

3. PLATAFORMA DE SOLUCIONES LOGÍSTICAS EN LA MINERÍA GLOBAL

Los problemas de optimización en las cadenas de suministro mineras, son abordados de acuerdo a los niveles de decisión y las dimensiones funcionales del negocio (Pimentel *et al.*, 2010). En este sentido, las ciencias administrativas clasifican el proceso de toma de decisiones en tres niveles teniendo en cuenta el horizonte temporal (Bradley, Hax y Magnanti, 1977), que incluyen, la planificación estratégica en lo que se refiere a la toma de decisiones en el largo plazo, de gran alcance y de información muy agregada, representando en el entorno minero, por ejemplo, la apertura de nuevas empresas mineras y la expansión de la capacidad de las instalaciones existentes; la planificación táctica, que se focaliza en la asignación eficaz de recursos para satisfacer los requerimientos de la demanda y las restricciones de operación en un mediano plazo, como por ejemplo, el desarrollo de planes de producción en las minas o en los puertos, o planes de transporte ferroviario, por lo que se requiere significativa agregación en la información; y por último, las operaciones de control que incluyen programación de bajo nivel, en un corto plazo, lo que requiere que la información generada en niveles de decisión más altos deba ser desagregada a un grado útil, como por ejemplo, la asignación y el envío del equipo de arrastre en la mina, y la programación del tráfico de trenes en vías férreas restringidas.

En la dimensión funcional, los problemas en las operaciones mineras suelen incluir la programación de la mina a cielo abierto y subterránea, que consiste en determinar el calendario de producción óptimo durante la vida útil del yacimiento, desde el estudio de viabilidad hasta la fase de terminación; la asignación y envío del equipo de arrastre y carga en la mina, que consiste en el despliegue eficaz de camiones y excavadoras de acuerdo con algunos criterios de rendimiento, manteniendo una constante y fiable alimentación del mineral a las plantas de procesamiento; el procesamiento, en el que se realizan procesos físicos y químicos destinados a mejorar la calidad del mineral mediante la aplicación de operaciones de clasificación, concentración y aglomeración; la mezcla, que consiste en mezclar el mineral mediante un adecuado almacenamiento y recuperación, tanto el patio de

acopio en la mina como en el puerto, con el fin de entregar el mineral con las especificaciones de calidad requeridas; programación y despacho de trenes, lo que implica efectivamente el enrutamiento y control del movimiento del tren sobre una línea, así como la reunión de planificación y el paso de los trenes en las secciones de una sola línea, mientras se atienden las limitaciones operativas y la planificación y programación en el puerto, que consiste en la determinación de un plan óptimo para satisfacer la demanda de las embarcaciones, mientras se minimizan los retrasos en la cola de arribos de las naves, y la efectiva determinación de rutas para transportar productos minerales desde el recinto a la nave (Pimentel et al., 2010).

En un informe presentado por la CEPAL (2004) se concluye que la minería de los materiales de la construcción (no metálicos), tal como está concebida hasta el momento, no es sostenible. Para revertir esta situación, se resalta la importancia del valor agregado en el producto minero, de tal manera que se involucren a todos los actores. La cadena productiva de los materiales no metálicos del sector minero colombiano, está orientada a la exploración, explotación y comercialización de minerales como arena, calizas y arcillas, que son utilizados en procesos de producción industrial, construcción de viviendas e infraestructura, de allí la importancia de esta cadena en el desarrollo social y económico de una nación (Cárdenas y Reina, 2008). Del censo minero realizado por el Ministerio de Minas y Energía (2013), se identificaron las siguientes problemáticas: nivel de ilegalidad en cerca del 63% en promedio, en minerales como carbón y no metálicos los trabajos sin título minero ascienden al 60% y en oro al 85%, altos niveles de informalidad empresarial y laboral, baja implementación de acciones en seguridad y salud en el trabajo, escasa formación del talento humano y bajos niveles de información sobre la evolución del negocio a nivel nacional e internacional, por lo tanto no existe un programa a largo plazo.

La utilización de modelos matemáticos se convierte en una herramienta esencial para el diseño y la implementación de cadenas de suministro. Vernadat (1996) sugiere dos aspectos básicos en el modelado de las cadenas de suministro: *“las cadenas deben ser modeladas para su manejo propio, y la integración y la coordinación de los procesos necesitan ser modeladas”*. Por ende, el modelo debe ser capaz de capturar la complejidad de la cadena de suministros e integrar sus recursos (Dávila y Ramírez, 2012). Pimentel *et al.* (2011) afirman que la programación estocástica, representa

la mejor manera de abordar la metodología de solución de los problemas de las cadenas de suministro mineras. Varias metodologías eficientes se han desarrollado en ambientes estocásticos para el problema de programación de la producción minera (Bendorf y Dimitrakopoulos, 2013; Godoy y Dimitrakopoulos, 2004; Goodfellow y Dimitrakopoulos, 2013; Lamghari y Dimitrakopoulos, 2012; Lamghari, Dimitrakopoulos, y Ferland, 2013; Montiel y Dimitrakopoulos, 2013).

