



**INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
UNIVERSIDAD DE CHILE



# **CÁTEDRA DE LOGÍSTICA Y PLANIFICACIÓN MINERA**

Reporte Anual de Actividades  
Abril 2008 – Marzo 2009

## Objetivos de la Cátedra

La Cátedra de Logística y Planificación Minera, radicada en el Departamento de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y financiada por CODELCO, tiene por objetivo central mantener una relación de largo plazo en el campo de la investigación aumentando y fortaleciendo la capacidad científica y tecnológica en estos dos temas. La Cátedra busca crear conocimiento y consolidar grupos de investigación a nivel mundial donde participen académicos y profesionales de CODELCO.

### **Directores de la Cátedra de Logística y Planificación Minera CODELCO-Ingeniería Industrial**



**Rafael Epstein**  
Académico Departamento  
Ingeniería Industrial



**Andrés Weintraub**  
Académico Departamento  
Ingeniería Industrial

Creemos que parte importante del valor de la cátedra radica en la construcción de una red de investigación en que colaboremos con los investigadores de más alto nivel mundial en esta área. Esto permitirá que nuestros investigadores y los profesionales de CODELCO estén en la vanguardia del desarrollo de las herramientas de frontera en este tema y que nuestro grupo, junto con los investigadores de la cátedra del Departamento de Ingeniería de Minas, forme parte del desarrollo de estos sistemas de frontera haciéndolos exportables. Una posición de liderazgo en esta red de investigación permite intercambiar desarrollos de punta e influir en cómo se desarrolla esta disciplina.

Entre los objetivos específicos, destacan :

- Incentivar la formación de post-grado para que CODELCO se beneficie de una investigación del más alto nivel en logística y planificación minera.
- Establecer una cooperación de largo plazo entre la Universidad y CODELCO en temas de mutuo beneficio.
- Fortalecer los equipos humanos y profesionales que se dedican a los temas de logística y planificación en el Departamento de Ingeniería Industrial.

# **Resumen del Programa de Trabajo Ejecutado**

Abril 2008 – Marzo 2009

---

## Captación de Buenos Alumnos Memoristas y Tesistas en Temas de Gestión Minera

Durante este período un total de ocho alumnos, tanto de pregrado de Ingeniería Civil Industrial como de programas de Magíster, desarrollaron o desarrollan sus memorias y/o tesis en temas relacionados con logística y planificación minera. Estos pertenecen a un selecto grupo de estudiantes de destacado rendimiento, quienes realizan sus investigaciones en forma sobresaliente.

Estos temas de tesis y memorias se abocan a expandir el conocimiento, a mejorar las prácticas de gestión en la industria minera y a divulgar los resultados importantes obtenidos, a través de publicaciones científicas y aplicaciones.

- Tema: *“Modelo de Planificación Minera Estocástica”*  
Descripción: A un modelo previo de planificación minera en versión determinística incorpora la incertidumbre del precio del mineral, mediante la consideración de escenarios probabilísticos. La resolución considera un enfoque de programación estocástica.  
Alumno: Luis Felipe Carvallo  
Profesor guía: Andrés Weintraub  
Programa de estudios: Magíster en Gestión de Operaciones
- Tema: *“Heurística de Redondeo para un Problema de Programación Entera Mixta de Planificación Minera de Largo Plazo”*  
Descripción: Construye soluciones para un problema de planificación minera, mediante aproximaciones iterativas en un tiempo razonable, considerando diversos enfoques heurísticos. La metodología es testeada en minas a cielo abierto.  
Alumno: Felipe Castro  
Profesor guía: Rafael Epstein  
Programa de estudios: Magíster en Gestión de Operaciones / Ingeniería Civil Industrial
- Tema: *“Aplicación de una Heurística Escalable para Resolver un Problema Minero de Programación Estocástica”*  
Descripción: Propone una metodología de aproximación para resolver el problema de planificación considerando la volatilidad del precio del mineral. El enfoque busca ser escalable a instancias

Mediante las memorias y tesis en curso, correspondientes a programas de pregrado y Magíster, hemos avanzado en dos líneas de investigación principales: la consideración de la aleatoriedad del valor del mineral en el cálculo del valor de los proyectos de planificación, por medio de técnicas de opciones reales y de programación estocástica, y la construcción de un modelo predictivo de los costos logísticos de extracción y procesamiento en función de las leyes, precios importantes del proceso productivo y otras características de los yacimientos.

de gran tamaño.

