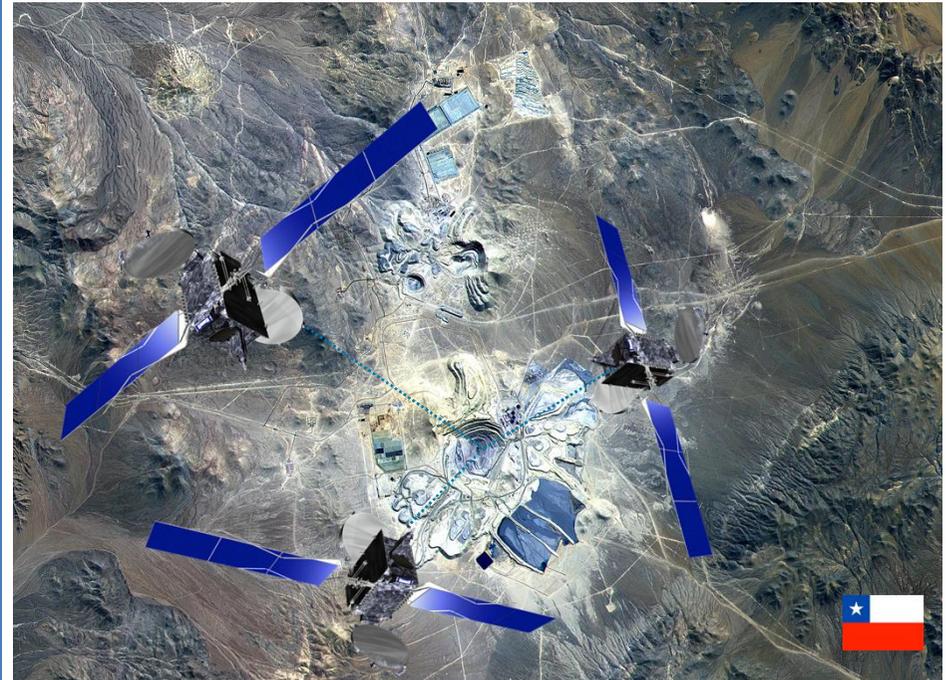


# Sistema de optimización de Transporte para la Mediana Minería.

Expositor: Eduardo Cornejo  
4DIGITAL Founder



*Don't lose the north of your mining operations*

## Un poco de historia



### En memoria de un grande

#### Richard Ernest Bellman (1920–1984)

Fue un matemático aplicado, cuya mayor contribución fue la metodología denominada programación dinámica.

Bellman estudió matemática en la Universidad de Brooklyn, donde obtuvo una diplomatura, y luego en la Universidad de Wisconsin, su licenciatura.

Posteriormente comenzó a trabajar en el Laboratorio Nacional Los Álamos en el campo de la física teórica. En 1946 obtuvo su doctorado en la Universidad de Princeton. También ejerció la docencia en la universidad del sur de California (EE. UU.), fue socio de la Academia Americana de las Artes y las Ciencias (1975) y de la Academia Nacional Americana de Ingeniería (1977).



En 1979 el IEEE le otorgó la medalla de honor por su contribución a la teoría de los sistemas de control y de los procesos de decisión, en especial por su contribución con la programación dinámica y por la ecuación de Bellman.

# La problemática



## Como optimizar la producción evitando:

- “ Operadores siguiendo instrucciones verbales de supervisores sin verificar la orden con el despacho.
- “ Operadores de palas y chancado no alertan sobre interrupciones en el proceso.
- “ Conductores de camiones detenidos cuando se espera estén viajando.
- “ Conductores de camiones arribando a carga o dumping en locaciones erróneas.
- “ Conductores utilizando rutas que no son las optimas o las mas cortas.



Y todo respetando las restricciones...

## Elementos del problema

Topografía de la mina y el perfil de red de caminos  
Sitios de descarga y capacidades  
Información de Calidad del material y ley  
Restricciones de equipos mina