En términos de valor total de la producción de minerales, para el año 2011, Europa (excepto Rusia) y los EE. UU representaron el 3,5% y 4,2% de la minería metálica, respectivamente, mientras que países en vías de desarrollo contribuyeron con un poco más del 22%. Además, países desarrollados, ricos en recursos, como Australia y Canadá representaron el 13,3% y 2,6% y China el 12,7% (Ericsson y Hodge, 2012). A pesar de las crisis ocasionales, la industria minera de Australia ha experimentado 10 años de increíble crecimiento, en gran parte debido a la fuerte demanda de recursos de las economías emergentes, como China (Measham et al., 2013). China ha descubierto 171 tipos de recursos minerales, y están siendo probadas las reservas de 158 especies minerales (Xifengru et al., 2011). Canadá, produce a través de su industria minera cerca de 60 tipos de minerales, incluyendo 26 clases de metálicos, 22 de no metálicos y 5 de materias primas minerales desde aproximadamente 250 minas a partir de piedras, arena y grava (March Consulting Associates, 2012). Los países que lideran la producción mundial, han logrado un sólido desarrollo, alcanzando significativos niveles de crecimiento económico, Cárdenas y Reina (2008) identificaron factores de éxito, tales como: calidad de las instituciones, políticas macroeconómicas, formación del talento humano, desarrollo tecnológico, encadenamientos productivos, clúster y adecuadas estrategias de productividad (Gómez y Correa, 2011). Según Cárdenas y Reina (2008) “América Latina fue una de las cuatro regiones del mundo que presentó un crecimiento “record” en exportaciones, debido a la gran cantidad de producción minera”. Dentro de estos países, se encuentran a nivel de Suramérica: Chile, Perú y Brasil.

La minería es una actividad económica de interés en Colombia, a pesar de que el aporte al PIB no es muy significativo (2,32% con respecto al PIB total en 2012), su tendencia se encuentra en incremento en los últimos años, especialmente el sector de los no metálicos (0,32% con respecto al

PIB total) (Ministerio de Minas, 2014). El plan nacional para desarrollo minero visión 2019 liderado por el Ministerio de Minas y Energía (UPME, 2006), se enfoca en la promoción de un conjunto de minerales estratégicos tales como: carbón, oro, níquel, platino, esmeraldas y materiales de construcción, los cuáles son considerados críticos para el desarrollo productivo y económico del país. Los minerales no metálicos, dentro de los cuales se consideran los materiales de construcción no representan un aporte tan importante en volúmenes de exportación, por lo que existe una brecha para la consolidación de una cadena de suministro global, dadas las potencialidades del sector. Además, el Plan Estratégico del Programa Nacional de Investigaciones en Energía y Minería 2005 – 2015 (Colciencias, 2005), contiene una propuesta de líneas de investigación y desarrollo tecnológico para diferentes fases de la actividad minera y energética en desarrollo y productividad para apoyar la exploración y evaluación de los minerales estratégicos o desarrollar tecnologías tendientes a mejorar la productividad minera y las operaciones.

Respecto al tamaño de la minería no metálica, se puede indicar que, en el 2014, la producción de la caliza alcanzó los 15,37 millones de Toneladas, que representa un incremento del 10,18% con respecto a 2013 y la del cemento gris llegó a los 12,4 millones, que se traduce en un aumento del 10,1% con respecto al año anterior. El incremento en el valor agregado de los minerales no metálicos se debió al aumento en la producción de rocas y materiales utilizados en la construcción en 9,9%, en tanto que la de minerales para usos industriales descendió en 2,2% (DANE, 2013). Esto significa que en Colombia se cuentan con reservas del mineral y es posible, si se invierte en tecnología, suplir el mercado interno lo cual conllevaría a una reducción de costos por el transporte y se generaría más empleo para la población colombiana, además de la reducción de las importaciones (UPME, 2014). Con base en las teorías de la de la competitividad, para permanecer en mercados competitivos y dinámicos, la diferenciación ya no se enfoca en los productos sino en la manera de construir relaciones perdurables y recíprocamente fructuosas entre proveedores y clientes, por lo que estos principios constituyen la clave para considerar las estructuras de colaboración en la cadena global de la minería, teniendo en cuenta la planeación de la capacidad.

La colaboración en las cadenas de suministros, es llamativa tanto para las organizaciones como para los investigadores (Chandra y Kumar, 2000; Barratt, 2004). De acuerdo con esto, los resultados de estudios asociados a la colaboración en las cadenas de suministro, traen beneficios significativos como el aumento de ingresos, disminución de costos y mejora la flexibilidad operativa para hacer frente a la incertidumbre de la demanda (Simatupang & Sridharan, 2005), fijación de precios de transferencia a través de integración vertical utilizando un modelo de juegos cooperativo con información perfecta, en el cual el valor de Shapley genera los precios de transferencia (Rosenthal, 2008); formación de coaliciones entre los socios de la cadena de suministro para el análisis de la estabilidad, aplicando la teoría de juegos cooperativos de un juego en tres niveles con dos jugadores (Nagarajan & Susic, 2008); eficiencia de diferentes tipos de contratos cuando la demanda y el tiempo de entrega son aleatorios, combinando la teoría de colas para evaluación y la teoría de juegos para la toma de decisiones (Hennet & Arda, 2008).

Con respecto al enfoque en la solución, los beneficios se traducen en modelos de cadenas de suministro binivel que incluyen factores de costo, así como elementos de competencia y cooperación entre los agentes (Esmaili, Aryanezhad & Zeephongsekul, 2009); disminución del Efecto Bullwhip en una cadena de suministro estructurada en dos niveles, resuelta mediante la teoría de juegos (Dobos y Pinter, 2010); distribución del riesgo de cooperación con base en la teoría de juegos colaborativos con el valor de Shapley (Xiaofen, J. et al., 2011). Además, dentro de las principales ventajas que generan las relaciones de colaboración, se encuentra el incremento en los niveles de productividad por la unificación de procesos, aumento en los ingresos, en la capacidad de innovación, generación de “supervivencia” en contexto de turbulencia del mercado y disminución el riesgo (Bustamante, 2009).

