(p,t,e) - CTISOBP(p,t,e) - CTIFALP(p,t,e) - CTMP(p,t,e) - C»
 TDEFP(p,t,e) - CTSUBP(p,t,e));
 FuncionObjetivoD(d,e).. BD(d,e) =E= **sum**(t,VPD(d,t,e) - CTCD(d,t,e) - CTTD(d,»
 t,e) - CTISOBD(d,t,e) - CTIFALD(d,t,e) - CTMD(d,t,e) - CTDEFD(d,t,e));
 FuncionObjetivoR(r,e).. BR(r,e) =E= **sum**(t,VPR(r,t,e) - CTCR(r,t,e) - CTISOBR»
 (r,t,e) - CTIFALR(r,t,e) - CTMR(r,t,e));

*----->

*RESTRICCIONES DE COMPRA, PRODUCCION, TRANSPORTE, INVENTARIO, DEMANDA

Eq1(s,m,t,e).. QS(s,m,t,e) =L= CMAXFS(s,m);
 Eq2(s,p,m,t,e).. QTSP(s,p,m,t,e) =E= **sum**(j,MA(m,j)***sum**(q, QPP(p,q,j»
 ,t,e));
 Eq3a(s,m,t,e)\$(ord(t) eq 1).. NIS(s,m,t,e) =E= NISinc(s,m) + (1-ALFA(s,m))*QS(s,»
 m,t,e) - **sum**(p,QTSP(s,p,m,t,e));
 Eq3b(s,m,t,e)\$(ord(t) ne 1).. NIS(s,m,t,e) =E= NIS(s,m,t-1,e) + (1-ALFA(s,m))*QS»
 (s,m,t,e) - **sum**(p,QTSP(s,p,m,t,e));
 Eq4(s,t,e).. **sum**(m,NIS(s,m,t,e))=L=CMIS(s);
 Eq5(s,p,m,t,e).. QTSP(s,p,m,t,e) =L= NCTSP(s,p,m)*XSP(s,p,m,t);
 Eq6(s,p,t,e).. QTTSP(s,p,t,e) =E= **sum**(m, QTSP(s,p,m,t,e));
 Eq7(s,m,t,e).. NIS(s,m,t,e)=E= NISOBS(s,m,t,e)- NIFALS(s,m,t,e);
 Eq8(p,t,e).. **sum**(s, QTTSP(s,p,t,e)) =L= CMETP(p);
 Eq9(p,q,j,t,e).. QPP(p,q,j,t,e) =E= QPPN(p,q,j,t,e) + QPPEX(p,q,j,t»
 ,e);
 Eq10(p,q,t,e).. **sum**(j, QPPN(p,q,j,t,e)) =L= MCFPN(p,q,t);
 Eq11(p,q,t,e).. **sum**(j, QPPEX(p,q,j,t,e)) =L= MCFPEX(p,q,t);
 Eq12(p,q,j,t,e).. Y(p,q,j,t) =E=1;
 Eq13a(p,q,j,t,e)\$(ord(t) eq 1).. W(p,q,j,t) =G=Y(p,q,j,t) - YY(p,q,j);
 Eq13b(p,q,j,t,e)\$(ord(t) ne 1).. W(p,q,j,t) =G= Y(p,q,j,t) - W(p,q,j,t-1);
 Eq13c(p,q,j,t,e)\$(ord(t) eq 6).. W(p,q,j,t) =G=Y(p,q,j,t) - YY(p,q,j);

```

Eq14(p,j,t,e).. QP(p,j,t,e) =E= sum(q, QPP(p,q,j,t,e));
Eq15(p,j,t,e).. QSUBP(p,j,t,e) =L= PQSP(p,j)*QP(p,j,t,e);
Eq16a(p,j,t,e)$ (ord(t) eq 1).. NIP(p,j,t,e) =E= NIPinc(p,j) + (1-BETA(p,j))*QP(p,»
j,t,e) + QSUBP(p,j,t,e) - sum(d,QTPD(p,d,j,t,e));
Eq16b(p,j,t,e)$ (ord(t) ne 1).. NIP(p,j,t,e) =E= NIP(p,j,t-1,e) + (1-BETA(p,j))*QP(»
p,j,t,e) + QSUBP(p,j,t,e) - sum(d,QTPD(p,d,j,t,e));
Eq17(p,t,e).. sum(j,NIP(p,j,t,e)) =L= CMIP(p);
Eq18(p,d,j,t,e).. QTPD(p,d,j,t,e) =L= NCTPD(p,d,j)*XPD(p,d,j,t);
Eq19(p,d,t,e).. QTTPD(p,d,t,e) =E= sum(j, QTPD(p,d,j,t,e));
Eq20(p,t,e).. sum(d, QTTPD(p,d,t,e)) =L= CMSTP(p);