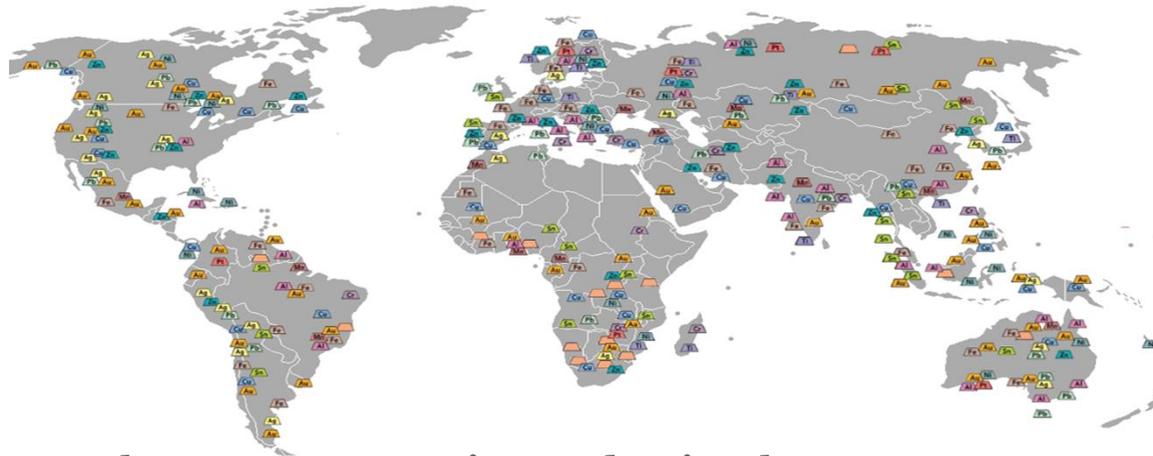
La información es utilizada por algoritmos que direccionan la optimización y como resultado entregan resultados de asignación optima de equipos mina.

# La Necesidad



## Mediana minería con Problemas de grande...

La mediana minería en Chile forma parte de un segmento que aporta más de 350.000 ton de cobre fino al año, se presume la existencia de varias operaciones que no cuentan con sistemas de optimización y manejo de flota. En el resto del mundo se presupuesta más de un centenar de operaciones en igual condición.



“ Radio controlador de carguío y transporte

V/S



“ Sistema automático.

## Problemas al no contar con un sistema de MineFleetMgmt

- “ Dilución - Cobre al botadero y lastre al Chancado.
- “ Elevado gasto en combustible.
- “ Camiones detenidos o en colas
- “ Reparaciones de maquinaria de alto costo.
- “ Operaciones de alto riesgo con operadores situados en los caminos.

# La Necesidad



## Lo logramos?

Vale, Rio Tinto, AMSA, BHP Billiton, Anglo American, Codelco y otras de las grandes hoy disponen de sistemas de Mine Fleet Management obteniendo ahorros millonarios en sus operaciones.



## Algunos features de los sistemas de MineFleetMgmt

- Asignación dinámica de camiones a palas y excavadoras.
- Abertura y cierre de botaderos. Abertura y cierre de caminos.
- Selección automática de ruta más corta y menos congestionada.
- Visibilidad de equipo minero y rendimiento del operador.
- Parámetros críticos de producción en tiempo real.

Despliegue mejorado de camión en ruta / grupos de rutas.Reducción de tiempos de espera de camión y palas.Incremento de la productividad.Notificación visual de cambios al conductor automática. Control de dilución.

# Optimización de carguío y transporte



## Tecnología de Mine Fleet Management

La operación de carguío y transporte puede representar hasta el 50% de los costos totales de explotación de una mina a cielo abierto y los ahorros generados por una mejora impacta directamente en un costo menor por tonelada de material transportado. 30 años atrás una firma norte americana conquista el mercado con el primer sistema de despacho y optimización de flota minera.



# Optimización de carguío y transporte



## Sistemas de Despacho Mina o Mine Fleet Management

En términos simples un sistema de optimización de transporte y carguío minero, es una herramienta de software y hardware que facilita el incremento de la productividad de la flota minera, la reducción de los costos operacionales, el consumo de combustible, la durabilidad de la maquinaria y su ciclo de vida.

A su vez, deberá permitir un control de calidad de mineral mejorada y el incremento en la seguridad minera.

Entre otras características un sistema de optimización y gestión de flota permite;

“El incremento de la productividad de la flota mediante la administración inteligente de la carga, minimización de tiempos muertos, reportes en tiempo real, planificación de la producción.

“Reducción de costos operacionales y de mantenimiento mediante alta precisión en el guiado de la maquinaria, el monitoreo de salud del equipamiento y monitoreo de la conducción de vehículos.

“Programación Lineal para optimizar la gran cantidad de información de parámetros de ruta y del vehículo. Así también para la selección automática de ruta más corta se utiliza poderosos algoritmos matemáticos.