Por otra parte, para Accenture (2007) una adecuada administración de la cadena de suministro permite a las empresas mineras fijar y obtener beneficios financieros tales como: 1. Mayores niveles de ganancias a través del incremento de la producción y venta de los minerales; 2. Reducciones de los activos mediante una mayor rotación de inventario; 3. Reducción de los costos de tiempo de espera en el envío y despacho de las órdenes de mineral. Así mismo, este autor argumenta que para alcanzar estos

beneficios y obtener una cadena de suministros con niveles de desempeño, las empresas del sector minero cuentan con cuatro estrategias inseparables de la actividad minera: construir habilidades con entrenamiento de calidad, integración entre las partes (empresas), definir el modelo adecuado de operaciones y mejora de los procesos de planificación de la cadena de suministro.

3.1 Cadena de Suministro Global de la Minería

El desarrollo regional, en un mundo globalizado, está determinado por diversos factores, entre ellos, alcanzar el máximo aprovechamiento de las ventajas competitivas, asociado a los niveles de productividad y de manera sustentable, exponiendo la capacidad de una región para sostener y expandir su participación y posicionamiento en los mercados tanto nacionales como internacionales y de esta manera coadyuvando en el mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes. En este sentido, la visión de una región y particularmente de sus gobernantes debe apuntar a una adecuada organización de sus territorios (Baena, Sánchez y Montoya; 2006), estudios de localización de las organizaciones, y conformación de complejos productivos o clúster que comprenden, según Porter (2008) empresas relacionadas, proveedores especializados, empresas de industrias e instituciones asociadas que compiten pero que también cooperan.

Para Forrester (1961) el éxito de las organizaciones se relaciona con la interacción entre los flujos de información, materiales, pedidos, dinero, mano de obra y equipos. Este concepto corresponde a una aproximación sobre lo que se conoce como cadena de suministro (SC), entendiendo su gestión como la comprensión y control de los flujos. El modelo propuesto está compuesto por cuatro niveles (fábrica, almacén, distribuidor y minorista) y mediante simulación se realizaron experimentos sobre algunos de los efectos que genera el encadenamiento por etapas, especialmente, el efecto látigo (del término inglés *Bullwhip Effect*). Además, Burns y Sivazlian (1978), con base en las actividades logísticas, conciben a la cadena de suministro como la agrupación de empresas que se desempeñan en el diseño, ingeniería, marketing, fabricación y distribución de bienes o servicios a los consumidores finales. De acuerdo a Stevens (1989), Lee y Billington (1993) y Eksioglu (2001) la cadena de suministros está compuesta por actividades que involucran la planificación, coordinación,

control de materiales y productos terminados, conforme a las necesidades de los clientes, señalando que existen dos tipos de flujos dentro de las organizaciones: de materiales y de información. No obstante, Akkermans *et al.* (2003), Stadtler (2005) y Menguzzato (2009), consideran que es una red compatible con tres tipos de flujos: los flujos de material, que representan los flujos de productos físicos desde los proveedores hasta los clientes, así como las devoluciones de productos, servicios y el reciclado; los flujos de información, que representan la transmisión y seguimiento de pedidos, y coordinación de los flujos físicos; y los flujos financieros, que representan el flujo de dinero. La programación de estos flujos se deberá realizar con base en los principios de calidad, costos mínimos y plazos de entrega, es decir, que los materiales sean movidos de manera económica y efectiva (De la Arada, 2015).

Desde un enfoque sistémico, Christopher (1992) define la cadena de suministro como una red de organizaciones involucradas en actividades que generan valor, representadas en bienes o servicios en las manos del cliente final. Además, Ganeshan y Harrinson (1995) la conciben como una red de instalaciones y de distribución que permite el aprovisionamiento de materiales, su transformación en productos en proceso o finales, y su distribución para satisfacer las necesidades de los clientes. Para Manzini (2012), cuando la cadena de suministro es vista como una red, los sistemas multimodales de transporte (por carretera, ferrocarril, marítimo o aéreo) representan los “arcos” en la red, mientras que las instalaciones en las que se manejan los productos a través de la red, representan los “nodos” e incluyen instalaciones de fabricación, almacenes y centros de distribución, terminales de contenedores (o puertos marítimos), centros de consolidación o des consolidación de cargas, patios, ferrocarril, crossdocks y aeropuertos. A pesar que, la cadena de suministro es una red de organizaciones y funciones geográficamente dispersas en varios sitios, estas deben cooperar para reducir costos y aumentar la velocidad de los procesos y de las actividades entre los proveedores y los clientes (Genin, 2003).

La Londe (1997), Min y Mentzer (2000), Chandra y Kumar (2000) y Mentzer (2004) coinciden en afirmar que la cadena de suministro es un conjunto o integración de varias empresas independientes que están involucradas en la fabricación de un producto, y que implementan acciones para gestionar el flujo dentro del canal de distribución desde los proveedores

hasta el cliente o usuario final. Sin embargo, Min y Mentzer (2000), agregan a este concepto la importancia de que todas las organizaciones involucradas contribuyan en el aumento de la competitividad, mientras que Chandra y Kumar (2000), resaltan la relevancia del consenso entre las distintas firmas para cubrir la demanda del cliente final y buscar el incremento del beneficio. Por su parte, Jagdev y Thoben (2001) aportan a todos los elementos descritos, la necesidad de combinar habilidades para alcanzar y lograr un final común. En tanto que Ballou (2004) la define como una agrupación de actividades funcionales que se repiten en todo el canal de flujo de los productos para transformar las materias primas en productos finales y se añade valor al consumidor. Correa y Gómez (2009) coinciden en que la cadena de suministro *“busca añadir valor al cliente, mejorar las relaciones con proveedores, y aumentar las ganancias a los accionistas”*.