Eq21(p,j,t,e).. NIP(p,j,t,e) =E= NISOBP(p,j,t,e) - NIFALP(p,j,t,e);

Eq22a(d,j,t,e)$ (ord(t) eq 1).. NID(d,j,t,e) =E= NIDinc(d,j) + sum(p,QTPD(p,d,j,t-»
TTPD(p,d,e)) - sum(r,QTDR(d,r,j,t,e));
Eq22b(d,j,t,e)$ (ord(t) ne 1).. NID(d,j,t,e) =E= NID(d,j,t-1,e) + sum(p,QTPD(p,d,j»
,t-TTPD(p,d,e)) - sum(r,QTDR(d,r,j,t,e));
Eq23(d,t,e).. sum(j,NID(d,j,t,e)) =L= CMID(d);
Eq24(d,r,j,t,e).. QTDR(d,r,j,t,e) =L= NCTDR(d,r,j)*XDR(d,r,j,t);
Eq25(d,r,t,e).. QTDR(d,r,t,e) =E= sum(j,QTDR(d,r,j,t,e));
Eq26(d,t,e).. sum(r, QTDR(d,r,t,e)) =L= CMSTD(d);
Eq27(d,j,t,e).. NID(d,j,t,e) =E= NISOBD(d,j,t,e) - NIFALD(d,j,t,e);

Eq28a(r,j,t,e)$ (ord(t) eq 1).. NIR(r,j,t,e) =E= NIRinc(r,j) + sum(d,QTDR(d,r,j,t-»
TTDR(d,r,e)) - sum(c,QTRC(r,c,j,t,e));
Eq28b(r,j,t,e)$ (ord(t) ne 1).. NIR(r,j,t,e) =E= NIR(r,j,t-1,e) + sum(d,QTDR(d,r,j»
,t-TTDR(d,r,e)) - sum(c,QTRC(r,c,j,t,e));
Eq29(r,t,e).. sum(j,NIR(r,j,t,e)) =L= CMIR(r);
Eq30(r,c,t,e).. QTTRC(r,c,t,e) =E= sum(j,QTRC(r,c,j,t,e));
Eq31(r,t,e).. sum(c, QTTRC(r,c,t,e)) =L= CMSTR(r);
Eq32(r,j,t,e).. NIR(r,j,t,e) =E= NISOBR(r,j,t,e) - NIFALR(r,j,t,e);

Eq33(c,j,t,e).. sum(r,QTRC(r,c,j,t,e)) =L= DEMCE(c,j,e,t);

*-----»
*ECUACIONES DE COSTOS

CostoTotalFabriS(s,t,e).. CTCS(s,t,e) =E= sum(m,CUFMS(s,m,t)*QS(s,m,t,e));
CostoTotalManipulacionS(s,t,e).. CTMS(s,t,e) =E= sum((m,p),CUMS(s,m)*QTSP(s,p,m,t,e»
));
CostoTotalTransporteS(s,t,e).. CTTS(s,t,e) =E= sum((p,m),CUTSP(s,p,m)*QTSP(s,p,m,»
t,e));
CostoTotalInveSobranteS(s,t,e).. CTISOBS(s,t,e) =E= sum(m,CUIOBS(s,m)*NISOBS(s,m,t»
,e));
CostoTotalInveFaltanteS(s,t,e).. CTIFALS(s,t,e) =E= sum(m,CUIFALS(s,m)*NIFALS(s,m,t»
,e));
CostoTotalDefecS(s,t,e).. CTDEFS(s,t,e) =E= sum(m,CUDEFS(s,m)*ALFA(s,m)*QS»
(s,m,t,e));

CostoTotalComprasP(p,t,e).. CTCP(p,t,e) =E= sum((s,m),PUMSP(s,p,m)*(1-tasap(p,»
m)*(1-tasas(s,m)))*QTSP(s,p,m,t,e) + PUMDEFSP(s,p,m)*tasap(p,m)*(1-tasas(s,m))*QTSP(s,»
p,m,t,e));
CostoTotalFabriP(p,t,e).. CTFP(p,t,e) =E= sum((q,j),CFCP(p,q,j,t)*Y(p,q,j,t) »
+ CUFPPN(p,q,j,t)*QPPN(p,q,j,t,e) + CUFPEX(p,q,j,t)*QPPEX(p,q,j,t,e));
CostoTotalSubcontraP(p,t,e).. CTSUBP(p,t,e) =E= sum(j,CUSUBP(p,j)*QSUBP(p,j,t,e)»
);
CostoTotalManipP(s,p,t,e)$ (ord(t) eq 1).. CTMP(p,t,e) =E= sum(j,CUMP(p,j))*[sum(m, MA»