Alumno: Jaime Gacitúa

Profesor guía: Rafael Epstein

Programa de estudios: Magíster en Gestión de Operaciones / Ingeniería Civil Industrial

- Tema: *“Metodología de Análisis del Consumo de Energía en Planificación de los Procesos Metalúrgicos del Cobre”*

Descripción: Analiza la interacción de elementos económicos y químicos en diversos procesos de la planificación minera, con el fin de explicar las implicancias mutuas de los cambios que experimentan las distintas variables.

Alumna: Alejandra Parra

Profesor guía: Rafael Epstein

Programa de estudios: Magíster en Gestión de Operaciones / Ingeniería Civil Química

- Tema: *“Descripción Logística de los Procesos de Extracción, Chancado y Molienda en Minería a Rajo Abierto”*

Descripción: Aplica elementos de Logística para explicar técnicamente procesos productivos en un contexto de minería a cielo abierto.

Alumna: Mariana Rojas

Profesor guía: Rafael Epstein

Programa de estudios: Ingeniería Civil Industrial

- Tema: *“Desarrollo de un Algoritmo para el Diseño de Redes con Aplicaciones Industriales”*

Descripción: Dado un conjunto de nodos que define un árbol de Steiner, diseña un algoritmo para encontrar los arcos que conectan la red a costo mínimo. Este problema tiene diversas aplicaciones en el área de planificación minera.

Alumna: Marcela San Martín

Profesor guía: Rafael Epstein

Programa de estudios: Ingeniería Civil Industrial.

- Tema: *“Estrategia de Desarrollo Comercial para Sistema de Apoyo a la Planificación Minera”*

Descripción: Esta tesis, ya finalizada, recopiló antecedentes sobre la industria del cobre y la industria de herramientas para la planificación minera. En ella se analizan las posibilidades de posicionar al

sistema MUCH como una herramienta líder en el mundo para la optimización y evaluación económica de la planificación minera de largo plazo.

Alumno: Rodolfo Urrutia

Profesor guía: Antonio Holgado; Profesor co-guía: Rafael Epstein

Programa de estudios: Magíster en Gestión para la Globalización

- Tema: *“Simplificación de un Modelo de Planificación Minera con Agregación a Priori y a Posteriori para Codelco”*

Descripción: Este trabajo finalizó con un modelo que captura gran parte del modelo original de planificación minera, pero a un nivel agregado tal que facilita su resolución y la incorporación de elementos adicionales como, por ejemplo, la volatilidad de las variables.

Alumno: Ricardo Vega

Profesor guía: Andrés Weintraub

Programa de estudios: Ingeniería Civil Industrial

## Lanzamiento del Centro de Investigación de Operaciones para la Industria Minera

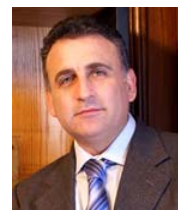
El 14 de enero de 2009, los Departamentos de Ingeniería Industrial y de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile inauguraron el Centro de Investigación de Operaciones para la Industria Minera. El origen de este centro se remonta a 2006, cuando Codelco comenzó a financiar esta cátedra de Logística y Planificación Minera.

El centro se propone generar nuevo conocimiento en el área de operaciones que permita hacer más competitiva a la industria minera nacional, además de transformarse en un referente de excelencia a nivel nacional e internacional en este ámbito. Desde esta perspectiva pretende contribuir a aumentar la competitividad de la industria nacional, junto con mejorar la calidad de la investigación aplicada que se realiza en Chile. Además, fomentará la generación de una red de colaboración nacional e internacional de académicos que tengan interés en participar en proyectos de investigación operativa aplicada a la industria minera.