Beamon (1998) manifiesta que se pueden distinguir dos procesos esenciales en la SC, tales como, a) la planificación de la producción y gestión del inventario, y b) distribución y logística. El primero hace referencia a la oferta de bienes o servicios y al almacenamiento de materias primas, productos en proceso y productos terminados, y el segundo, a la forma en la que los productos son entregados a las compañías, distribuidores y clientes finales. No obstante, para Poirel y Bonet, (2006), la cadena de suministro incluye el conjunto de operaciones de distribución física, gestión de la producción y gestión de la oferta, llevadas a cabo por una serie de empresas de tipo industrial, comercial o de servicios en una lógica de coordinación para abastecer la demanda.

Mentzer *et al.* (2001), definieron tres niveles de complejidad en una cadena de suministro: directa o simple, extendida o completa y red de cadenas de suministros. La primera, se compone de una organización, un proveedor y un cliente; la segunda contiene a los proveedores de los proveedores de la organización y a los clientes de los clientes inmediatos (Minoristas); y la tercera incluye todas las organizaciones involucradas aguas arriba y aguas abajo en la cadena de suministro. Para Ballou (2004) en la cadena de suministro extendida se llega hasta los puntos de origen de la materia prima o a los clientes finales, por lo que es importante planificar y controlar las actividades clave y de apoyo y los flujos de información si repercuten en la logística del servicio que se suministra al cliente, así como los costos de suministro en esta etapa, tomando como base que la dirección

de la cadena extendida tiene el potencial de incrementar el desempeño logístico por encima de la cadena inmediata de suministros.

Sánchez (2008) propone una cadena de suministros extendida en la que agrupa el conjunto de procesos en dos niveles: planificación y ejecución, considerando el horizonte de planificación en la toma de decisiones. En el nivel de planificación se utilizan sistemas avanzados o APS (*Advanced Planning Systems*) y en el nivel de ejecución, son usados sistemas ERP (*Enterprise Resource Planning*). A su vez, el nivel de planificación se subdivide en decisiones de tipo colaborativo, estratégico, táctico, operativo y detallado. Los procesos involucrados en el nivel de planificación incluyen el modelado y planificación de la demanda; a nivel estratégico, el diseño de la red de suministro; a nivel táctico, la planificación de la misma; a nivel operativo, la planificación del aprovisionamiento, de la producción, del transporte y de la distribución y a nivel detallado, comprende el aprovisionamiento, producción, transporte y distribución detallados; mientras que el nivel de ejecución lo componen: la gestión del inventario, producción, gestión de almacenes, gestión de las entregas y gestión de pedidos. Cabe mencionar, que ambos niveles siguen la secuencia de la cadena de valor respectivamente en cada nivel jerárquico, así: comprar, fabricar, almacenar, mover y vender (Sánchez, 2008).

La gestión de la cadena de suministro (*del término inglés Supply Chain Management SCM*), desde sus inicios, se centró fundamentalmente en la necesidad de integración de los procesos clave del negocio, desde los proveedores originales hasta el consumidor o cliente final (Burns y Sivazlian, 1978; Menguzzato 2009). Por tanto, la logística es la encargada de lograr que los productos o servicios adecuados, estén en el lugar indicado, en el momento oportuno y satisfaga los requisitos del cliente, con base en tres funciones básicas: abastecimiento, producción y distribución (Ballou, 2004). A su vez, la logística puede ser interna o externa; la primera es encargada de la planificación y gestión de todas las funciones y procesos al interior de la organización de tal manera que actúen en forma coordinada e integrada, considerando el intercambio de información para mantener la sinergia del sistema (Groover, 2007), mientras que, la segunda se enfoca en la gestión e integración de las actividades entre los agentes externos de la cadena y la empresa. Los actores, están constituidos por proveedores,

empresa, clientes, transportistas, almacenes en tránsito y centrales de compra y distribución (De La Arada, 2015).

Según Genin (2003), SCM es un enfoque integrado y su objetivo es reducir la necesidad de capital de trabajo de la empresa, así como satisfacer a los clientes poniendo a su disposición una cantidad de productos al costo más bajo. Stadtler (2005), ilustra la SCM como una casa, en la que cada uno de los bloques que la componen permite mostrar cada aspecto de la gestión. El techo de la casa evidencia los objetivos finales de la SCM: la competitividad y servicio al cliente, los cuales se pueden mejorar con la reducción de costos, flexibilidad ante las fluctuaciones de la demanda y brindando un alto nivel de calidad de los bienes o servicios. Las columnas que lo soportan representan, por un lado, la integración de las unidades de negocio y por otro, la coordinación necesaria que debe existir entre ellas a todos los niveles, teniendo en cuenta los flujos de materiales, información y financieros. En este caso, la base, representa los fundamentos y procesos de apoyo para la gestión de la cadena (la logística, el mercadeo, investigación de operaciones, teoría organizacional, entre otros) (Stadtler y Kilger, 2002).

