

PROYECTO DSIM OP:
Simulación de Operaciones Mineras a Cielo Abierto

Profesor: Dr. Fabián Manríquez L.

Profesor Auxiliar: Daniel Mariño G.

Integrantes: Jesus Mamani A., jmamaniagui@unsa.edu.pe
Javier Opazo, javopazo@alumnos.uai.cl
José Pizarro A., jose.pizarroa@sansano.usm.cl
Cristian Cartagena M., cristian.cartagena@unmsm.edu.pe
Paulina Contreras G., pcontrerasg@alumnosuls.cl

Parte A: Máxima productividad operativa por circuito productivo

1. La opción de despacho número 2 es la más conveniente, puesto que al completar el despacho base impuesto previamente, los camiones que aún quedan disponibles son asignados a la pala más cercana hasta satisfacer la segunda meta de despacho, aumentando con ello el rendimiento de dichos equipos.
2. La cantidad mínima de camiones que maximiza la productividad nominal en cada circuito productivo, fueron definidos al incrementar el número de camiones en cada frente (Ver Anexo 1). Los resultados determinísticos se muestran a continuación:

	Circuitos productivos			
	Circuito 1	Circuito 2	Circuito 3	Circuito 4
Equipo de carga	Pala_1	Pala_2	Pala_3	Pala_4
Frente de carga	FC_PO_A	FC_PO_B	FC_PO_C	FC_PO_D
Frente de descarga	FD_DumpNO	FD_CH_S	FD_CH_S	FD_DumpSO
Máxima productividad nominal (t/h)	4550	4503	4503	4562
N° de camiones	12	15	15	11

Tabla 1: Circuitos productivos

3. **b)** El número de camiones que satura el circuito, es decir que otorgan máxima productividad en cada circuito, varía en función de la distancia entre la pala y el frente de descarga indicado. Los resultados para el primer circuito son 12 camiones, para el segundo circuito 15 camiones, para el tercer circuito 15 camiones y finalmente para el cuarto circuito 11 camiones.

Por otra parte, las gráficas que responden a las preguntas a), c), d), e) y f) se encuentran en los Anexos 2, 3, 4, 5 y 6 respectivamente.

Parte B: Máxima productividad operativa de todos los circuitos productivos

1. La productividad máxima dada por la suma de los circuitos productivos aislados da un valor de 434.840 toneladas, con un total de 53 camiones. Utilizando la misma cantidad de camiones en el circuito conjunto, la productividad da un valor de 434.000 toneladas. Por lo que la productividad general varía en un 0.19%. Asimismo, la variación porcentual de la productividad en el Ciclo 1 y 2 es nula, en cambio el Ciclo 3 y 4 presentan una variación negativa de un 0,26% y 0,51% respectivamente. Estos valores se resumen en la tabla 2, presentada a continuación.

Circuito Productivo	Número de camiones	Circuito aislado		Circuitos en conjunto			
		Tonelaje	t/h	Tonelaje	t/h	Productividad máxima de cada circuito (%)	Variación de la productividad máxima de cada circuito (%)
Circuito 1	12	109200	4550	109200	4550	100,00%	0,00%
Circuito 2	15	108080	4503	108080	4503	100,00%	0,00%
Circuito 3	15	108080	4515	107800	4492	99,74%	0,26%
Circuito 4	11	109480	4562	108920	4538	99,49%	0,51%

Tabla 2: Tonelaje y Productividad en los distintos circuitos

En las tablas 3 y 4, presentadas a continuación, se indican la media de los tiempos de espera de un camión en cada frente de carga y descarga. Así también en la tabla 5 y 6 se presentan el factor de utilización de las palas y el factor de utilización promedio de la flota de camiones.

	Frente de carga			
	FC_PO_A	FC_PO_B	FC_PO_C	FC_PO_D
Media del tiempo de espera de un camión	5,7	7,1	7,9	5,9
	Frente de descarga			
	FD_DumpNO	FD_CH_S_B	FD_CH_S_C	FD_DumpSO
Media del tiempo de espera de un camión	5,7	6,4	6,4	5,9

Tabla 3: Media del tiempo de espera de un camión en cada frente de carga y descarga.

	Frente de carga			
	FC_PO_A	FC_PO_B	FC_PO_C	FC_PO_D
Factor de utilización de la pala (%)	99,4	99,0	98,8	98,7

Tabla 4: Factor de utilización de la pala en cada frente de carga

	Flota de camiones
Factor de utilización promedio (%)	100

Tabla 5: Factor de utilización promedio de la flota de camiones

2. Analizando la operación conjunta de los circuitos productivos, el número de camiones óptimos se corrige de 53 a 46. Dicha corrección se basa en la comparación de los tiempos de espera tanto de carga como descarga, así como en los factores de utilización de palas y camiones (ver Anexo 7). No obstante, la productividad neta es claramente menor que en la

suma de los cuatro frentes aislados, como se ve en la tabla 6. Ésta anomalía está presente en todas las simulaciones que se hagan, dado que nunca se alcanzará dicha productividad aislada, considerando que ahora se trabaja con circuitos que se interrelacionan espacialmente entre sí.