Esta nueva institución será codirigida por Rafael Epstein y Enrique Rubio, académicos de los Departamentos de Ingeniería Industrial y de Minas, respectivamente, y contará con un Directorio conformado por sus co-directores, además de Andrés Weintraub, Director del Instituto Milenio Sistemas Complejos de Ingeniería; Juan Enrique Morales, Vicepresidente Corporativo de Desarrollo de Codelco; Osvaldo Urzúa, Gerente del Cluster Minero de BHP Billiton, y José Herrera Chavarría, Secretario Ejecutivo del Cluster Minero de Corfo.

El esfuerzo conjunto de dos departamentos de ingeniería de nuestra Facultad apunta a apoyar a la industria minera que hoy se enfrenta a desafíos relacionados con la utilización de sus recursos -humanos, energéticos, financieros y minerales- en el desarrollo de proyectos que atiendan los objetivos estratégicos de las diferentes empresas que componen el rubro. En particular, algunos de los temas de investigación que el centro abordará son: el diseño de minas, la planificación de la producción, la optimización de la cadena de suministros, el uso de recursos naturales y energéticos en minería, la

### Directorio del Centro



Rafael Epstein



Enrique Rubio



Andrés Weintraub



Juan Enrique Morales



Osvaldo Urzúa



José Herrera Chavarría

evaluación de proyectos ante incertidumbre y la construcción de modelos y algoritmos para los múltiples problemas asociados a la actividad minera.

Además de Rafael Epstein y Andrés Weintraub, otros académicos de Ingeniería Industrial que contribuirán al quehacer del nuevo Centro de Investigación de Operaciones para la Industria Minera son:



**René Caldentey**

Ph.D. en Gestión de Operaciones, MIT.

**Área de investigación:**

Modelos estocásticos.



**Felipe Caro**

Ph.D. en Gestión de Operaciones, MIT.

**Área de Investigación:**

Planificación minera.



**Eduardo Contreras**

Doctor en Ciencias Empresariales, U. Autónoma de Madrid.

**Área de Investigación:**

Finanzas y Evaluación de Proyectos.



**José Miguel Cruz**

Ph.D. en Ingeniería Económica y Gestión Financiera, Stanford University.

**Área de Investigación:**

Finanzas y Administración de Riesgos.



**Viviana Fernández**

Ph.D. en Economía, University of California.

**Área de Investigación:**

Econometría y Finanzas.



**Marcel Goic**

Ph.D. (c) en Marketing, Carnegie Mellon University.

**Área de Investigación:**

Planificación minera.



**Juan Velásquez**

Ph.D. en Ingeniería de la Información, University of Tokyo.

**Área de Investigación:**

TI y Minería de Datos.





Lanzamiento del Centro de Investigación de Operaciones para la Industria Minera, 14 de enero de 2009



## Organización del Workshop on Operations Research in Mining (ORM), Viña del Mar

En un esfuerzo conjunto, los Departamentos de Ingeniería Industrial y de Minas de la Universidad de Chile, el Instituto Milenio sistemas Complejos de Ingeniería y Codelco organizaron este importante evento que congregó a especialistas de nivel mundial en el desarrollo de temas de investigación operativa en minería.

El workshop reunió la presentación de 33 trabajos, realizados por 78 autores, y contó con la asistencia de cerca de 120 personas del mundo académico, estudiantil y empresarial. El propósito de este encuentro, además de analizar y difundir los trabajos en la frontera del conocimiento actual en el área, fue discutir sobre el estado del arte en la modelación de problemas mineros y el desarrollo de redes de investigación a nivel nacional e internacional.