De acuerdo a la ilustración realizada, para Porter (1999) la competitividad de una nación está relacionada con la capacidad para innovar e implementar mejoras en sus industrias. Según Christopher (1998), el servicio al cliente se estructura en tres elementos: pre-operación que consiste en el acceso del cliente a la información sobre los bienes o servicios ofertados; operación, en el cual son entregados los mismos según los requisitos del cliente y post-operación, que constituye el servicio prestado luego de que la orden se cumple. Por su parte, Van der Vaart y Van Donk (2004) definen la integración como la colaboración entre los distintos actores de la cadena, incluyendo actividades, tales como, la selección de los socios, redes colaborativas entre las empresas, y aspectos del liderazgo ejercido por algunos miembros, de tal forma que se supriman las barreras y se faciliten los flujos, considerando una etapa de transparencia, otra fase de compromiso y coordinación y por último una etapa de planificación integral, relacionada con la toma de decisiones. Es por esto que, Lejeune y Yakova (2005) destacan que la tipología de la cadena de suministro tradicional diferencia cuatro bases de configuración: comunicación, coordinación, colaboración y cooperación. Incluso, para Stank *et al.* (2001) la colaboración entre los integrantes de la cadena de

suministro es un elemento crítico en su proceso de planificación y de los resultados obtenidos por ellos.

3.2 Colaboración en la Cadena de Suministro

3.2.1 Principales Componentes de la Colaboración

En la cadena de suministro comunicativa, predomina la entropía en el proceso de toma de decisiones, pues cada una de las entidades es independiente, y no existe la búsqueda de objetivos globales, por ende, cada entidad usa su poder de negociación para alcanzar sus propios objetivos. En la cadena de suministro coordinada, se genera competitividad en las diferentes organizaciones que integran la cadena, mediante el flujo de información en todos los eslabones, con base en datos transaccionales, de producción y de los procesos relacionados. Mientras que, en la cadena de suministro colaborativa (SCC), priman los procesos de toma de decisiones coordinadas, teniendo en cuenta relaciones ganar – ganar, por lo que las entidades añaden objetivos comúnmente definidos y utilizan sus activos complementarios para generar competitividad en el largo plazo; es por esto, que con frecuencia los objetivos comunes de los actores de la cadena son definidos teniendo como referencia un problema en particular, buscando la necesidad de soluciones conjuntas. A diferencia de la anterior, en la cadena de suministro cooperativa, el proceso de toma de decisiones es a base de paridades y coordinación, hay un conjunto de objetivos que comúnmente serán perseguidos por las entidades de la cadena, siendo este conjunto de objetivos definido por una entidad líder de la cadena (Lejeune y Yakova, 2005).

La colaboración es definida como el trabajo en conjunto entre dos o más empresas para planificar y realizar las operaciones de la cadena de suministro (Simatupang y Sridharan, 2005), con base en el compromiso, confianza, respeto, habilidades y conocimientos de los socios de la cadena (Barratt, 2004; Kumar, 2001). A esto añade Mehrjerdi (2009), los siguientes componentes: integración, automatización, información y confianza, además, la colaboración va más allá del intercambio y la integración de información entre los proveedores y sus clientes, e implica la toma de decisiones tácticas conjuntas entre los socios en las áreas de planificación, previsión, distribución y diseño del producto. Entonces, la

colaboración en la SC debe ser concebida desde un enfoque sistémico, en el existe sinergia entre los socios, coadyuvando a la planificación conjunta y el intercambio de información en tiempo real, por lo que la razón principal de la colaboración en la cadena de suministro es que una empresa no puede competir con éxito por sí misma (Forrester, 1961), debido a que los clientes y la competencia son cada vez exigentes.

Según Bowersox (1990), la gestión de la cadena de suministro puede analizarse como una estrategia de colaboración, basada en la vinculación de la totalidad de las operaciones comerciales de las empresas, con el objeto de lograr una visión compartida de las oportunidades de mercado. De la misma forma, Blackburn (1991), sostiene que la colaboración en la cadena de suministro facilita en las empresas la eficaz respuesta a las necesidades del cliente final con un costo mínimo. Para Fisher (1997) el rol fundamental de la colaboración entre las distintas empresas interrelacionadas a lo largo de la cadena de suministro es hacer coincidir la oferta y la demanda en el momento adecuado y en el lugar correcto, con base a esto, la colaboración en la cadena puede ser definida como un medio para que dos o más empresas encaucen esfuerzos conjuntos en la definición y entrega de productos a los clientes finales, para obtener mayores beneficios, lo que implica que los actores de la cadena estén dispuestos a establecer metas comunes y participar en esfuerzos coordinados que se traduzcan en un mejor rendimiento para todas las partes (Herrera y Acevedo, 2014).

Simatupang y Sridharan (2002) y Barratt (2004) establecieron dos posiciones que conducen a dos nuevos tipos de colaboración, la colaboración vertical o jerárquica y la colaboración horizontal. Además, Sahay (2003) señaló que existen dos tipos de cadena de suministro colaborativa, relacionadas con la colaboración entre los proveedores y los clientes o consumidores. Para Bustamante (2009) y Sun y Ma (2010), los nuevos escenarios de negocios en el marco de la globalización de los mercados definen la red colaborativa como el resultado de combinaciones de colaboración verticales y horizontales entre las organizaciones, mayormente autónomas, distribuidas territorialmente, disímiles en lo relativo a su entorno operativo, cultura, capital social y objetivos, que se unen para lograr ofertar una completa gama de servicios, con el propósito de atender proyectos que demanden una alta capacidad de respuesta, la cual no podría ser soportada individualmente por alguno de los miembros de tal red. Además, según Rey

(2001), la integración horizontal mostró ventajas similares en cada una de las empresas de un mismo sector industrial, al lograr acceso preferencial a servicios críticos. Las estrategias emergentes de ambas clases de integración se conocen como “Estrategia de Colaboración Controlada”, debido a que esta colaboración inter-empresarial se materializa a través de la adquisición de los capitales de los diferentes miembros.