```

```

(m,j)*sum(q, QPP(p,q,j,t-TTSP(s,p),e))+ sum(d,QTPD(p,d,j,t,e))]);
CostoTotalManipulacionP(s,p,t,e)$ord(t ne 1).. CTMP(p,t,e) =E= sum(j, CUMP(p,j)*[sum
m(m, MA(m,j)*sum(q, QPP(p,q,j,t-TTSP(s,p),e))+ sum(d, QTPD(p,d,j,t,e))]);
CostoTotalTransporteP(p,t,e).. CTPP(p,t,e) =E= sum((d,j),CUTPD(p,d,j)*QTPD(p,d,j,»
t,e));
CostoTotalInveSobranteP(p,t,e).. CTISOBP(p,t,e) =E= sum(j,CUISOBP(p,j)*NISOBP(p,j,t»
,e));
CostoTotalInveFaltanteP(p,t,e).. CTIFALP(p,t,e) =E= sum(j,CUIFALP(p,j)*NIFALP(p,j,t»
,e));
CostoTotalProdDefecP(p,t,e).. CTDEFP(p,t,e) =E= sum(j, CUDEFP(p,j)*BETA(p,j)*QP(p»
,j,t,e));

CostoTotalComprasD(d,t,e).. CTCD(d,t,e) =E= sum((p,j),PUPPD(p,d,j)*(1-tasad(d,»
j)*(1-ratep(p,j))*QTPD(p,d,j,t,e) + PUPDEFPD(p,d,j)*tasad(d,j)*(1-ratep(p,j))*QTPD(p,»
d,j,t,e));
CostoTotalManipulacionD(d,t,e).. CTMD(d,t,e) =E= sum(j, CUMD(d,j)*[sum(p, QTPD(p,d,»
j,t-TTPD(p,d),e) + sum(r,QTDR(d,r,j,t,e))]);
CostoTotalTransporteD(d,t,e).. CTTD(d,t,e) =E= sum((r,j),CUTDR(d,r,j)*QTDR(d,r,j,»
t,e));
CostoTotalInveSobranteD(d,t,e).. CTISOBD(d,t,e) =E= sum(j,CUISOBD(d,j)*NISOBD(d,j,t»
,e));
CostoTotalInveFaltanteD(d,t,e).. CTIFALD(d,t,e) =E= sum(j,CUIFALD(d,j)*NIFALD(d,j,t»
,e));
CostoTotalProdDefecD(d,t,e).. CTDEFD(d,t,e) =E= sum((p,j), CUDEFD(d,j)*tasad(d,j»
)*QTPD(p,d,j,t,e));

CostoTotalComprasR(r,t,e).. CTCR(r,t,e) =E= sum((d,j),PUPDR(d,r,j)*QTDR(d,r,j,»
t,e));
CostoTotalManipulacionR(r,t,e).. CTMR(r,t,e) =E= sum(j, CUMR(r,j)*[sum(d, QTDR(d,r,»
j,t-TTDR(d,r),e) + sum(c,QTRC(r,c,j,t,e))]);
CostoTotalInveSobranteR(r,t,e).. CTISOBR(r,t,e) =E= sum(j,CUISOBR(r,j)*NISOBR(r,j,t»
,e));
CostoTotalInveFaltanteR(r,t,e).. CTIFALR(r,t,e) =E= sum(j,CUIFALR(r,j)*NIFALR(r,j,t»
,e));

*-----»
-----
*ECUACIONES DE INGRESOS

IngresosS(s,t,e).. VPS(s,t,e) =E= sum((p,m),PUMSP(s,p,m)*(1-tasap(p,m»
)*(1-tasas(s,m))*QTSP(s,p,m,t,e));
IngresosdefectuososS(s,t,e).. VPDEFS(s,t,e) =E= sum((p,m),PUMDEFSP(s,p,m)*tasap(»
p,m)*(1-tasas(s,m))*QTSP(s,p,m,t,e));

IngresosP(p,t,e).. VPP(p,t,e) =E= sum((d,q,j),PUPPD(p,d,j)*(1-tasad(»
d,j)*(1-ratep(p,j))*QTPD(p,d,j,t,e));
IngresosdefectuososP(p,t,e).. VPDEFP(p,t,e) =E= sum((d,q,j),PUPDEFPD(p,d,j)*tasa»
d(d,j)*(1-ratep(p,j))*QTPD(p,d,j,t,e));

IngresosD(d,t,e).. VPD(d,t,e) =E= sum((r,j),PUPDR(d,r,j)*QTDR(d,r,j,»
t,e));

IngresosR(r,t,e).. VPR(r,t,e) =E= sum((c,j),PUPRC(r,c,j)*QTRC(r,c,j,»
t,e));

```

*----->

```
MODEL Proveedores /all/;  
*OPTION ITERLIM=300000;  
*OPTION RESLIM=100000;  
*option subsystems;  
option mip = xa ;  
option mip=xpress;  
*option optca= 0;  
*option optcr= 0.01;  
SOLVE Proveedores using MIP maximizing BTESP;
```