Este workshop se realizó entre el 10 y el 12 de diciembre de 2008. Su programa incluyó sesiones de exposiciones y un panel de discusión durante los dos primeros días, y un mini-curso el tercer día. Algunos de los temas abordados fueron: planificación minera, programación de operaciones, incertidumbre y riesgo, operaciones en minería de rajo, operaciones en minería subterránea y transición óptima de minería de rajo a subterránea.

### Investigadores Destacados

- Alexandra Newman, Colorado School of Mines. Destacada investigadora con larga trayectoria en temas de planificación minera. Además de participar como expositora en el workshop, colaboró en investigaciones junto a académicos del Departamento de Ingeniería Industrial, así como también con Enrique Rubio, investigador del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile.
- Marcus Brazil y Doreen Thomas, University of Melbourne. Presentaron metodologías para abordar el problema de diseño del acceso a minas subterráneas, mediante técnicas de optimización combinatorial y geométrica.
- Michael Samis, Ernst and Young. Dictó un mini-curso sobre el uso del descuento dinámico de flujos y de las opciones reales para evaluar, gestionar y diseñar proyectos mineros y petrolíferos.



Alexandra Newman



Doreen Thomas



Michael Samis

Actividades del Workshop on  
Operations Research in Mining,  
diciembre de 2008



## Presentación de Trabajos en Congresos de Carácter Nacional e Internacional

La difusión en conferencias y congresos especializados es un elemento fundamental en el posicionamiento de nuestra investigación de logística y planificación minera. Durante este período, varios trabajos de nuestros académicos y estudiantes fueron presentados en importantes congresos nacionales e internacionales.

- **CORS/Optimization Days 2008 joint conference, Quebec City, Canadá (Mayo 2008)**

Session Applications of Operations Research in the Mining Industry I:

*“Cluster Analysis Based Aggregation of Mine Planning Models”*

Andrés Weintraub, Marianela Pereira y Ximena Schultz (Ingeniería Industrial, Universidad de Chile).

- **INFORMS, Annual Meeting, Washington D.C., Estados Unidos (Octubre 2008)**

Este es el congreso más grande en Gestión e Investigación de Operaciones. Su edición 2008 consideró una sesión especial de aplicaciones en la industria minera titulada “Applications of Operations Research in the Mining Industry”, en la que participamos con dos exposiciones:

*“Scheduling the Excavation of an Open Pit Mine: An Integer Programming Approach”*

Daniel Espinoza (Ingeniería Industrial, U. de Chile), Enrique Rubio (Departamento de Ingeniería de Minas, U. de Chile), Marcos Goycolea y Eduardo Moreno (U. Adolfo Ibáñez).

*“Cluster Analysis Based Aggregation in Mine Planning Models”*

Andrés Weintraub, Marianela Pereira, Ximena Schultz y Ricardo Vega (Ingeniería Industrial, U. de Chile) y Andreas Bley (Zuse Institute Berlin).

- **Workshop on Operations Research in Mining, Viña del Mar, Chile (Diciembre 2008)**

*“Long-term Optimization of Investment & Production Plans in Open Pit & Underground Copper Mines”*

Rafael Epstein, Felipe Caro, Jaime Catalán, Marcel Goic, Pablo Santibáñez y Andrés Weintraub (Ingeniería Industrial, U. de Chile); Felipe Azócar, Julio Castillo, Sergio Gaete y Hernán Menares (Codelco).

*“Cluster Analysis Based Aggregation in Mine Planning Models”*

Andrés Weintraub, Marianela Pereira, Ximena Schultz y Ricardo Vega (Ingeniería Industrial, U. de Chile) y Andreas Bley (Zuse Institute Berlin).

*“An Integrated Open Pit – Underground Mining Planning Approach”*

Rafael Epstein y Felipe Castro (Ingeniería Industrial, U. de Chile); Augusto Aguayo y David Novoa (Codelco).

- **Seminario Aportes de la Universidad de Chile al Desarrollo de la Minería en el País, Santiago, Chile (Marzo 2009)**

*“Metodologías para evaluar inversiones en proyectos mineros de cobre de largo plazo”*

Rafael Epstein (Ingeniería Industrial, U. de Chile).



