

---

---

# LOGÍSTICA ESBELTA APLICADA AL TRANSPORTE EN EL SECTOR MINERO

## LEAN LOGISTICS APPLIED TO TRANSPORT IN THE MINER SECTOR

---

---

*Martín D. Arango Serna<sup>1</sup>, Hermenegildo Gil Gomez<sup>2</sup> & Julián A. Zapata Cortés<sup>3</sup>*

*1. Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia*

*2. Profesor Titular, Universidad Politécnica de Valencia, España*

*3. Est. Maestría Ingeniería Administrativa, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia*

*mdarango@unalmed.edu.co, hgilgom@omp.upv.es, jazapat1@unalmed.edu.co*

Recibido para evaluación: 20 de Abril de 2009 / Aceptación: 15 de Mayo de 2009 / Recibida versión final: 1 de Junio de 2009

### RESUMEN

Este trabajo ha sido elaborado con el objetivo de plantear la logística esbelta como una de las soluciones actuales como factor de competitividad y reducción de costos en las empresas del sector minero. Aquí se expresa la necesidad de que las redes de transporte tengan opciones de mejorar su gestión logística manejando sus recursos de manera adecuada, reduciendo costos y usando herramientas de nueva generación, de modo que mejore sustancialmente su estrategia competitiva, con el fin de lograr ventajas competitivas en su sector. Para lo mencionado se empezó con una breve introducción donde se afirma que el sector transporte debe ser capaz de afrontar cambios y adaptarse a una nueva coyuntura donde la mejora de la gestión logística forme parte de su surgimiento. Se ha recopilado información y se ha investigado el significado y la importancia de la gestión logística y la aplicación de herramientas de lean Six Sigma para el planeamiento estratégico y las ventajas competitivas que se pueden obtener en este sector.

**PALABRAS CLAVES:** Transporte, Logística esbelta, Cadena de suministro, Ventaja competitiva, Industria minera.

### ABSTRACT

This work has been done with the aim of raising the lean logistics as one of the solutions as a factor of competitiveness and cost reduction in the miner industry. Here is expressed the need that companies in the transport sector has to improve their logistics management by managing their resources of the best way, reducing costs and using tools of new generation, that improves substantially its competitive strategy in order to achieve advantages competitive in their sector. It began with a brief introduction which states that the transport sector should be able to face changes and adapt to a new situation where the improvement of logistics management as part of its emergence. Information has been gathered and investigated the meaning and importance of logistics management and implementation of Lean Six Sigma tools for strategic planning and competitive advantages to be gained in this sector.

**KEY WORDS:** Transport, Lean logistics, Supply chain, competitive advantage, Miner industry.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la carrera por optimizar los procesos productivos se han desarrollado varias herramientas metodológicas y sistemas de gestión de calidad, entre los cuales, Six Sigma tiene un lugar especial por ser uno de los más ambiciosos y a la vez efectivo.

El sector minero es uno de los sectores donde más se puede trabajar en aplicación de métodos de optimización de procesos, y entre ellos sobresale el proceso de transporte, el cual muchas veces es despreciado, pero que a la hora de evaluar la operación total, es uno de los factores que más influye en el costo total de los productos.

La idea de la logística esbelta y con ésta la de six sigma es reducir a su mínima expresión el número de defectos en la fabricación y entrega de un producto o servicio a un cliente, llegando a un máximo de 3,4 "fallas" por cada millón de oportunidades.

La tendencia de aplicar esta filosofía a la gestión logística le apuesta a la reducción de varios tipos de desperdicios que se dan a lo largo de la cadena de suministro, como son la sobreproducción, los tiempos de espera en transportes, el exceso de reprocesos, inventarios, movimientos y defectos; y es así como nace el término o metodología de la logística esbelta, tendiendo a llevar todos los componentes de la cadena de suministro a un ideal de perfección, bajo el cual no deben haber defectos, los procesos deben ser siempre mejores en términos de efectividad y tiempo, y los problemas sólo pueden ser solucionados con un proceso de análisis y monitoreo previo que asegure que todas las fallas de la empresa sean eliminadas de raíz.

El presente trabajo pretende entregar una concepción acerca de la forma de cómo obtener una cadena de transporte esbelta en la industria del sector minero

## 2. LOGÍSTICAESBELTA

La Gestión de la cadena de suministro ha sido diseñada para la eliminación de desperdicios generados en los diferentes procesos involucrados dentro de una empresa, como lo son el exceso de inventario, tiempos excesivos y altos costos. Las cadenas de suministro se comportan a veces halando y no empujando el inventario, pero esto es exactamente lo que la logística esbelta busca a través de herramientas como el Kanban, el pull, entre otras, contribuyendo así a la eliminación de pérdidas en la cadena

Un reto importante para los mayoristas, fabricantes, minoristas, distribuidores, proveedores, y cada una de las partes involucradas en la cadena de suministro es el de reducir los costos y mantener el equilibrio a lo largo de ésta, respetar horarios y mantener un inventario ideal en los procesos.

Martichenko (2009), establece que la logística esbelta plantea varios desafíos, especialmente en los procesos que se manejan a nivel internacional, pues los tiempos necesarios para los traslados tanto de carga como de información veraz en tiempo real, son condiciones básicas que se deben garantizar para satisfacer las necesidades de los clientes. Por lo tanto, cuando existe la probabilidad de la participación de proveedores, transportistas, terminales, agentes aduaneros, ferrocarriles, entre otros, se corre el riesgo de cometer errores e incurrir en costos adicionales y pérdidas de tiempo. (Martichenko, 2009).

Dada la dinámica de los mercados y el entorno competitivo que actualmente se desarrolla a nivel internacional, las empresas crean diferentes maneras de hacer negocios y están adoptando Lean y Six Sigma para apoyar iniciativas de reducción de costos y mejoras en la calidad tanto de sus productos como de sus procesos. (Martichenko, 2009).

El impacto de la metodología Lean en la logística es bastante significativa, ya que el objetivo del Lean es eliminar los desperdicios, reduciendo así el trabajo en el proceso de inventarios que, a su vez, disminuye los tiempos de ciclo y, aumenta la velocidad del flujo en la cadena de suministro. (Martichenko, 2009).