Circuito Productivo	Circuitos aislados	Circuitos conjuntos	Circuitos conjuntos
	53 Camiones	45 camiones	46 camiones
Circuito 1	109200	99680	106120
Circuito 2	108080	107800	107800
Circuito 3	108080	107520	108080
Circuito 4	108080	100240	105000
Total	433440	415240	427000

Tabla 6: Comparación del tonelaje en cada circuito, aislado y conjunto

Luego de analizar la Tabla 6, se llegó a la conclusión de que tanto la cantidad de 45 y 46 camiones, son favorables resultados. Entonces, para seleccionar el número óptimo de camiones, se procedió a revisar los resultados obtenidos de: la media de tiempo de espera de un camión tanto en un frente de carga como en descarga y el factor de utilización de las palas y de la flota de camiones. Dichos resultados se muestran en la Tabla 7.

N° Camiones	Toneladas	Tiempo espera frente carga camión (min)				Tiempo espera frente de descarga de camión (min)				Factor de utilización de la pala				Factor de utilización promedio de la flota de camiones
		FC_P O_A	FC_P O_B	FC_P O_C	FC_P O_D	FC_P O_A	FC_P O_B	FC_P O_C	FC_P O_D	Pala_1	Pala_2	Pala_3	Pala_4	
45	421680	0,36	1,25	2,35	1,05	0,35	1,24	2,35	1,05	95%	98%	98%	94%	100%
46	415240	0,46	1,21	3,48	1,40	0,45	1,20	3,25	1,37	97%	99%	99%	95%	100%

Tabla 7: Variables obtenidas de las simulaciones con 45 y 46 camiones

Finalmente, se concluye que la simulación de 46 camiones es óptima porque se ajustan más a los resultados obtenidos de las simulaciones de los circuitos aislados. Además, de aprovechar al máximo las palas, esto se puede corroborar con el Factor de Utilización obtenido de cada una de ellas.

N° Camiones	Toneladas	Tiempo espera frente carga camión (min)				Tiempo espera frente de descarga de camión (min)				Factor de utilización de la pala				Factor de utilización promedio de la flota de camiones
		FC_P O_A	FC_P O_B	FC_P O_C	FC_P O_D	FC_P O_A	FC_P O_B	FC_P O_C	FC_P O_D	Pala_1	Pala_2	Pala_3	Pala_4	
53	433440	5,707	7,054	7,918	5,941	5,707	6,395	6,405	5,939	99%	99%	99%	99%	100%
46	415240	0,46	1,21	3,48	1,40	0,45	1,20	3,25	1,37	97%	99%	99%	95%	100%

Tabla 8: Variables obtenidas de las simulaciones de los circuitos aislados vs simulación óptima de 46 camiones.

3. Previamente corregido el número de camiones, dada la operación conjunta de los cuatro circuitos productivos, se recrean las gráficas creadas en el ítem 1. Para mayor detalle, las gráficas de las preguntas a, b, c y d se encuentran en los Anexos 8, 9, 10 y 11 respectivamente.

Parte C: Máxima productividad nominal de todos los circuitos productivos

1. Para cada frente de descarga se comparan los resultados de productividad obtenidos en la parte B. Para los frentes FD_DumpNO y FD_DumpSO, la productividad nominal se reduce a un 53% y 57%, respectivamente, mientras que para la descarga en chancador, dependiendo del frente del cual proviene tendrá una reducción a un 62% y 63% respecto a la productividad vista en el frente B y C, respectivamente. El desglose de dichos porcentajes se encuentra en la siguiente tabla:

Frente de descarga	Sin fallas, colación y cambios		Con fallas, colación y cambios		
	Tonelaje (ton)	Productividad nominal (ton/h)	Tonelaje (ton)	Productividad nominal (ton/h)	Variación porcentual (%)
FD_DumpNO	106.120	4421,7	56.280	2345,0	53%
FD_DumpSO	105.000	4375	60.200	2508,3	57%
FD_CH_S (Frente B)	107.800	4491,7	66.360	2765,0	62%
FD_CH_S (Frente C)	108.080	4503,3	68.320	2846,7	63%

Tabla 9: Productividad nominal sin y con fallas de equipos, colación de personal y cambios de turnos.

2. Los resultados del cálculo de tiempos de espera en los frentes de carga y descarga, así como también los factores de utilización de palas y camiones se muestran a continuación en las siguientes tablas:

	Frente de carga			
	FC_PO_A	FC_PO_B	FC_PO_C	FC_PO_D
Media del tiempo de espera de un camión	1,8	7,2	4,7	1,0

Tabla 10: Media tiempo de espera de cada frente de carga

	Frente de descarga			
	FD_DumpNO	FD_CH_S_B	FD_CH_S_C	FD_DumpSO
Media del tiempo de espera de un camión	0,1	2,6	1,1	0

Tabla 11: media tiempo de espera de cada frente de descarga

	Frente de carga			
	FC_PO_A	FC_PO_B	FC_PO_C	FC_PO_D
Factor de utilización %	0,5	0,59	0,61	0,54

Tabla 12: Factor de utilización de la pala en cada frente de carga

	Flota de camiones
Factor de utilización promedio	68%

Tabla 13: Factor de utilización promedio de la flota de camiones

3. Los índices operacionales se obtienen para cada equipo de pala y para la flota de camiones. Para estos últimos, se toma el promedio del índice correspondiente, según se indica en la siguiente tabla:

Equipo/índice	Disponibilidad	Utilización operativa	Factor de utilización	Utilización Nominal	Utilización disponible
Pala_1	100%	100%	50%	50%	50%
Pala_2	100%	100%	59%	59%	59%
Pala_3	100%	100%	61%	61%	61%
Pala_4	100%	100%	54%	54%	54%
Flota camiones	97%	100%	68%	66%	68%

Tabla 14: índices operacionales para equipos de carguío y flota de camiones (en promedio).