# Tecnológicamente hablando

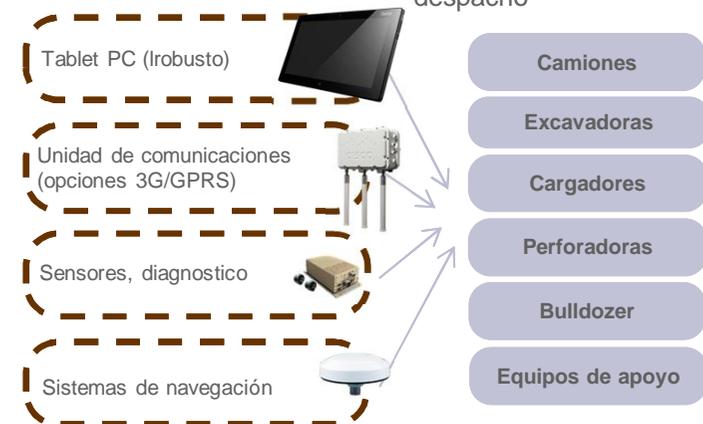
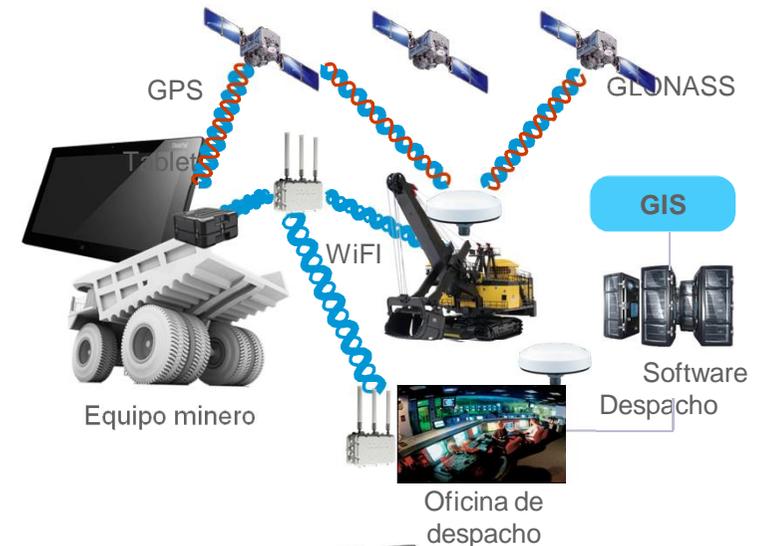


## La solución tecnológica consiste en:

- “ Un robusto Tablet PC de última generación y un GPS de baja precisión abordo de la maquinaria.
- “ Un sistema de transmisión inalámbrico desplegado en el rajo.
- “ Una capa de GPS de alta precisión para el guiado de la maquinaria y control de dilución en palas y perforadoras.
- “ Un servidor de gran performance.
- “ SOFTWARE de Mine Fleet Management desplegado en el servidor central y en cada terminal de equipo mina o apoyo.

## Características esenciales de un sistema de optimización de flota:

- “ Visualización
- “ Optimización
- “ Planificación
- “ Integración
- “ Administración
- “ Mantenimiento



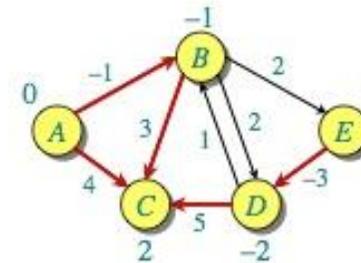
# Optimización



## Mecanismos de selección de ruta, programación lineal y aprendizaje

### La mejor ruta (BP)

El mejor camino donde existe el menor tiempo de trayecto entre dos puntos.



	A	B	C	D	E
0	∞	∞	∞	∞	∞
0	-1	∞	∞	∞	∞
0	-1	4	∞	∞	∞
0	-1	2	∞	∞	∞
0	-1	2	∞	1	1
0	-1	2	-2	1	1

### El plan maestro de flujo de material (LP)

Normalmente basado en técnicas de programación lineal (LP). Este paso produce el patrón de flujo de camiones vacíos y cargados, que maximiza la productividad general de la operación.