3.2.2 Tipos de Colaboración

Kanter (1994), en su investigación plantea algunos tipos de colaboración en relación al grado de integración entre las empresas, como son: (i) integración estratégica, que implica la comunicación permanente entre los líderes principales para discutir los objetivos globales o los cambios en cada empresa; (ii) integración táctica, que involucra profesionales para desarrollar planes y proyectos específicos; (iii) integración operativa, proporciona medios para realizar las actividades diarias en el trabajo; (iv) integración interpersonal, construye una base necesaria para construir y sostener el futuro de una relación; (v) integración cultural, personas involucradas con habilidades de comunicación y conciencia cultural, para que sirvan de puente entre las diferencias de las organizaciones. Mientras que, Stadtler (2005) definen cinco tipos de colaboración: (i) estimación de la demanda colaborativa, (ii) Inventario colaborativo, (iii) oferta colaborativa, (iv) capacidad colaborativa, (v) transporte colaborativo, (vi) materiales y servicios colaborativos.

Según Mehrjerdi (2009), la capacidad colaborativa permite determinar el plan de capacidad contratada o disponible con sus clientes, para negociar un nivel mínimo y máximo de capacidad, de tal forma que no se afecte la producción, ni los costos de ambos. Para Stadtler (2005) el objetivo típico de la capacidad colaborativa es proporcionar flexibilidad adicional para el fabricante (el consumidor), siendo concebida como un ejemplo de colaboración relacionada con el servicio: el intercambio de información de proveedores y consumidores sobre la demanda y la disponibilidad de servicios de producción. En este sentido, un fabricante (consumidor) colabora con un subcontratista (proveedor) en torno a la utilización de las instalaciones de producción del subcontratista, basado en el plan maestro del fabricante, por tanto, el fabricante busca asegurarse de que él consigue una reserva para una cantidad específica de la capacidad, sin saber el nivel

utilizado de la capacidad de producción y el producto que se fabrica, por lo que, la capacidad colaborativa generalmente es accionada por el consumidor.

Existen diferentes estructuras, de acuerdo al número de agentes y de las relaciones entre ellos; Simatupang y Sridharan (2002) propusieron una estructura simple de cadenas de suministro colaborativas que se componen de un minorista y un proveedor o divisiones autónomas en una empresa. En cambio, Sun y Ma, (2010), clasificaron la estructura de la cadena de suministro colaborativas en tres niveles: el más bajo contiene minoristas, en un segundo nivel, los fabricantes, y por último los proveedores. En lo referente a la estructura de la cadena, cuando existen dos niveles la estructura 1-1 relaciona a un vendedor y un comprador; 1-N relaciona un vendedor y múltiples compradores; N-1 relaciona múltiples vendedores y un comprador. En la de tres niveles, la estructura 1-1-1 relaciona un proveedor, un fabricante y un minorista; la estructura N-1-n, relaciona múltiples proveedores, un fabricante y múltiples minoristas. La arquitectura más analizada ha sido la de dos niveles con una estructura 1-1, por tal razón Nagarajan y Sosic (2008), Xiao y Qi (2008), Xie y Neyret (2009) y Biazaran Gharakhani (2011), proponen para futuras investigaciones la extensión del modelo a un número mayor de niveles.

3.2.3 Cadena de Suministro Global

El entorno económico mundial, trae consigo retos que implican la adopción de una nueva estrategia competitiva para las compañías multinacionales, teniendo en cuenta que la gestión global de la cadena de suministro está basada tanto en una mayor integración de los proveedores y clientes, como en una mayor coordinación a través de múltiples procesos de valor agregado dentro de la empresa (McCormack et al, 1994; Ohmae, 1995). Por tanto, las estrategias mencionadas son requeridas para mantener la base de la capacidad en una escala global para procesos esenciales como la realización de pedidos, gestión de la oferta y desarrollo de nuevos productos (Majchrzak y Wang, 1995; Womack y Jones, 1996). Por su parte, Eksioglu (2001) se refiere a la cadena de suministro global (GSC), como una cadena donde una o más entidades del negocio, tales como, proveedores, fabricantes, distribuidores o minoristas operan en diferentes países. A este concepto, Porter (1999) y Preiss et al. (1996) añaden que

la estrategia global de la SC implica tanto decisiones operativas como financieras, por ende, su implementación exitosa puede conducir a la gestión de riesgos con mayor eficacia y el aprovechamiento de las ventajas específicas de la empresa y puntuales de la ubicación para obtener mayores ingresos y menores costos. Sin embargo, para Manzini (2012) una cadena de suministro global, no es sólo una entidad abstracta integrada por políticas, contratos con proveedores, acuerdos de compra, etc., sino que existe en una red de ordenadores o base de datos, apoyados por un sistema logístico que permite mover variedad de productos de una manera oportuna y generando rentabilidad en el negocio.