Lean Six Sigma Logística se puede definir como: La eliminación de los inventarios innecesarios a través de esfuerzos disciplinados para entender y reducir la variación, dando paso al aumento de la velocidad y el flujo de la cadena de suministro. (Martichenko, 2009).

Al utilizar esta metodología en la cadena de suministro global, se impacta de manera importante a los minoristas, mayoristas, distribuidores, fabricantes y proveedores, es decir, la logística de los proveedores de servicios necesitan entender esto y su impacto en la reducción de residuos y el control de la varianza, pues al agilizar muchos de sus procesos lograrán aumentar sus niveles de competitividad en el mercado, incrementando así sus ganancias.

### 3. SECTOR MINERO

La minería se ha convertido un factor determinante en la economía de algunos países, en los últimos años se ha podido observar una dinámica muy grande en los mercados, haciendo de esta una industria soporte, la cual aporta un gran porcentaje del Producto Interno Bruto (PIB) y de las exportaciones, así por ejemplo vemos varios casos exitosos como los de Canadá país líder en minería y en el cual el sector, representa un 5% de PIB y el 15% de las exportaciones, otro país importante es Australia en donde el aporte minero se ve reflejado en un 8% del PIB y un 40% de las exportaciones del país. Los casos más cercanos a Colombia, son los principales actores suramericanos los cuales se han vuelto actores mundiales por sus niveles de producción, es así como en Chile, Perú y Brasil, la minería se ha vuelto la base de su economía. En el caso de Chile, la minería significa el 47% de las exportaciones y el 8% del PIB, lo cual le ha permitido mantener esta tasa de crecimiento de aproximadamente el 7% anual durante la última década y ser el país con mejor crecimiento de Suramérica, Perú por su parte a triplicado desde los noventas las áreas dedicadas a minería estando hoy por encima de las 34 millones de hectáreas y significándole el 50% de las exportaciones del país (Cardenas y Reina, 2008).

En la última década, Colombia ha mejorado en el contexto industrial - económico teniendo uno de los mejores crecimiento en la región, como se ha evidenciado en el último informe estadístico de la CEPAL y en cifras del DANE para el año 2007 en donde Colombia obtuvo el quinto puesto entre los países latinoamericanos de mayor crecimiento económico, registrando una tasa del 7.5%, mientras que la región en conjunto creció a un ritmo del 6.5%. En este crecimiento económico sobresale el sector minero como motor de la economía al presentar una de las mayores tasas de crecimiento con un 7.73% anual, significando más de 2.5 billones de pesos y un participación en el producto interno del país de 2,6%. En el último reporte del DANE del segundo trimestre de 2008 un aumento de 7.6%, el mayor de todas las actividades económicas.

#### 3.1. Minería Aurífera

La minería Aurífera hace parte importante de la industria minera al ser uno de los minerales metálicos de mayor volumen de producción y explotación en Colombia, en siglo XIX fue el primer productor mundial de oro y ocupó esta posición por mucho tiempo (Mesa Sectorial Minera, 2003), Desde 1991 cuando la producción llegó a 34,8 toneladas, empezó una tendencia decreciente hasta llegar a 18,8 toneladas en el año 1998, ya a partir de 1999 se dieron importantes incrementos especialmente en el año 2003, probablemente como consecuencia del aumento de los precios internacionales del metal.

En este momento la minería aurífera en comparación con otros productos mineros como el ferroníquel y el carbón se percibe cierto estancamiento que se puede ilustrar en la grafica de producción en la cual a partir del 2003 se ve como descende aproximadamente más del 50% hasta hoy, afectando de igual manera las exportaciones del material. Se espera que la producción de oro en Colombia registre un notable incremento en el corto y mediano plazo por la entrada en operación de nuevas minas y la modernización de la producción en varias de las ya existentes.

La minería aurífera se ha convertido en Colombia para varios pueblos, en la principal fuente económica desde hace mucho tiempo, por ejemplo en la Guajira y el Cesar, la minería del carbón ha sido su principal fuente económica (Dane,

2006). Así mismo en Marmato, Caldas, El Sur de Bolívar, Remedios y Segovia, en Antioquia, la minería aurífera ha sido de igual manera la fuente de ingreso (Gobernación de Antioquia, 2005).

### 3.2. Planteamiento del problema

El oro como se expuso anteriormente es un metal estratégico para Antioquia y Colombia, una de las grandes debilidades de la oferta minera exportable del país, es el desconocimiento de las metas y capacidades de las empresas mineras para abastecer demandas potenciales (Plan Nacional de Desarrollo Minero 2002-2006). Es por ello, que aplicar técnicas de mejoramiento de transporte en el sector minero tanto en la logística internamente como en la externamente puede generar fortalezas para mejorar la competitividad del sector. Esta fortaleza sumada a las oportunidades que ofrecen los altos niveles del precio del oro actualmente y el gran valor agregado que deja producirlo, son la motivación para estudiar la influencia de los factores logísticos, tecnológicos, cadena de suministro y organizacionales, sobre la evolución de la productividad de la minería aurífera colombiana y las políticas que pueden implementarse para su mejoramiento.

La minería del oro en Colombia se caracteriza por ser uno de los sectores económicos importantes como fuente de trabajo y de divisas para el país. Sin embargo, esta minería es de grandes contrastes puesto que existen por un lado, unidades medianas de producción que aunque no poseen los últimos avances tecnológicos sí cuentan con recursos apropiados para la explotación industrial. De otra parte, existe un gran número de pequeñas unidades mineras de tipo artesanal y familiar, que no cuentan con los requerimientos mínimos para aprovechar eficientemente estos recursos no renovables y limitar la contaminación del medio ambiente derivada de esta actividad y su estructura de redes de transporte logístico.

El sector tiene que transformarse y ser competitivo a nivel mundial, y esta transformación en gran parte estará dado por la tecnificación de procesos, nuevos métodos de mejoramiento de procesos, nuevos esquemas en sus redes logísticas y nueva maquinaria y equipo que permita desarrollar de forma eficiente las actividades. La mejora de las empresas y la actividad en si, necesita empezar por identificar sus procesos, su tecnología, su cadena de suministro y necesitan conocer los avances tecnológicos que le permitan mejorar sus prácticas de negocio.