Parte D: Análisis de sensibilidad

1. Se identificaron dos sistemas de rutas, la cual denominaremos Sistema Norte y Sistema Sur. Además, se determinó que cuando DSIM asigna los camiones, se añade una ruta de conexión denominada "Ruta R" (identificada por el color rojo).



Figura 1: Ubicaciones de frente de carga, frentes de descarga y locaciones. Divididos el circuito en dos sistemas, el Norte (izquierda) y Sistema Sur(derecha)

	Equipo de carga	Frente de carga	Frente de descarga	Tipo de material
Sistema Norte	Pala_1	FC_PO_A	FD_DumpNO	Estéril
Sistema Sur	Pala_2	FC_PO_B	FD_CH_S	Mineral
	Pala_3	FC_PO_C	FD_CH_S	Mineral
	Pala_4	FC_PO_D	FD_DumpSO	Estéril

Tabla 15: Sistema Norte y Sur

El Sistema Sur, en su recorrido desde el frente de carga al frente de descarga, no interactúa mayormente con el Sistema Norte, limitando su interacción a caso de eventualidades como colaciones, aparcamiento o mantenimiento en el taller, en cuyo caso interactúa preferentemente en las intersecciones, donde los camiones disminuyen su velocidad o ceden el paso. Por tanto, el foco principal es mejorar la productividad del Sistema Sur, ya que allí existe una fuerte interdependencia entre los otros tres circuitos productivos. Por lo tanto, se identifica el cuello de botella en la ruta del sistema Sur. En la figura 2 se visualiza el sector que tiene el mayor tiempo de espera por intersección en dicha ruta, el cual requiere tomar medidas para controlar dicha intersección. Asimismo, se determinó el equipo de carga con mayor número de cola y cuello de botella, para asignar de forma manual manualmente un número de camiones y comparar dichos resultados con la asignación automática del software, contrastando las máxima productividad nominal de ambas metodologías.

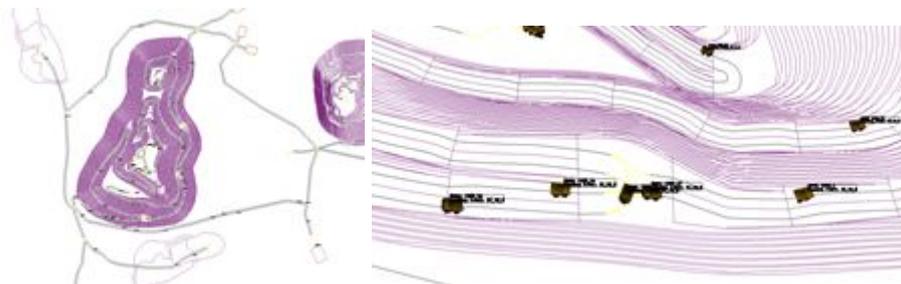


Figura 2: Ubicaciones de cuello de botella en ruta señalada con una estrella.

Comenzamos simulando con 46 camiones y que el software escoja la mejor asignación de equipos, después de reportar 2 veces con idénticas configuraciones no percatamos de que los equipos fuera de servicio varía con cada reporte, ahora nosotros procedimos a buscar cuantas réplicas son necesarias para que la simulación sea representativa, para esto hicimos 100 simulaciones en se estabiliza en 62 simulaciones por lo que reportamos con 46, 47, 48, 49 y 50 camiones y mostramos en este gráfico su promedio.

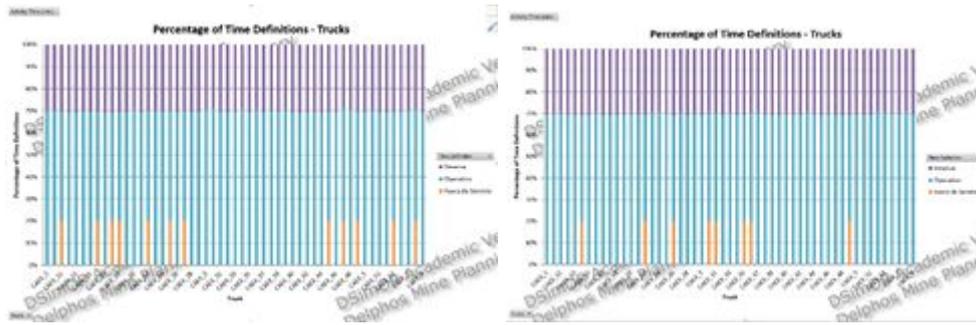


Figura 3: Configuración A y Configuración B, diferentes para cada iteración se tomó 10 réplicas como tamaño representativo de manera preliminar para la respuesta.

2. Si, existe un ajuste al número de camiones para los escenarios estudiados en la pregunta 1, como se vió previamente, por medio de la simulación de escenarios con distintos números de camiones.