	$a^1$	$a^2$	...	$a^j$	...	$a^n$
$b^1$	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1j}$	...	$x_{1n}$
$b^2$	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2j}$	...	$x_{2n}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$b^i$	$x_{i1}$	$x_{i2}$	...	$x_{ij}$	...	$x_{in}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$b^m$	$x_{m1}$	$x_{m2}$	...	$x_{mj}$	...	$x_{mn}$

### Asignación de camiones (DP)

La pieza más relevante de la información e instrucciones de dónde ir para cada conductor de camión.

# Algoritmos de optimización



## Selección de ruta

El **algoritmo de Bellman-Ford (algoritmo de Bell-End-Ford)**, genera el camino más corto en un grafo dirigido ponderado ( en el que el peso de las aristas puede ser negativo).

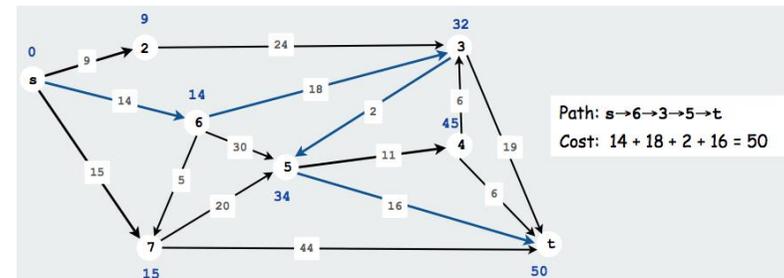
## Algoritmo Bellman - Ford

Dado un grafo dirigido  $G(V, E)$  con vértices ponderados  $w(u, v)$ , se define el peso del trayecto de una ruta  $p$  como:

$$w(p) = \sum_{i=1}^k w(v_{i-1}, v_i)$$

Para un vértice de origen  $s$ , encuentra la ruta de mínimo peso a cada vértice alcanzable desde  $s$  expresado como

$$\delta(s, v) = \begin{cases} \min \{ w(p) \mid s \rightarrow v \} \\ \infty \text{ otherwise} \end{cases}$$



# Algoritmos de optimización



## Programación lineal

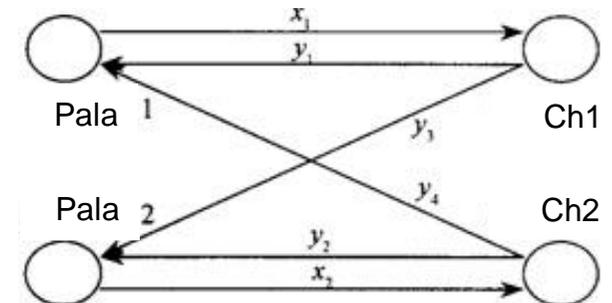
El Método Simplex publicado por George Dantzig en 1947 consiste en un algoritmo iterativo que secuencialmente a través de iteraciones se va aproximando al óptimo del problema de Programación Lineal en caso de existir este último.

La programación lineal crea un plan maestro para maximizar la productividad en la mina y entrega como resultado circuitos optimizados.

El método simplex es un procedimiento iterativo que progresivamente permite obtener una solución óptima para: determinar puntos de descarga, tipos de camiones y rates de alimentación.

La primera implementación computacional del Método Simplex es el año 1952 para un problema de 71 variables y 48 ecuaciones. Su resolución tarda 18 horas. Luego, en 1956, un código llamado RSLP1, implementado en un IBM con 4Kb en RAM, admitió la resolución de modelos con 255 restricciones.

### Variables



### Función objetivo

$$\text{Max } z = \sum_{i \in A} c_i x_i$$

Donde  $x_i$ , es el rate de flujo  $i$ th de camiones cargados en trayecto ( $x_i \geq 0$ ),  $c_i$  es el coeficiente de peso del trayecto  $i$ th ( $c_i > 0$ ),  $A$  es el conjunto de todos las rutas de camiones cargados en la mina.

### Restricciones

$$\sum_{i \in E_j} x_i \leq b_j \quad \text{Restricción de manejo de capacidad}$$

$$\left( \sum_{i \in E_j} x_i \right) H_{ij} \leq \left( \sum_{i \in E_j} x_i g_i \right) \leq \left( \sum_{i \in E_j} x_i \right) H_{uj}$$