3.2.4 Cadenas de Suministro de la Minería

Una cadena de suministro global de la minería se define como una red integrada por instalaciones diseñadas para procesar (usando una variedad de técnicas de producción), y distribuir, (usando una variedad de modos de logística), productos a granel o minerales desde las minas a los clientes, que pueden estar separados por distancias geográficas significativas (Pimentel et al, 2010). En este contexto, la planificación estratégica debe ser dedicada a evaluar grandes inversiones de capital en el establecimiento de una nueva mina (o en la expansión de la capacidad de las existentes), instalaciones para el procesamiento, estaciones de suministro y canales logísticos con el fin de satisfacer la creciente demanda. Sin embargo, en los tiempos de disminución la demanda, las decisiones estratégicas deben también incluir, el cierre o no de las instalaciones específicas de manera temporal o permanente (Diaz et al ,2006). La expansión de la capacidad y los problemas de diseño de redes son difíciles de resolver, por lo que, cuando se considera este riesgo, la complejidad computacional requiere especial cuidado y una mayor precisión en el desarrollo de la formulación matemática y, lo más importante, el enfoque en la solución. (figura 14).

Gómez y Correa (2011) realizaron un análisis del transporte y distribución de materiales de construcción utilizando simulación discreta en 3D. La simulación discreta permite analizar desempeño del transporte y distribución de manera permitiendo medir cantidades movilizadas, eficacia de los procesos y utilización de recursos. Por su parte, Pimentel et al (2011) proponen un modelo estocástico para la planeación estratégica de la capacidad en la cadena de suministro global de la minería que incluye

las zonas de explotación, plantas de procesamiento, transporte multimodal, zonas de embarque en puertos y distribución final.

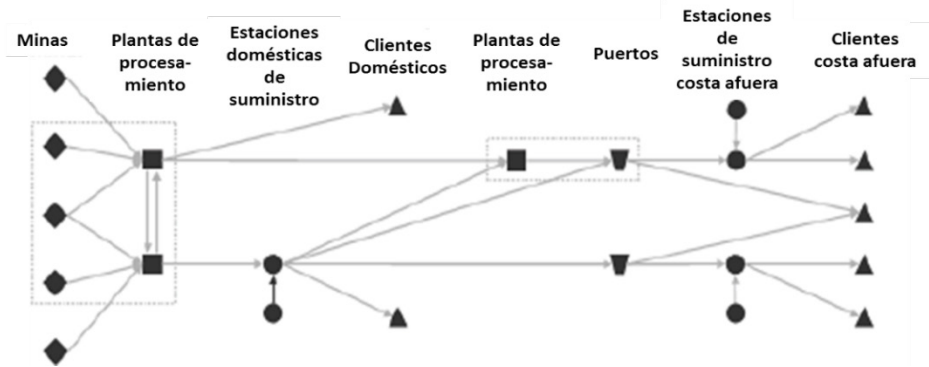


Figura 14. Cadena de suministro global de la minería.

Fuente: (Pimentel et al., 2010)

3.3 Métodos de Solución para la Optimización de la Cadena de Suministro Global de la Minería No Metálica

La formulación matemática del modelo para la planificación de una cadena de suministro global de minería está integrada por el tamaño de lote, la expansión de la capacidad, la ubicación de las instalaciones en la red y las decisiones de diseño, tales como: la gestión de los niveles de producción en la mina y su proceso de transformación correspondiente en la sinterización y alimentación de pellets en las plantas de procesamiento, así como la transformación del pellet en gránulos en las plantas de peletización; el flujo del mineral entre las minas, plantas, puertos, estaciones de suministro y los clientes que utilizan camiones, ferrocarriles, conductos o vasos; ubicación de las instalaciones y diseño de la red, es decir, abrir, cerrar y volver a abrir las instalaciones y los canales de logística de acuerdo a la demanda; expansión de la capacidad incremental en las instalaciones y la logística en los canales originales, o recién creados. Para futuros trabajos, es una prioridad la aplicación de métodos de solución a los problemas integrados de la cadena de suministro minera, ya en instancias del tamaño del problema de manera realista se requieren algoritmos de propósito especial. La solución de los problemas de programación estocástica, parecen más adecuados para hacer frente a todas las incertidumbres inherentes a las operaciones mineras (Pimentel et al, 2011).

Bodon et al. (2011) describieron un método para modelar una cadena de suministro compleja de exportación usando una combinación de técnicas de optimización y de simulación de eventos discretos para permitir el análisis de la capacidad y la evaluación de opciones de expansión. Se presenta un estudio de caso de una implementación exitosa del enfoque, en la cadena de suministro de exportación del carbón en una zona de Indonesia. Por su parte, He *et al.* (2011) construyeron un modelo de optimización multiobjetivo para la selección de socios en las empresas mineras, en combinación con el grado de la relación cercana entre éstas y posteriormente introducen la aplicación de un algoritmo genético, con experimentos, para el mismo propósito haciendo uso de MATLAB.

Dimitrakopoulos (2011) planteó un enfoque no convencional para la estimación de las reservas o comprensión de los depósitos minerales en toda la cadena de la minería, la optimización de la planificación minera, y la previsión de la producción, integrando dos elementos: la simulación estocástica y la optimización estocástica, proporcionando un extendido marco que permite el modelado y la integración directa del yacimiento, la incertidumbre de diseño de la mina, planificación de la producción, y la valoración de los proyectos y operaciones mineras. Este marco estocástico aumenta el valor de los programas de producción en un 25%.

Dávila y Ramírez (2012) presentaron un modelo matemático para la optimización de una cadena de suministro global con consideraciones de cupos de compra, periodos de pago, capacidad en volumen y peso de los medios de unitarización de carga como restricciones del sistema, 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. En este aspecto, se presenta 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 y cada proveedor. Para investigaciones futuras proponen, entre otras, la extensión de la topología del modelo; la consideración de elementos estocásticos, que incluyen variables como la demanda y los leads time, que se ajusten a un entorno más real y aspectos para la apertura o cierre de los puertos.