Circuito	46 camiones	47 camiones	48 camiones	49 camiones	50 camiones
A	64120	44800	61320	62160	62440
B	45920	66360	68880	68600	66080
C	71400	68040	71400	71400	68600
D	39480	56840	39480	41720	61600

Tabla 16: Toneladas movidas por los camiones en cada circuito

Después llegamos a la conclusión de que con 48 camiones podríamos tener la máxima producción.

3. Para los 46 camiones definidos, se indican los siguientes

N° Camiones	Toneladas	Tiempo espera frente carga camión (min)				Tiempo espera frente de descarga de camión (min)				Factor de utilización de la pala				Factor de utilización promedio de la flota de camiones
		FC_P O_A	FC_P O_B	FC_P O_C	FC_P O_D	FC_P O_A	FC_P O_B	FC_P O_C	FC_P O_D	Pala_1	Pala_2	Pala_3	Pala_4	
46	241080	1,131	9,197	7,412	0,976	1,130	5,398	5,233	0,975	55%	61%	63%	35%	65%

Tabla 17: Valores para 46 camiones

Anexos

Anexo 1. Tabla comparativa de la cantidad de camiones y su respectiva productividad nominal en [t/h] en cada circuito productivo.

N° Camiones	t/h			
	FC_PO_A	FC_PO_B	FC_PO_C	FC_PO_D
7				3173
8				3617
9	3512			4048
10	3885			4480
11	4270	3512	3500	4562
12	4550	3827	3815	4562
13	4550	4142	4118	4550
14		4453	4422	
15		4503	4515	
16		4503	4515	
17		4492	4515	
18		4480	4503	
19		4468	4492	

Tabla 18: Cantidad de camiones y su respectiva productividad nominal en circuitos aislados

Anexo 2. Gráfico de la productividad en [t/h] en función del número de camiones en cada circuito productivo.

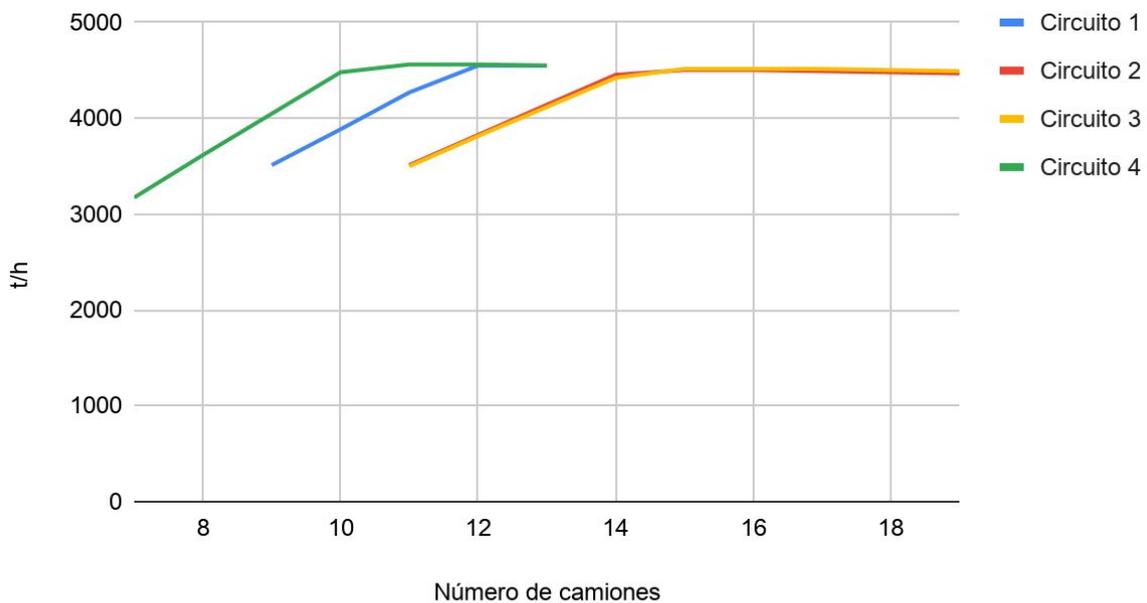


Gráfico 1: Productividad en t/h vs número de camiones

Anexo 3. Gráfica de la media del tiempo de espera en el frente de carga de un camión, en función del número de camiones.