## 4. TRANSPORTE

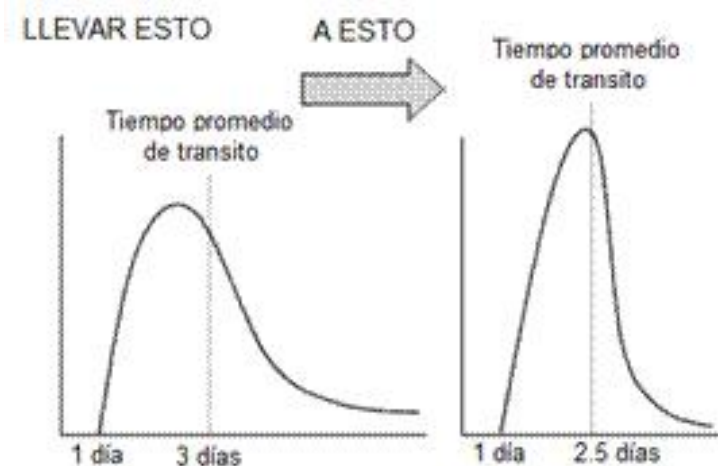
De acuerdo con Sánchez (2008), el transporte es una función clave en la cadena de suministro, ya que actúa como un vínculo físico entre clientes y proveedores, lo que permite el flujo de materiales y recursos. Además, con el advenimiento de la logística de terceros (3PLs) e incluso los proveedores de 4PLs, ofrecen algo más que las conexiones de transporte físico. Dichas compañías proporcionan un servicio de valor agregado incluyendo actividades de control de inventario y gestión de almacenes. A pesar de la tendencia al aumento de la oferta de actividades de valor agregado, la adquisición y gestión de las relaciones con los transportistas están basadas en los precios, previendo que los transportadores deben responder oportunamente a la demanda a corto plazo, a los cambios y en particular estar dispuestos a trabajar con las incertidumbres que se presentan en el proceso. (Boughton, 2003).

Esta comercialización del transporte, donde los clientes explotan su poder adquisitivo, da como resultado transportistas que ofrecen flexibilidad como una ventaja competitiva. Sin embargo, este enfoque da lugar a una estrategia en la que las empresas reaccionan con una cartera de actividades y oportunidades de servicio que están disponibles sin la debida consideración de la infraestructura, capacidad y competencia. Esta "talla única" conduce a un aumento de los costos y, más desfavorablemente confunde y decepciona a los clientes, llevando a una pérdida de la actividad comercial (Basck, 2001).

Tanto el transporte, como el manejo del inventario, son actividades necesarias dentro de la gestión logística; De hecho, son fundamentales para permitir la elaboración de un producto en un lugar y su consumo en otro y para el acortamiento de la distancia de separación geográfica.

Uno de los aspectos más importantes del transporte es que representa el mayor costo de logística y se debe principalmente por dos razones; la primera es el costo asociado al proceso y transformación de los productos y la segunda es el costo asociado a la energía utilizada para el traslado de los materiales y productos que se movilizan a lo largo de la cadena de suministro. (Goldsby Y Martichenko, 2005)

Goldsby Y Martichenko (2005), aseguran que el objetivo de una iniciativa de Six Sigma en el transporte es la de reducir al máximo el tiempo medio para mover las mercancías y productos, y llevar al mínimo la variación en torno a ese promedio; la figura 1 muestra el promedio de tiempo que debería disminuir, al igual que la frecuencia de los sucesos en torno a este nuevo medio.



**Figura 1.** Reducción del tiempo y la frecuencia según una iniciativa Six-Sigma. *Adaptado de Goldsby Y Martichenko (2005)*

Es importante recordar que la adquisición del servicio de flete más barato con fines de reducir costos no suele traducirse en menor costo total, ni tampoco la reducción de la inversión total en los servicios de transporte que conducen necesariamente a resultados. Lo que es realmente importante, como se indicó anteriormente, es reducir los desperdicios totales, en este caso los tiempos muertos y algunos sobrecostos entre otros, que al final ha de producir un costo total global inferior de la operación.

## 5. COMO OBTENER LOGÍSTICA ESBELTA EN TRANSPORTE

Con miras en obtener procesos de transporte en el sector minero que adopten prácticas de logística esbelta, es necesario considerar al menos los siguientes 4 elementos:

- Flexibilidad.
- Relación con los transportadores.
- Comunicación
- Optimización de rutas y operaciones.

### 5.1. Flexibilidad

Según Naim et al. (2006), la flexibilidad debe ser una característica arraigada en la estrategia de la compañía, el comportamiento, los procesos y la tecnología. El grado de flexibilidad dependerá del entorno en que se encuentre el

transportador y se basa principalmente en el nivel de incertidumbre a los que se enfrentará en la demanda de los clientes, el desempeño de los proveedores, a los procesos internos y la infraestructura propia de transporte. Es importante recordar que una estrategia proactiva y flexible en realidad conduce a la satisfacción del cliente, garantizando al mismo tiempo que se minimizan los costes totales. Pero para lograr ésto, se debe desarrollar un enfoque centrado en la flexibilidad que se ajuste al cliente y a la organización, y que debe desplegarse en lugar de "cubrir todas las posibilidades", dado que ésto es caro y poco práctico (Slack, 1990; Hill, 1985).

A medida que el tiempo avanza, los sistemas de transporte se han enfrentado a crecientes presiones que están representadas en los diferentes niveles de la competencia, y estas presiones se pueden dividir en dos grandes categorías, la primera comprende aspectos socioeconómicos, financieros y de cambios políticos que ocurrieron en el último cuarto del siglo XX. Estos cambios se derivan de un gran número de fuerzas, incluyendo: Goldsby Y Martichenko (2005).

- Cambios a largo plazo en las tasas de crecimiento en la industria
- Cambios en el producto (compra y utilización)
- La rapidez en la innovación de los productos debido al aumento de la velocidad de los cambios en la demanda del mercado.
- El cambio tecnológico y la difusión de conocimientos tecnológicos.
- Entrada y salida de grandes empresas.
- Aumento de la globalización de la industria.
- El aumento del crecimiento de los grupos económicos en una medida que es difícil identificar quién es propietario de qué.
- Cambios en los costos y en la eficiencia.
- La adopción de fabricación ágil e industrias "Mejores prácticas".
- La necesidad de gestionar las cadenas de suministro más eficientemente .
- Un mercado de cambio de la normalización a los productos diferenciados.
- Nuevas políticas de regulación y / o los reglamentos gubernamentales.
- Cambio de las preocupaciones sociales, las actitudes y estilos de vida.
- Cambios en el grado de incertidumbre.