Restricción grado mineral

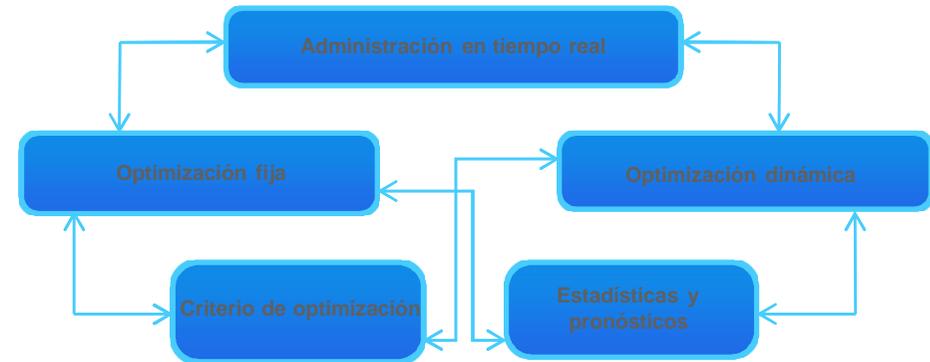
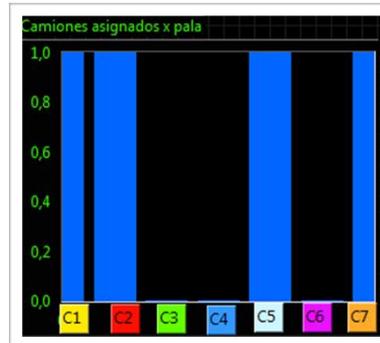
# Características de un sistema de optimización



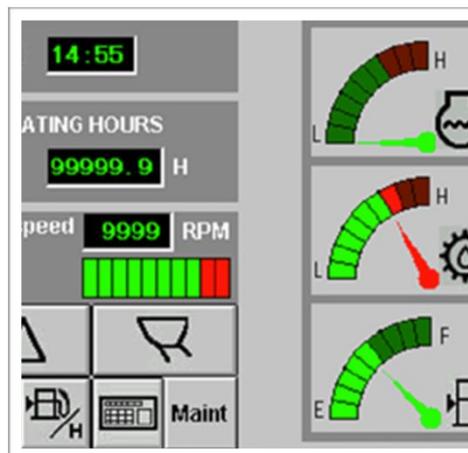
## Visualización



## Optimización



Monitoreo signos vitales en tiempo real



Manejo de colas



Control de dilución

# Una breve demostración

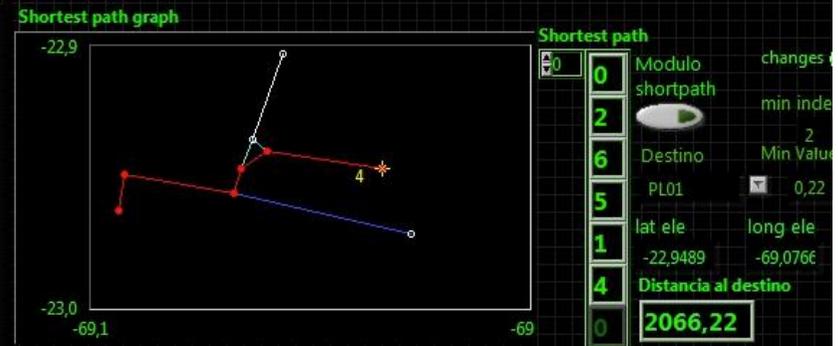


nodes

coordinates	lat	long
TK	-22,9512	-69,0920

TRUCK	lat	long
0	-70,5639	-33,4267
1	-69,0833	-22,9480
2	-69,0917	-22,9492
3	-69,0842	-22,9473
4	-69,0766	-22,9489
5	-69,0848	-22,9489
6	-69,0853	-22,9502



Weight table

	TRUCK	NR02	BT01	NR01	PL01	NR03	NR04	PL02	CH1
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
TRUCK	0	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
NR02	0	0,00	Inf	114,00	1060,00	179,00	Inf	Inf	Inf
BT01	Inf	Inf	0,00	Inf	Inf	Inf	670,00	Inf	Inf
NR01	Inf	114,00	Inf	0,00	Inf	187,00	Inf	Inf	638,00
PL01	Inf	1060,00	Inf	Inf	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf
NR03	Inf	179,00	Inf	187,00	Inf	0,00	157,00	Inf	Inf
NR04	Inf	Inf	670,00	Inf	Inf	157,00	0,00	3100,00	Inf
PL02	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	3100,00	0,00	Inf
CH1	Inf	Inf	Inf	638,00	Inf	Inf	Inf	Inf	0,00

Presentaciones:

# Í MedMinÎ



[www.medmin.cl](http://www.medmin.cl)