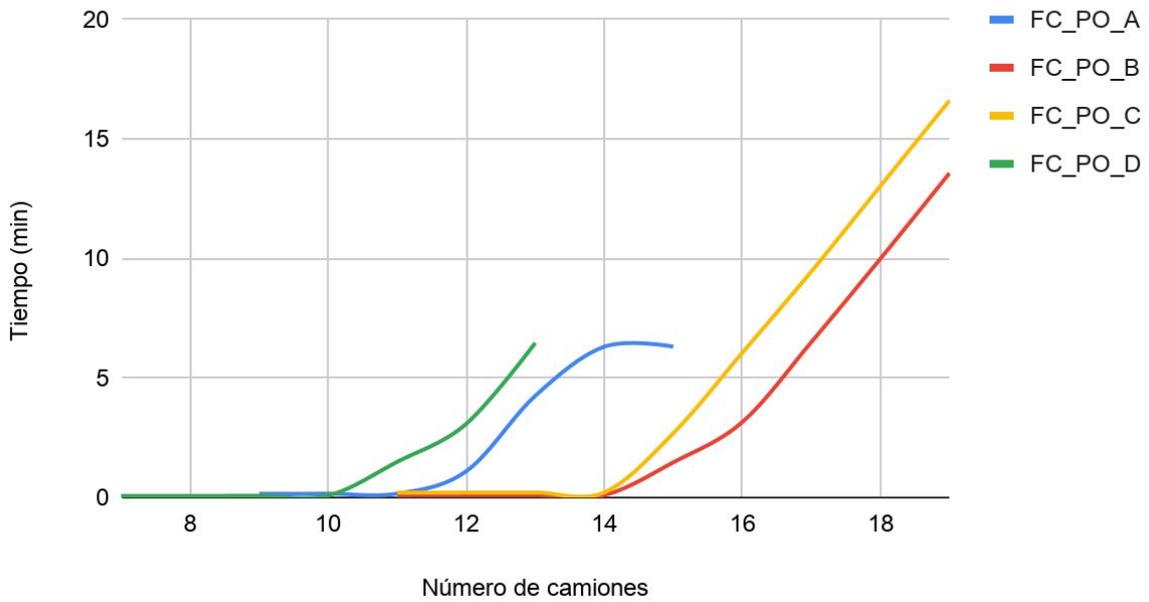


Gráfico 2: Media del tiempo de espera en frente de carga vs número de camiones

Anexo 4. Gráfica de la media del tiempo de espera en el frente de descarga de un camión, en función del número de camiones.

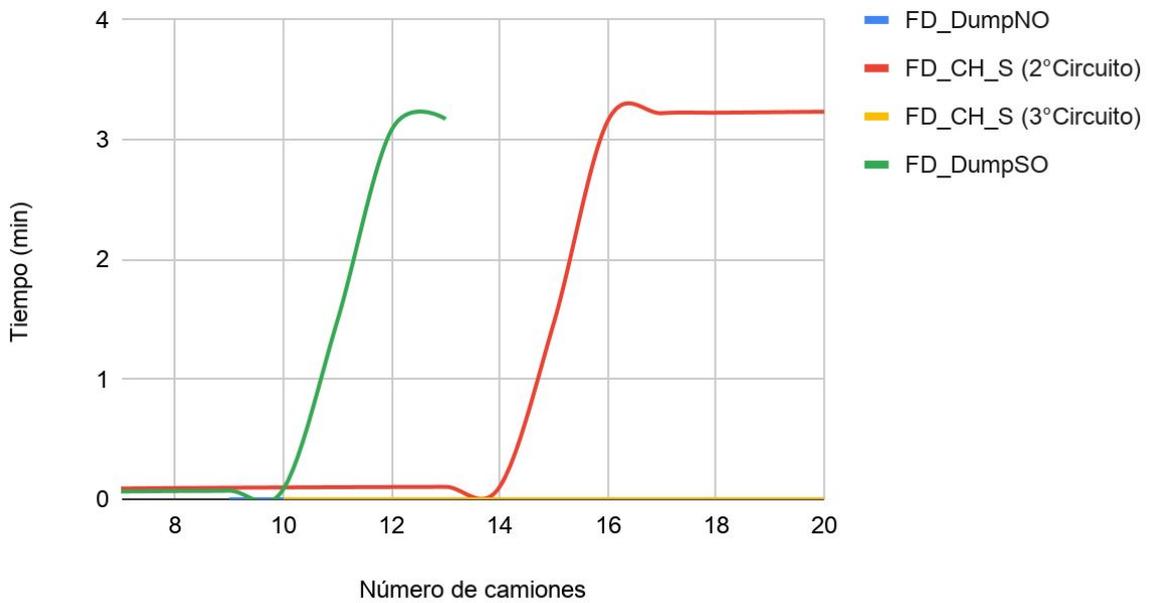


Gráfico 3: Media del tiempo de espera en frente de descarga vs número de camiones

Anexo 5. Gráfica del factor de utilización de la pala, en función del número de camiones.