Estos cambios afectan directamente el desarrollo y comportamiento económico de los ciclos de auge y caída. El resultando de estos cambios y de los procesos de globalización, la segunda categoría de las presiones a las que están sometidos los sistemas de transporte, y puede ser identificada debido a la demanda derivada de su naturaleza. El aumento de las presiones hacia la reducción de los costes de transporte han llevado a compañías de transporte a formar alianzas. (Naim et al., 2006)

## 5.2. Mejorar la comunicación

En la actualidad, la implementación de las tecnologías de información en las comunicaciones (TIC's) se ha convertido en una práctica esencial para aquellas empresas y en aquellos procesos donde se requiere estándares altos de calidad. El proceso de transporte dentro de la cadena de suministra es una de las operaciones que mayor implementación de las tecnologías de la información requiere, esto básicamente por la necesidad de tener un control sobre los movimientos de las mercancías.

Naim et al., (2006) asegura que una revolución está ocurriendo en la tecnología, dada la necesidad de desarrollar sistemas de transporte sin fisuras a en tres niveles diferentes:

- La interoperabilidad de los modos;
- La interconexión de las redes de la tierra al mar, y
- La compatibilidad de los sistemas de información.

La mejora de los sistemas de comunicación ha proporcionado un acceso más rápido a la información, mejorando notablemente el control y por ende la calidad de los procesos de transporte.

### **5.3. Relaciones con transportadores**

Cuando se utiliza un único o pocos transportadores, los envíos se pueden realizar de forma más económica y con mayor cuidado, gracias a la relación de confianza que se alcanza con dichos transportadores.

Según Goldsby Y Martichenko (2005) este concepto de reducción en transportadores ejemplifica el principio de reducción de complejidades encontrado en Six Sigma.

Goldsby Y Martichenko (2005) argumentan que realizar esfuerzos para permitir el ahorro de gastos de dinero, y el compromiso de envíos voluminoso deben producir mejores negociaciones, con lo cual los transportadores estarán más dispuestos a diseñar un plan de capacidades y de rutas optimas, o al menos eficientes, y a programar activos y conductores mas eficientemente.

Otra posibilidad para mejorar la operación de transporte es incorporar los transportadores dentro de la relación colaborativa con los proveedores y clientes. Frecuentemente las empresas que colaboran entre si trabajan mas cercanamente permitiendo la eliminación de intermediarios innecesarios. (Goldsby Y Martichenko 2005)

### **5.4. Optimización de rutas y de operaciones**

El problema para encontrar buenas soluciones de ruteo de vehículos para generar una correcta distribución de las mercancías provenientes de la industria minera se hace mayor a medida que las restricciones aumentan. Dentro de estas restricciones, las más importantes son las condiciones necesarias para el transporte, las limitaciones de capacidad y en muchos casos las ventanas de tiempo, que no son más que los intervalos de tiempo en que las empresas aceptan recibir o despachar mercancías.

Los métodos de ruteo se pueden dividir en tres categorías (Bremel J, Simchi-Levi D., 1997):

- Ruteo de vehículos en problemas de igual demanda.
- Ruteo de vehículos en problemas de demandas diferentes.
- Problemas de ruteo con restricciones de de ventanas de tiempo.

Sin embargo, en la realidad, encontrar sistemas de transporte en donde las demandas de cada cliente son iguales, es prácticamente imposible, motivo por el cual el análisis de los métodos de ruteo se fundamentara en los problemas en que la demanda es variable. (Bremel y Simchi-Levi, 1997)

Los métodos heurísticos, lo cuales son algoritmos que entregan soluciones aproximadas para problemas de cálculo complejos, más utilizados para la determinación de la ruta optima en procesos de distribución, son el método de ahorros y el método de barridos.

#### **5.4.1. Método de ahorros**

Este método ha sobresalido durante muchos años como un método suficientemente flexible para manejar un rango práctico de restricciones, siendo relativamente rápido para cálculo de problemas con un número moderado de paradas, y capaz de generar soluciones que están cerca del óptimo. (Ballou; 2004)

El objetivo de este método es minimizar la distancia total de viaje de todos los vehículos e indirectamente minimizar el número de vehículos necesarios para cumplir con todas las paradas.

Supóngase que se tiene que distribuir desde un punto 0 (cero) a los destinos A y B, cuya situación geográfica se muestra en Figura 2. De esta figura se puede observar que las posibilidades a seguir son la ruta 0-A-0-B-0 o bien la ruta 0-A-B-0

Sí D es el recorrido total, luego para cada caso se tiene que:

$$D = \overline{0A} + \overline{A0} + \overline{0B} + \overline{B0}$$

$$D' = \overline{0A} + \overline{AB} + \overline{B0}$$

El ahorro en distancia (S) es  $D - D'$ , así

$$S = \overline{0A} + \overline{B0} - \overline{AB}$$

El método, por supuesto, se aplica para procesos con más de 2 paradas, realizando un procedimiento similar. Por ejemplo, si un punto C es insertado entre los extremos A y B, el ahorro sería: (Ballou, 2004)

$$S = \overline{0C} + \overline{C0} + \overline{AB} - \overline{AC} - \overline{CB}$$

Y así sucesivamente se repiten los cálculos de la iteración para continuar con la ampliación de la ruta. Una parada con un gran ahorro sugiere la inclusión de esta en la ruta. [2] Si una parada no puede ser incluida debido a restricciones como capacidad, tiempos de entrega, etc., la siguiente parada que tiene el ahorro mayor se considera para su inclusión. (Ballou, 2004)

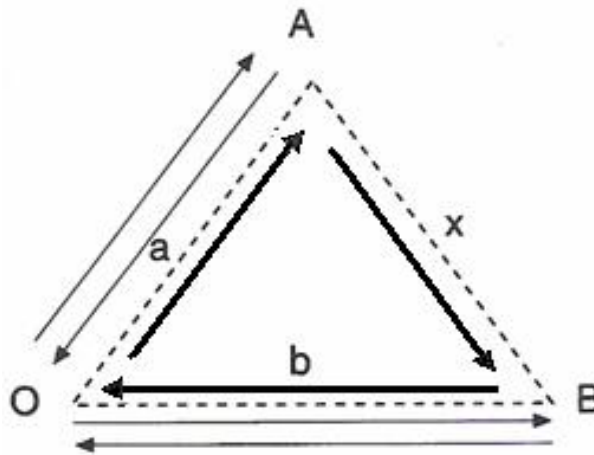


Figura 2. Esquema de rutas. Interiormente, ruta 0-A-B-0, externamente ruta 0-A-0-B-0. Adoptado de Anaya (2000)