## Otras actividades de carácter internacional

- **13th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems (KES), Santiago, Chile (Septiembre 2009)**

Hemos concertado el apoyo a la organización del KES 2009, a materializarse con el aporte de 2.5 millones de pesos. Uno de los organizadores del congreso será Juan Velásquez, académico recientemente incorporado a la Cátedra. El congreso se efectuará en Santiago, entre el 28 y el 30 de septiembre de 2009, y, entre otros temas, tratará sobre: sistemas cognitivos, redes neuronales, algoritmos genéticos, control industrial y series de tiempo.

- **Internacionalización del sistema MUCH**

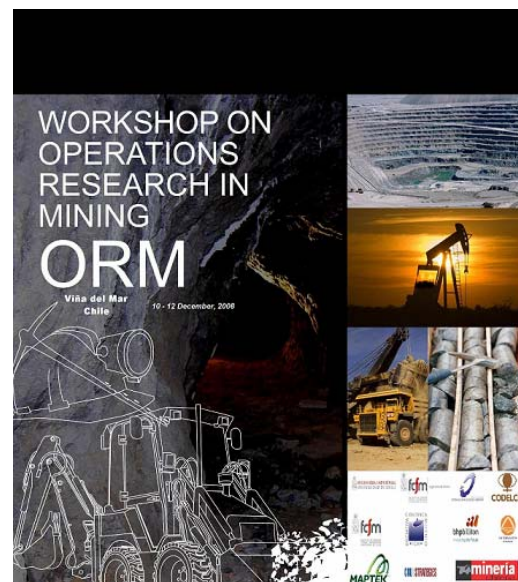
Hemos comenzado el estudio de un plan para internacionalizar el sistema de planificación minera MUCH, desarrollado en conjunto con Codelco. Mediante la recopilación de antecedentes sobre las industrias del cobre y de herramientas para la planificación minera, hemos analizado las alternativas de posicionar al MUCH como una herramienta líder en el mundo para la optimización y evaluación económica de la planificación minera de largo plazo.

## Publicaciones

- **“Workshop on Operations Research in Mining”**

Editores: Mauricio Larrain, Rafael Epstein, Mario Guajardo, Enrique Rubio, Andrés Weintraub y Carolina Calderón.

Este libro compila todos los trabajos presentados en el Workshop on Operations Research in Mining, realizado en diciembre de 2008 en Viña del Mar. La edición del libro incluye, además de las presentaciones, una clasificación temática y otra por autor. Esperamos distribuir ejemplares de esta edición a cada una de las instituciones que apoyaron la realización del congreso.



## Incorporación de Temas de Gestión de Operaciones Mineras en el Programa de Magíster en Gestión de Operaciones y en el Programa de Pregrado de Ingeniería Civil Industrial

La formación de equipos de investigación en temas de logística y planificación minera requieren motivar a los estudiantes en distintas etapas de su crecimiento profesional. Así, consideramos necesario introducir diversas actividades que permitan enfrentar a los estudiantes con los problemas y desafíos que presenta la logística y el proceso de planificación minera.

- **Material de los cursos**

Con el fin de difundir temas de planificación y logística minera, estamos incorporando problemas de minería en cursos de pregrado y posgrado impartidos por Ingeniería Industrial.

Para el curso de Optimización (IN3701) preparamos una tarea en base a elementos introductorios de la planificación de la extracción de una mina de rajo abierto, considerando restricciones como la capacidad de procesamiento y las relaciones de precedencia. Esta tarea ha sido incorporada como una de las actividades evaluativas que los estudiantes deberán resolver en el año académico 2009.

Cabe destacar que este curso de Optimización es obligatorio en la malla de ramos de la carrera de Ingeniería Civil Industrial y también de otras especialidades como Química, Biotecnología y Minas, por lo tanto, existe un alto número de alumnos expuestos a estos contenidos.