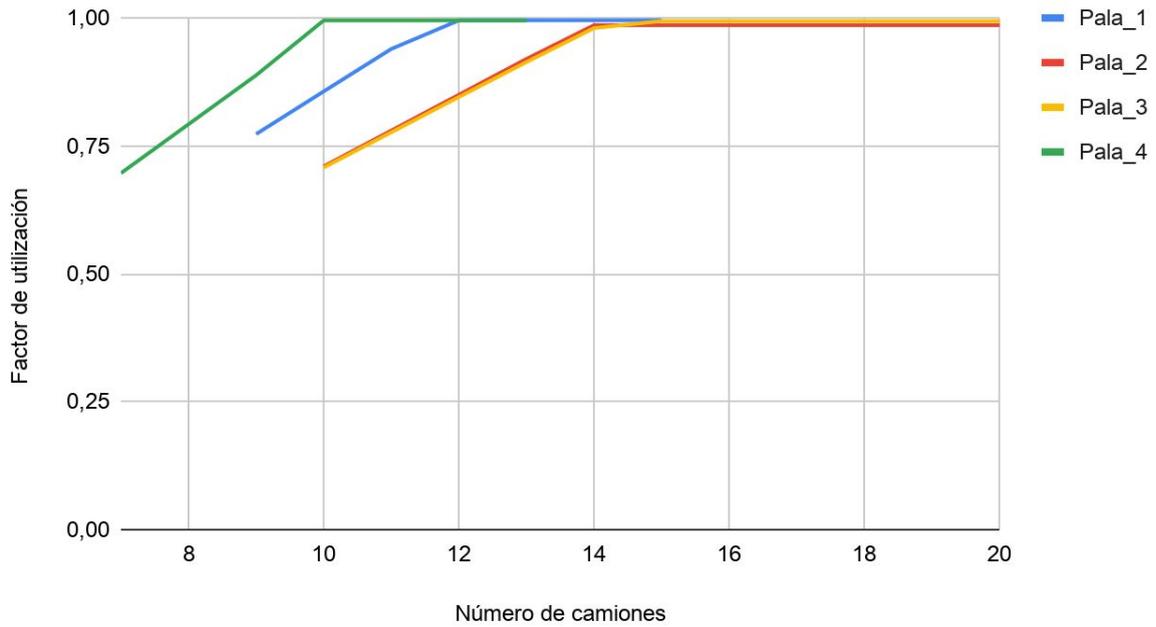


Gráfico 4: Factor de utilización de la pala vs número de camiones

Anexo 6. Gráfica del factor de utilización promedio de la flota de camiones, en función del número de camiones.

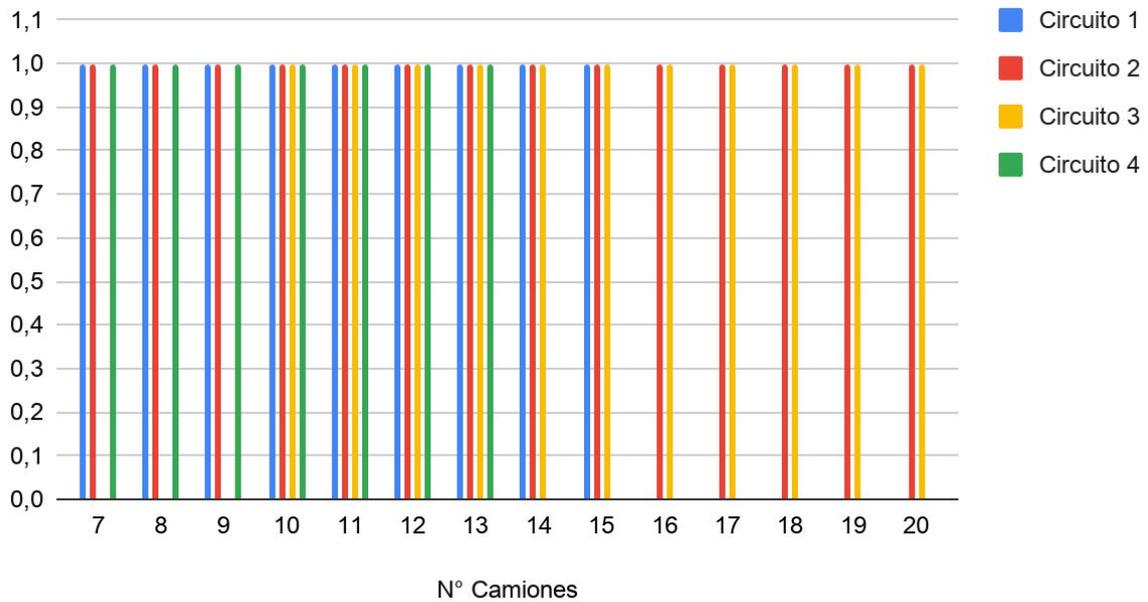


Gráfico 5: Factor de utilización de la flota de camiones vs número de camiones

Anexo 7. Tabla comparativa de la productividad operativa, tiempos de espera y factores de utilización de todos los circuitos operativos, a distinto número de camiones.

N° Camiones	Toneladas	T/h	Tiempo espera frente carga camión (min)				Tiempo espera frente de descarga de camión (min)				Factor de utilización de la pala				Factor de utilización promedio de la flota de camiones
			FC_P O_A	FC_P O_B	FC_P O_C	FC_P O_D	FC_P O_A	FC_P O_B	FC_P O_C	FC_P O_D	Pala_1	Pala_2	Pala_3	Pala_4	
41	390320	15633	0,35	0,69	0,72	0,10	0,34	0,69	0,71	0,10	93%	93%	92%	86%	100%
42	392280	16345	0,36	2,07	2,19	0,15	0,35	1,88	1,92	0,15	88%	92%	92%	86%	100%
43	407400	15633	0,45	0,32	0,62	0,18	0,44	0,32	0,62	0,18	93%	95%	95%	91%	100%
44	413000	16345	0,55	1,20	2,30	0,50	0,53	1,11	2,28	0,50	93%	97%	97%	91%	100%
45	415240	17570	0,36	1,25	2,35	1,05	0,35	1,24	2,35	1,05	95%	98%	98%	94%	100%
46	427000	17792	0,46	1,21	3,48	1,40	0,45	1,20	3,25	1,37	97%	99%	99%	95%	100%
47	413560	17232	0,28	9,57	3,24	0,21	0,28	5,83	2,29	0,20	92%	98%	96%	91%	100%
48	426440	17768	0,50	10,41	1,72	0,81	0,50	6,39	1,48	0,79	97%	99%	98%	96%	100%
49	406280	16928	0,19	10,14	11,31	0,12	0,19	6,39	6,40	0,10	87%	99%	99%	87%	100%
50	409640	17068	1,37	10,09	11,30	1,31	1,37	6,39	6,40	1,30	88%	99%	99%	89%	100%
51	412720	17197	3,01	10,11	11,28	2,43	2,96	6,39	6,40	2,41	89%	99%	99%	90%	100%
52	415240	17302	4,22	10,09	11,29	4,01	3,82	6,39	6,40	3,46	91%	99%	99%	91%	100%
53	432040	18002	4,31	10,23	11,40	0,74	4,24	6,39	6,40	0,61	99%	99%	99%	98%	100%
54	429240	17885	0,23	10,31	11,49	9,72	0,21	6,39	6,40	6,32	96%	99%	99%	99%	100%
Media			1,19	6,26	6,05	1,62	1,15	4,07	3,81	1,32	93%	98%	97%	92%	100,00%