#### 5.4.2. Método de "barrido"

Este método de ruteo de vehículos es simple y permite manejar cálculos inclusive para problemas de gran tamaño. (Ballou, 2004)

Este método es bien aplicado en problemas en que la cantidad de volumen en cada parada es tan solo una pequeña fracción de la capacidad del vehículo, cuando todos los vehículos tienen el mismo tamaño y cuando no hay restricciones de tiempo en las rutas. (Ballou, 2004)

El método se basa en la generación de un conjunto de lugares a donde se deben llevar las mercancías (clúster) y luego fija las distancias mínimas para el recorrido dentro de ese clúster. Este método puede ser explicado como:

Localizar todas las paradas, incluyendo el almacén en un mapa.



Extender una línea recta con origen en el almacén en cualquier dirección. Rotar la línea en el sentido de las manecillas del reloj, o en contra, hasta que se intercepte una parada. Preguntar: Si la intercepción es incluida en la ruta, ¿se excede la capacidad del vehículo?, Si la respuesta es No, incluir este punto y seguir con la rotación hasta interceptar la próxima parada, en la cual se hace la misma pregunta.

Si la respuesta a la pregunta anterior en una determinada parada es positiva, luego se debe excluir ese último punto y se define la ruta como el conjunto de paradas que no exceden el vehículo. Continuar con el barrido, comenzando una nueva ruta en el último punto que fue excluido. Los barridos terminan una vez han sido asignadas todas las paradas en las determinadas rutas.

Entre cada ruta, ordenar las paradas para minimizar la distancia. El ordenamiento puede ser logrado aplicando el método de la gota de lágrima o utilizando algún algoritmo que resuelva el problema del vendedor viajero.

La Figura 3 representa gráficamente el método de barrido.

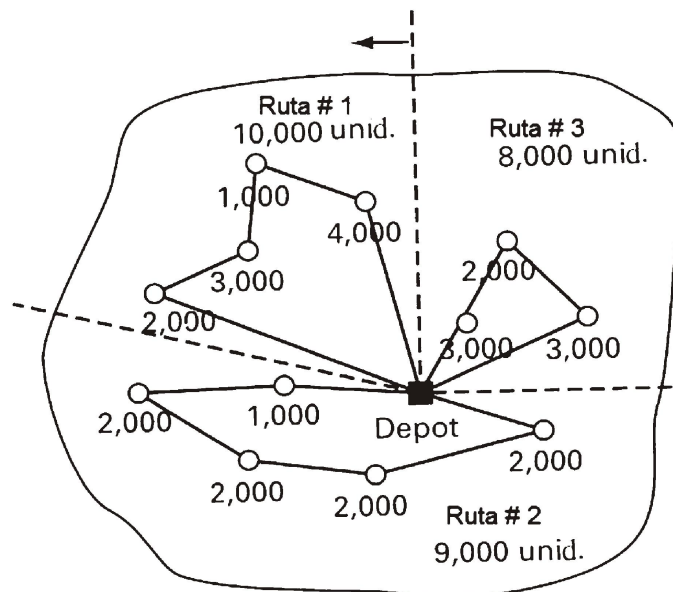


Figura 3. Método del barrido. (Ballou, 2004)

Según Bremel y Simchi-Levi, (1997) existen otros heurísticos que permiten determinar las distancias mínimas para la distribución de mercancías, dentro de los que se destacan:

- EL método de dos fases.
- Heurístico de asignación generalizada.
- Heurístico basado en localización.
- Métodos de plano cortado.
- Método del mínimo árbol-K

#### 5.4.3. Metaheurísticos

Los metaheurísticos son procesos que, partiendo de una solución ya existente, intentan encontrar una buena solución (eventualmente la óptima) aplicando a cada paso un heurístico que es diseñado para cada problema en particular. El nombre de los metaheurísticos está generalmente asociado por el tipo de búsqueda, y entre ellos se puede citar al recocido simulado, la búsqueda tabú, los algoritmos genéticos, etc. (Robuste, 2005)

Los metaheurísticos se pueden clasificar básicamente en 2 grupos dependiendo del tipo de solución que arroje. El primer grupo tiene por nombre grupo de optimización local, pues estos metaheurísticos entregan una solución local que asegura que

no hay otra mejor que ella. EL otro grupo son los llamados Hill-Climbing, los cuales pueden escapar de los óptimos locales, mediante la adopción de soluciones que pueden ser peores que la preferible o la incúmbete. (Robuste, 2005)

Según Robuste, (2005) los metaheurísticos más utilizados para la determinación de rutas óptimas de ruteo son:

#### 5.4.3.1. Recocido Simulado

Según Robuste, (2005), "El recocido simulado o SA (Simulated Annealing) es un método probabilístico que construye nuevas configuraciones aleatoriamente y las somete a reglas de probabilidad para su aceptación, evitando de esta manera la caída en óptimos locales. El proceso termina después de un cierto número de iteraciones y tiene como objetivo obtener soluciones cercanas al óptimo global en problemas de optimización combinatoria compleja".

Este es un método Hill-Climbing y se basa en la analogía con el recocido de los metales y consiste en "calentar" a alta temperatura el sistema que se intenta optimizar, para luego disminuir la temperatura muy lentamente, hasta que ya no ocurren cambios en el sistema. La variación de temperatura en el proceso físico se produce de forma continua, mientras que en el SA solo puede hacerse escalonadamente. (Robuste, 2005)

En Robuste, (2005) se consigna el procesamiento matemático del SA, el cual expresa en la Tabla 1 para un programa de enfriamiento geométrico.

#### 5.4.3.2. Búsqueda Tabú

Según Robuste, (2005) "el procedimiento denominado búsqueda tabú TS (Taboo Search) es un método inicialmente determinista, que tiene la capacidad de escapar de los óptimos locales. Comparando la mejor vecina con la solución en curso y la primera sustituye a la segunda solo si es mejor. Para que no se detenga, lo que se hace es que la mejor sustituya a la solución en curso incondicionalmente, es decir, tanto si es mejor que la solución en curso como si no lo es.