Zhao *et al.* (2012) plantearon un modelo de la cadena de suministro para la planificación de la mina de carbón mediante la programación

lineal para la programación de la producción. El objetivo del modelo de optimización es maximizar los volúmenes de ventas con las restricciones en la cadena de suministro de demanda del cliente, tiempos de entrega, capacidad y el inventario. Se utiliza un ejemplo de la mina de carbón a cielo abierto para demostrar la adecuación del modelo y su capacidad para reducir la planificación y programación del tiempo y la respuesta a la incertidumbre. El modelo puede ser extendido para planificación de la producción y el uso de minas en más sectores de la minería y para varias plantas de preparación del carbón.

Montiel y Dimitrakopoulos (2013) desarrollaron una extensión del modelo de la cadena de suministro de un complejo minero que contiene varias minas, que operan simultáneamente, donde existen múltiples flujos de procesamiento, reservas y productos, fundamentado en un método de múltiples etapas para la producción minera con base en el riesgo a largo plazo, las operaciones con múltiples tipos de rocas y flujos de procesamiento. El método desarrollado utiliza un algoritmo de recocido simulado en la fase de optimización, tratando de minimizar las desviaciones de los objetivos de producción y diferentes flujos de procesamiento del mineral. El enfoque propuesto se aplica al depósito de cobre en Escondida Norte, Chile.

Fung, Singh y Zinder (2014) diseñaron un modelo para la optimización de la planificación de la capacidad en las cadenas de suministro de minerales, que tiende a minimizar el costo de la expansión de la infraestructura para cualquier escenario con base en la demanda futura. Es diseñado como una metaheurística - un híbrido de la programación lineal entera mixta (MILP), y recocido simulado. Los experimentos computacionales con datos procedentes del mayor exportador de carbón del mundo, muestran la capacidad de la metaheurística desarrollada para resolver instancias del problema industrial escalado. La investigación adicional puede comprender el desarrollo y la comparación de los diferentes modelos de programación matemática basados en el modelo híbrido presentado.

El trabajo desarrollado por Goodfellow y Dimitrakopoulos (2016) muestra, de nuevo, en dos etapas el modelo global estocástico de optimización para la programación de la producción de complejos de la minería a cielo abierto con incertidumbre, que incluye tres combinaciones de metaheurísticas como el recocido simulado, la optimización de enjambre de partículas y la evolución diferencial para evaluar el desempeño del

programa de solución. Para futuras investigaciones se puede investigar el uso de la optimización estocástica de varias etapas con el fin de permitir que las políticas estén adaptadas en virtud de la oferta (geológica) y la incertidumbre en la demanda (precio del metal), lo que probablemente provocará un aumento del valor económico.

Zhang y Kleit (2016) desarrollaron un modelo económico teórico de dos etapas para obtener el valor de las reservas de minerales almacenados para su procesamiento futuro, una vez la mina se agota y cómo afecta a la tasa de extracción óptima, además, investigan la sensibilidad de la tasa de explotación óptima por las variables de entrada, como el precio de los productos básicos, tasa de descuento, costo de capital, y la capacidad de procesamiento, etc. Concluyen que la opción de almacenamiento puede aumentar significativamente las ganancias en las minas y proponen, entre otros aspectos, la inclusión de elementos que cubran los efectos de las economías de escala en el modelo.

3.4 Beneficios de la Planificación Colaborativa

Los beneficios de una cadena de suministro dependen principalmente de la demanda del mercado, y la demanda del mercado depende de ciertos factores vitales como son el precio de venta del producto, la disponibilidad del producto y por supuesto la calidad de los productos. En la práctica, la demanda del mercado no se puede anticipar exactamente. Como resultado la demanda y la incertidumbre juegan un papel muy importante en los procesos vitales de adopción de estrategias óptimas, la incertidumbre de la demanda incluso ha pasado a ser un tema muy importante de la investigación de operaciones, principalmente en el área de la gestión de la cadena de suministro (Roy, 2015).

Vonderembse et al. (2006), establece que los beneficios que se pueden obtener a partir de una planificación desde el punto de vista colaborativo son: (i) reducción en los tiempos de ciclo, (ii) mayor flexibilidad en los procesos asociados a los pedidos y las entregas, (iii) disminución de los niveles de inventarios. También, en el caso de que se requieran recursos, y no estando éstos disponibles, una planificación adecuada apoyará al intercambio de recursos entre los agentes de la cadena de suministro (Binder y Clegg, 2007). Respecto a la generación de productos de calidad, Li et al. (2007) plantea que la colaboración entre los proveedores y los

clientes apoyará a la disminución de los costos operacionales y, por consiguiente, a la generación de procesos de colaboración más eficientes. Por otra parte, Huiskonen (2001) establece que el desarrollo de una planificación colaborativa favorece tanto la gestión con los clientes como la gestión de los inventarios. En este sentido, Alarcón et al. (2004) plantea que las ventajas principales de la utilización de la planificación colaborativa están relacionadas con: (i) reducción del efecto bullwhip, (ii) reducción de los costos, (iii) reducción de los inventarios, (iv) reducción de los tiempos de ciclo y (v) mejora de la satisfacción del cliente. Así mismo, Berning (2004) establece que las metas que debe perseguir el desarrollo de una planificación que considere un intercambio de información para promover la colaboración entre los agentes de la cadena se orienta a: (i) generar transparencia en los procesos productivos, (ii) reducir los tiempos de respuesta, (iii) minimizar los conflictos potenciales entre los socios y (vi) la utilización efectiva de los inventarios.