Tabla 19: Productividad operativa, tiempos de espera, factor de utilización, conforme varía el número de camiones

Anexo 8. Gráfica de la media del tiempo de espera para cada frente de carga de un camión, en función del número de camiones.

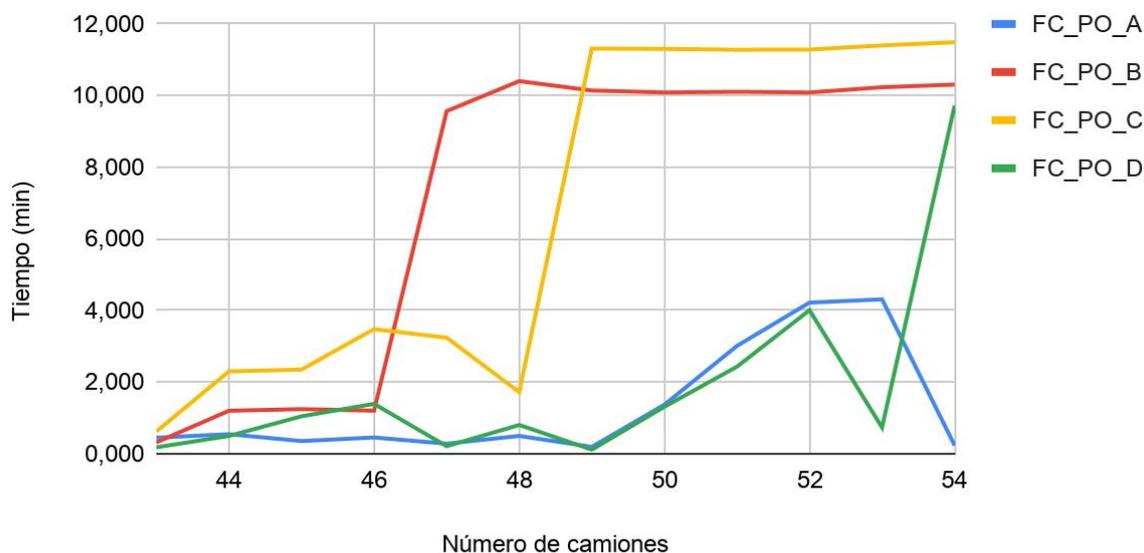


Gráfico 6: Tiempo de espera en cada frente de carga vs número de camiones

Anexo 9. Gráfica de la media del tiempo de espera para cada frente de descarga de un camión, en función del número de camiones.

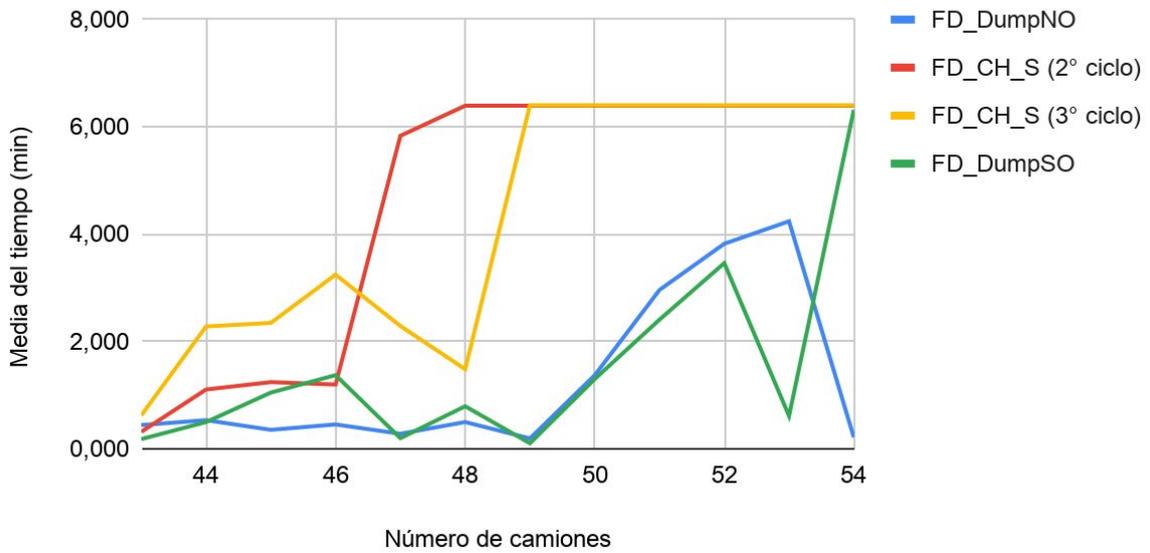


Gráfico 7: Tiempo de espera en cada frente de descarga vs número de camiones

Anexo 10. Gráfica del factor de utilización para cada pala, en función del número de camiones.