El riesgo de esta es que se pueden replantear interacciones hechas anteriormente, llevando el algoritmo a un círculo entre los mismos cálculos. Sin embargo esto puede ser solucionado mediante un grupo de soluciones no posibles, en otras palabras lo que se hace es definir el vecindario de una forma restrictiva, consistente en suponer que una solución que sea tabú y no satisfaga el nivel de aspiración no pertenece a este. (Robuste, 2005)

**Tabla 1.** Recocido simulado para un problema de enfriamiento geométrico. *Tomado de Robuste, (2005)*

Paso	Descripción
1	Dadas una solución inicial $x$ y una temperatura inicial $t$ .
2	Mientras no se verifique un cierto criterio de finalización, Repetir el siguiente ciclo $L$ veces Seleccionar aleatoriamente una solución $x'$ próxima a $x$ ; Calcular $dc = \text{Coste}(x') - \text{coste}(x)$ ; Si $dc \leq 0 \Rightarrow x = x'$ ; Si $dc > 0 \Rightarrow x = x'$ con probab. $\text{Exp}(-dc/t)$ Escoger $t = r.t$ (siendo $r$ el escalón de temperatura)
3	Retornar a la mejor solución encontrada

Se dice que una solución es tabú si está incluida o posee alguna propiedad incluida en una lista (denominada tabú). Dicha lista generalmente contiene reglas tabú (propiedades o transformaciones) que corresponden a las soluciones que se desean evitar y no las soluciones mismas (consumirían mucha memoria, tiempo, y sería muy poco restrictiva). (Robuste, 2005)

Dos conceptos que son fundamentales en este método son los referentes a la intensificación y a la diversificación. El primero hace referencia a intensificar la búsqueda de soluciones con determinadas características, mientras que el segundo refiere a diversificar la búsqueda cuando se encuentra estancado en un grupo de soluciones. A este algoritmo le tiene que ser definido una consideración de finalización, tal como puede ser un número fijo de iteraciones, o el tiempo empleado en las iteraciones. (Robuste, 2005)

En la Tabla 2 se muestra un procesamiento matemático simple para la búsqueda tabú con estrategia de diversificación o intensificación, el cual fue tomado de (Robuste, 2005)

**Tabla 2.** Búsqueda Tabú. *Tomado de Robuste, (2005)*

Paso	Descripción
1	Dada una solución inicial $x$
2	Mientras no se verifique un cierto criterio de finalización,  Seleccionar una solución $x'$ próxima a $x$ , no tabú o que satisfaga un cierto criterio de aspiración con mínimo coste en el vecindario de $x$ .  Hacer $x = x'$ y actualizar la lista tabú y criterio de aspiración.  Ejecutar una estrategia de diversificación o intensificación y repetir.
3	Retornar a la mejor solución encontrada

#### 5.4.3.3. Algoritmos Genéticos

En los algoritmos genéticos (GA) cada iteración permite obtener un conjunto de soluciones, o poblaciones en curso, y no una única solución en curso. Las soluciones posteriores son obtenidas a partir de parejas constituidas con los elementos de la población y no mediante la transformación de la solución en curso. (Robuste, 2005)

Robuste, (2005) menciona que el punto de partida de los GA es la teoría de evolución de las especies de Darwin. Si se adopta un procedimiento que dadas dos soluciones genere sucesoras que conserven las mejores características de las mismas, la calidad de las soluciones se mantendrá en las generaciones posteriores.

El procesamiento matemático de un algoritmo genético simple se muestra en la Tabla 3. (Robuste, 2005)

**Tabla 3.** Algoritmo genético. *Tomado de: Robuste, 2005*

Paso	Descripción
1	Dada una población inicial $P(0)$
2	Mientras no se verifique un cierto criterio de finalización, Evaluar la idoneidad de cada individuo en $P(t)$ Construir una nueva población $P(t+1)$ Seleccionar elementos de $P(t)$ Cruzar estos elementos Mutación de algunos elementos
3	Retornar a la mejor solución encontrada

Para seleccionar las soluciones del conjunto que tendrán descendencia, se puede utilizar el azar puro, la elección de los mejores, hacer intervenir cada individuo un cierto número de veces o bien el azar, pero con mayor probabilidad para las soluciones de buena calidad. Los procedimientos de cruce deben asegurar que las mejores características se mantengan en las soluciones sucesivas. También se suelen realizar mutaciones para fomentar la diversidad. (Robuste, 2005). Luego de haber incrementado la población se debe reducir a un tamaño conveniente, eligiendo un cierto número de soluciones mediante procesos idénticos a los de selección (proceso de regeneración). (Robuste, 2005)

#### 5.4.3.4. Colonias De Hormigas

Tal como se expresa en Robuste, (2005) Los algoritmos de colonias de hormiga ACO (Ant Colony Optimization) son modelos inspirados en el comportamiento de las colonias de hormigas reales. Estos animales, casi ciegos, son capaces de seguir la ruta más corta en su camino de ida y vuelta entre la colonia y una fuente de abastecimiento, debido a que pueden transmitirse información gracias a que cada una de ella, al desplazarse, va dejando un rastro de feromona a lo largo del camino seguido.

En general, puede decirse que el proceso se caracteriza por una retroalimentación positiva, en la que la probabilidad con la que una hormiga escoge un camino aumenta con el número de hormigas que previamente hayan elegido el mismo camino.

Los algoritmos ACO son procesos iterativos donde en cada iteración se introduce una colonia de  $m$  hormigas y cada una de estas construye una solución al problema. Las soluciones construidas (por cada hormiga) se hacen mediante reglas probabilísticas, guiándose por un rastro de feromona artificial y una información calculada a priori de manera heurística. (Robuste, 2005)

Cuando todas las hormigas han construido una solución se debe actualizar la feromona en cada arco y, tras esta, puede comenzarse una nueva iteración. (Montemanni, et al, s.a.).

Además de los metaheurísticos ya mencionados, en la literatura se pueden encontrar otros metaheurísticos que pueden ser utilizados, entre ellos encontramos los algoritmos Greedy, las redes Neuronales, etc.