Para el curso de Logística y Producción (IN70L), obligatorio para el Magíster en Gestión de Operaciones, también preparamos una tarea con elementos más avanzados que busca que los alumnos diseñen metodologías de resolución utilizando heurísticas, con el fin de proponer una solución a un problema a escala cercana a la realidad. Se proyecta utilizar éste o un problema similar en la competencia "GOCUP", iniciativa que promueve que jóvenes de Enseñanza Media, Educación Superior y del ámbito profesional se entusiasmen con temas de ingeniería.

- **Difusión de Codelco en el alumnado**

Con motivo de la XI Feria Empresarial, organizada por alumnos de la Facultad, ayudamos a gestionar la presencia de Codelco con un *stand* de difusión. Esta feria se ha transformado en una instancia especial para difundir el quehacer de la compañía entre los futuros ingenieros y los alumnos de posgrado, así como también para captar estudiantes en busca de prácticas de verano mediante entrevistas laborales.

## Proyectos de Investigación

### **Término del proyecto FONDEF D03I1064: "Metodología para evaluar inversiones en proyectos mineros de cobre de largo plazo"**

Director: Rafael Epstein

En abril de 2008 concluyeron las actividades de este proyecto, iniciado en 2005. En su desarrollo conseguimos mejorar la calidad de la planificación y evaluación de proyectos mineros, mediante la consideración de la interacción de múltiples proyectos y del factor dinámico del tiempo. Además, estudiamos la volatilidad del precio del cobre, desarrollamos modelos de opciones reales que incorporan flexibilidades importantes a la evaluación de proyectos mineros y fijamos directrices para considerar esta aleatoriedad en los problemas de optimización combinatorial de la planificación.

---

### **Nuevo proyecto ganado en concurso FONDEF D07I1130: "Metodologías para evaluar planes mineros de cobre de largo plazo con incertidumbre en precios y leyes de mineral"**

Director: Rafael Epstein

En este proyecto estudiaremos en profundidad las metodologías de planificación de las operaciones e inversiones mineras de largo plazo para mejorar la calidad de las herramientas técnicas que actualmente se utilizan en la planificación y evaluación de proyectos de inversión, así como en operaciones minero-metalúrgicas.

Parte importante de este proyecto se centrará en el análisis y el desarrollo de una metodología para evaluar y optimizar planes de negocio y proyectos mineros para la gran minería del cobre, considerando explícitamente la aleatoriedad del precio del cobre y de las leyes de mineral.

---

### **Instituto Milenio: Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI)**

Director: Andrés Weintraub

Los Institutos Milenios son un apoyo de gran envergadura a la investigación en Chile. El ISCI nació a partir de una iniciativa de integración de académicos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, liderado por el Departamento de Ingeniería Industrial. Además, se han incorporado investigadores de otras universidades como la PUC, Santiago y los Andes. Entre los temas de ingeniería que desarrolla el Instituto se encuentran la logística y la planificación minera, con énfasis en la aplicación de los desarrollos científicos del área en problemas del mundo real.

En marzo de 2009, el ISCI fue elegido como uno de los cinco centros ganadores del segundo concurso del Programa de Financiamiento Basal de CONICYT, lo que contribuirá a financiar la investigación que el Instituto desarrolla en ingeniería y tecnología durante los próximos cinco años.

---

## **Proyecto con la VCP: Optimización de la planificación en MMH**

Director: Rafael Epstein

Entre enero y marzo de 2009 desarrollamos un proyecto en conjunto con la Vicepresidencia Corporativa de Codelco, con el objetivo de analizar la aplicabilidad del sistema MUCH en la Mina Ministro Hales (MMH). En el marco de este proyecto, evaluamos la planificación de largo plazo de esta mina, mediante técnicas de optimización, y realizamos un detallado análisis de sensibilidad. El equipo de investigación incluyó profesionales tanto de Codelco como de Ingeniería Industrial, encabezados por Julio Beniscelli y Rafael Epstein, respectivamente.

---