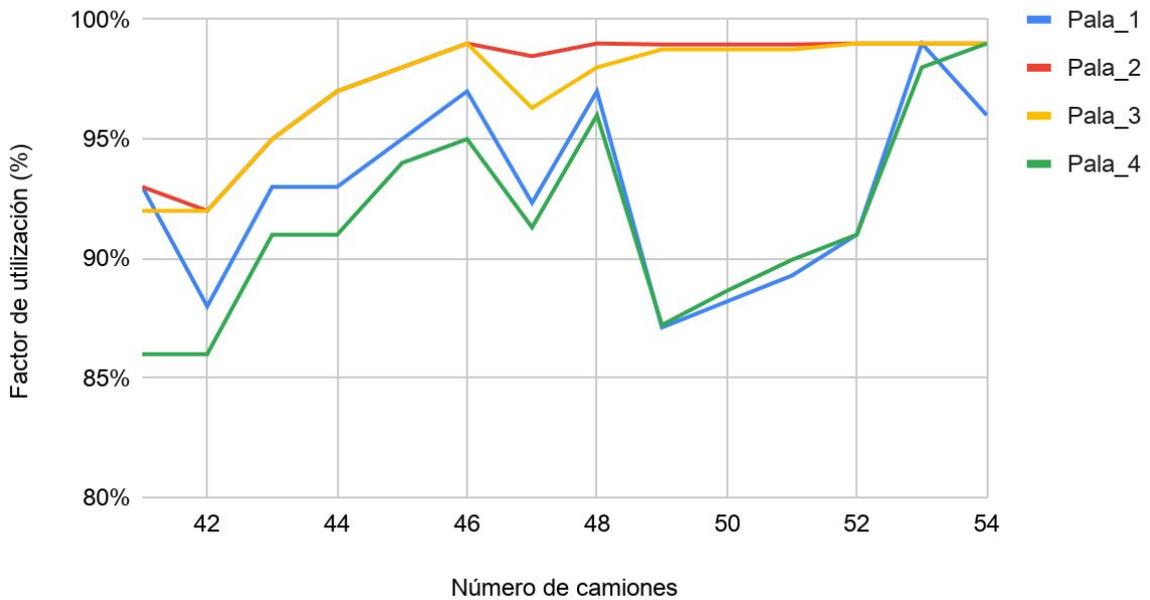


Gráfico 8: Factor de utilización para cada pala vs número de camiones

Anexo 11. Gráfica del factor de utilización promedio de la flota de camiones, en función del número de camiones.

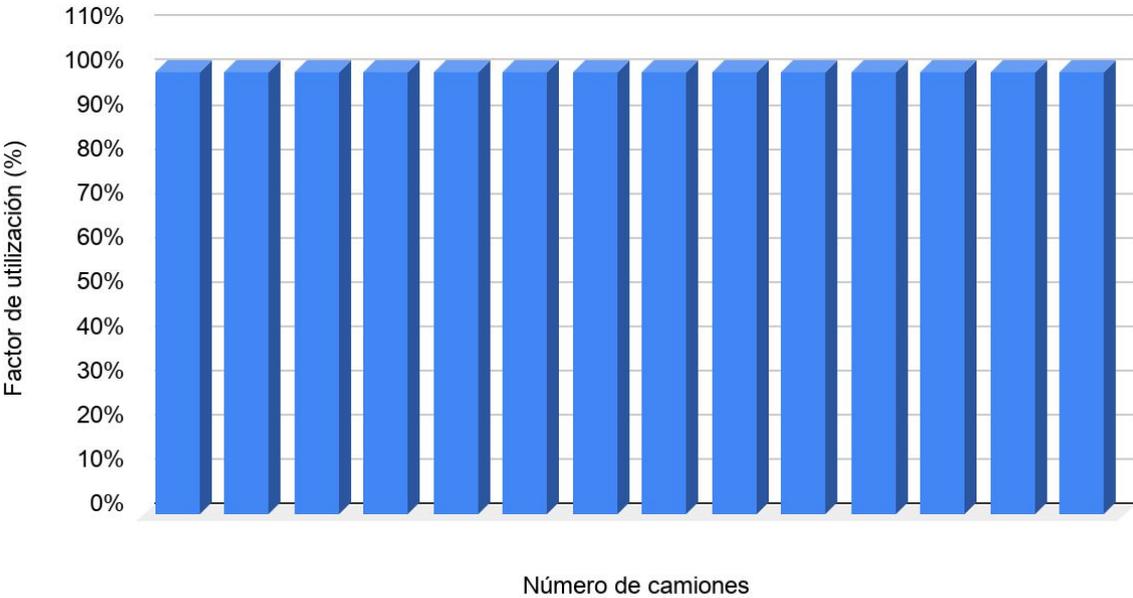


Gráfico 9: Factor de utilización para cada pala vs número de camiones