## 6. PUERTOS SECOS Y HUMEDOS

La industria de los puertos debe asumir una posición de eficiencia y reducción de costos que permitan maximizar los beneficios de la operación teniendo en cuenta la relación con los clientes y la optimización de los recursos. Paixao y Bernard (2003) establecen que aquellos puertos que no realizan operaciones eficientes de bajo costo, debido a las exigencias del mercado actual, pueden ser dejados de lado, y cuando una nueva alternativa de sistema de transporte sea desarrollada tenderán a desaparecer. Por consiguiente los puertos deben volverse más ágiles para ser cada vez más competitivo y al mismo tiempo volverse un elemento clave en la logística en las cadenas de transporte.

En la Industria minera, los puertos juegan un papel fundamental, pues gran porción de los materiales obtenidos mediante el proceso de minería tienen destino internacional, y la forma como estos salen de los países, gracias a sus condiciones físicas, es a través de los puertos. Sin embargo no solo aquellos materiales que salen del país atraviesan un puerto, actualmente con el concepto de puerto seco, muchas empresas mineras están moviendo a través de éstos, ya sea por necesidades legales o por condiciones de eficiencia en el transporte de dichos materiales.

El cambio en los puertos debe hacerse pensando en cumplir con las futuras tendencias de la cadena de suministro, las cuales cada vez más tienden a ser estrategias basadas en tiempo para reducir los costos de inventario a lo largo de toda la estructura de la cadena, y reduciendo los tiempos de operación y desperdicio en las operaciones de cargue y descargue. Paixao y Bernard (2003)

### 6.1. Esbeltez y agilidad

Para el desarrollo de Puertos ágiles se requiere en primera instancia que estos sean ágiles y esbeltos. (Womack et al., 1990; Chuah, 2000; Lee, 2000).

Paixao y Bernard (2003) mencionan que los servicios producidos por los puertos varían entre muchas operaciones las cuales deben ser optimizadas y que entre el 55 y 60% de todos los costos de transporte se asignan a una operación de transporte ineficiente

Para Paixao y Bernard (2003) mediante la implementación de la teoría de esbeltez, se logra obtener un amplio rango de beneficios como son reducción de los tiempos muertos para los clientes, establecer o reducir costos, incrementar el mercado compartido, reducir el tiempo para lanzar nuevos servicios, incrementar la diversificación de los servicios, aumentar la productividad y obtener mayores beneficios

La implementación de esta teoría en otros sectores económicos ha resultado en una reducción de hasta el 90% del ciclo de tiempo, mejoras en los envíos sobre tiempo, reducción de la mano de obra en los procesos de hasta el 90%, mejoramientos de calidad por encima del 50% y una reducción del 75% del espacio utilizado para la operación. (Manufacturing Extension Partnerships, 2000) tomado de Paixao y Bernard (2003)

Los retos de logística esbelta para los puertos, es por consiguiente mover las mercancías rápida y suavemente a través de los puertos, entregando un servicio alineado con la demanda del mercado y al tiempo eliminar los desperdicios entre los procesos. (Paixao y Bernard, 2003)

Para Paixao y Bernard (2003) tales logros son, sin duda, muy importantes, especialmente cuando los puertos luchan por alcanzar un crecimiento a largo tiempo, e inclusive cuando éstos se ven en necesidad de trabajar por encima del 75% de la capacidad normal y al tiempo enfrentan aumentos inesperados de demandas de corto tiempo o fluctuaciones a causa de temporadas.

Sin embargo, la producción esbelta es solo buena entre procesos sobre los cuales se tiene control. Por ende, en los puertos, donde la incertidumbre es una condición permanente, la implementación de una producción esbelta es más compleja. Para aplicar esta incertidumbre, los operadores de puerto deben aplicar agilidad a sus operaciones. (Paixao y Bernard, 2003)

## 7. CONCLUSIONES

El mundo moderno presenta la característica de ser cada vez más exigente en cuanto a requerimientos de calidad y reducción de desperdicios en los procesos. La industria minera no se escapa de esta ley universal, por lo cual se ve obligada a la optimización de sus operaciones, donde la actividad de transporte juega un papel fundamental.

La logística esbelta es aquella que permite disminuir los desperdicios de tiempo, materiales y procesos y obtener las condiciones de máxima utilización de los recursos de las empresas.

El transporte de materiales y productos terminado constituye un peso importante en el precio final del mismo, por ende realizar procesos de transporte implicando logística esbelta se convierte en una actividad fundamental para todas las empresas que deseen ser exitosas.

Algunos de los principales problemas que genera la minería en lo referente a las redes de transporte son en este momento:

- La mayoría de las minas no tienen una exploración sistemática y estructurada por lo cual no poseen conocimientos exactos de las características del yacimiento, teniendo como consecuencia directa la mala planeación y desarrollo de la explotación, trayendo consigo una alta pérdida de mineral, es decir se carece de métodos de transporte logísticos esbeltos.
- La entibación de los túneles no son diseñadas bajo ninguna norma, sosteniendo la mina con tacos y puertas mal estructuradas. Lo cual hace de sus redes de transporte internas una operación con altos riesgos, compleja e ineficiente.
- Las actividades de arranque y transporte se realizan manualmente sin ninguna tecnología asociada aumentando el riesgo de accidentalidad y generando ineficiencia en los procesos. Complementariamente a la actividad, se utiliza en muchas ocasiones pólvora y explosivos los cuales generan diferentes gases nocivos para la salud colocando en riesgo la misma vida de los mineros.
- No existe un correcto tratamiento de los residuos o sedimentos (material estéril), provocando un impacto ambiental negativo al afectar el ecosistema como por ejemplo en los ríos y quebradas.
- Los trabajadores no poseen o utilizan los elementos de seguridad como tapa bocas, tapa oídos, correctores de postura, gafas, guantes, entre otros, colocando en riesgo la salud del trabajador al estar expuesto a una gran cantidad de ruido, vibraciones, polvo y gases, entre otros elementos que se generan en la actividad no controlada u desorganizada.
- La infraestructura y maquinaria con la cual opera normalmente para el transporte se suministro y materiales son entables viejos y adaptados con operaciones locales de baja calidad y sin sustentos ingenieriles, provocando un riesgo en la operación para los operarios y paros permanente que afectan la productividad, además la organización no tiene como elemento fundamental el mantenimiento de su maquinaria.
- Los residuos o colas que se generan después de los procesos de trituración, molienda y amalgamación contienen grandes cantidades de oro, en muchos casos son tratados como residuos inoficiosos y dejados en cualquier parte o son vertidos a ríos. Con la ineficiencia y no control de los procesos se calcula que se recupera entre el 40% y 60% del oro en el material tratado.
- El proceso de amalgamación, fundición y refinación se producen emisiones de mercurio en forma elemental, por derrames debidos a la mala manipulación en el almacenamiento y transporte, y de vapor, principal mente por la quema y fundición que realizan a cielo abierto produciendo emisiones atmosférica de vapor.

La mayoría de las empresas no conocen sus capacidades, ni se interesan lo suficiente por mejorar sus viejos métodos de trabajo y desarrollo logístico, siendo reacios a las nuevas tecnologías que en el mundo se utilizan, lo cual tienen que cambiar si se quiere desarrollar una industria competitiva a nivel mundial. Las empresas mineras tienen que ser más productivas y eficientes y el aumento de la productividad tiene que llegar acompañado de tecnología.

## BIBLIOGRAFÍA

- Anaya, J.A., 2000. Logística integral. La gestión operativa de la empresa. Editorial ESIC, Madrid.
- Ballou, R. H., 2004. Business Logistics/ Supply Chain Management. Planning, Organizing, and controlling the supply chain. Fifth Edition. Prentice Hall.
- Bask, A.H., 2001. Relationships among TPL providers and members of the supply chains - a strategic perspective. The Journal of Business & Industrial Marketing, Vol. 16 Nos 6/7, pp. 470-86.
- Boughton, R.F., 2003. Addressing the escalating cost of road transport. Logistics and Transport Focus, Vol. 5 No. 3, pp. 36-43.
- Bremel, J., and Simchi-levi, D., 1997. The Logic of Logistics: theory, algorithms, and applications for logistics management. Springer- Verlag New York, Inc.
- Cárdenas, M. y Reina, M., 2008. La minería en Colombia: Impacto socioeconómico y fiscal. Fedesarrollo. Numero 25. 22 P.
- CEPAL., 2008. Naciones Unidas (coordinación José Luis Machinea, con la colaboración de Juan Martín y Mario Cimoli), La transformación productiva 20 años después. Viejos problemas, nuevas oportunidades. C/G.2367(SES.32/3) Mayo de 2008. 345 pp. <http://www.eclac.cl/cgi-bin/getprod.asp?xml=/publicaciones/xml/7/33277/P33277.xml&xsl=/ps32/tpl/p9f.xsl&base=/ps32/tpl/top-bottom.xsl> (Última visita: Junio de 2009).
- Chuah, K.H., 2000. About lean manufacturing. The University of Kentucky College of Engineering, Lexington, KY, available at [www.engr.uky.edu/me/cfpl/lm/students/keng.html](http://www.engr.uky.edu/me/cfpl/lm/students/keng.html), (accessed 2 June 2000)
- Cordeau, J. F., Laporte, G. et al. 2004. Transportation on Demand.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, Pagina Web: [www.dane.gov.co](http://www.dane.gov.co) (Última visita: Junio de 2009).
- Gobernación de Antioquia, s.a. La minería como generador del desarrollo de las regiones y del país. Capacitación para alcaldes. [http://www.gobant.gov.co/organismos/scompetividad/temasmineros\\_capacitacion/encuentro.htm](http://www.gobant.gov.co/organismos/scompetividad/temasmineros_capacitacion/encuentro.htm). (Última visita: Junio de 2009).
- Goldsby, T. and Martichenko, R., 2005. Lean Six Sigma Logistics: Strategic Development To Operational Success. J. Ross Publishing, Inc.
- Hill, T., 1985. Manufacturing Strategy, Macmillan, Basingstoke.
- <http://www.ltdmngmt.com/mag/understanding-lean-logistics.htm>. World Wide Shipping, [www.ltdmngmt.com](http://www.ltdmngmt.com). (Última visita: Junio de 2009).
- Lee, S.S., 2000. Lean manufacturing. The University of Kentucky College of Engineering, Lexington, KY, available at [www.engr.uky.edu/me/cfpl/lm/students/lee.html](http://www.engr.uky.edu/me/cfpl/lm/students/lee.html) (accessed 2 June 2000)
- Martichenko, R., s.a. Lean Logistics-Understanding. Lean Cor. <http://www.ltdmngmt.com/mag/understanding-lean-logistics.htm>. World Wide Shipping, [www.ltdmngmt.com](http://www.ltdmngmt.com). (Última visita: Junio de 2009)
- MESA SECTORIAL DE MINERÍA, 2003. Caracterización ocupacional del sector minero. Bogota: SENA, 193 P.
- Mohamed, M., Naim, A.T., Potter, R., Mason, J. and Bateman, N., 2006. The role of transport flexibility in logistics provision. The International Journal of Logistics Management Vol. 17 No. 3, pp. 297-311
- Montemanni, et al., s.a. A new algorithm for a Dynamic Vehicle Routing Problem based on Ant Colony system. Istituto Dalle Molle di Studi sull'Intelligenza Artificiale. (IDSIA). ZUIZA.
- Ohnell, S. and Woxenius, J., 2003. An industry analysis of express freight from a European railway perspective. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management Vol. 33 No. 8, pp. 735-751

- Paixao, A.C. and Bernard, M. A., 2003. Fourth generation ports - a question of agility? *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* Vol. 33 No. 4, pp. 355-376.
- Robuste, A.F., 2005. *E-logistics*. Editorial UPC. Barcelona.
- Sanchez, R.V., 2008. Establishing a transport operation focused uncertainty model for the supply chain. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* Vol. 38 No. 5, pp. 388-411
- Slack, N., 1990. *The Manufacturing Advantage*, Mercury, London.
- Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2007. Plan nacional desarrollo minero 2007-2010. Gestión pública para propiciar la actividad minera. Editorial Scripto Ltda. <http://www.imcportal.com/galeria/PNDM-2007-2010.pdf> (Última visita: Junio de 2009).
- UPME, 2002. Plan Nacional de Desarrollo Minero 2002-2006. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). <http://www.upme.gov.co/>
- Womack, J.P., Jones, D.T. and Roos, D., 1990. *The Machine that Changed the World*, Rawson, New York, NY.