UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE EFICIENCIA DE LOS PUERTOS VALPARAÍSO Y SAN ANTONIO MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

JAVIERA SOFÍA DÍAZ SIRÉ

PROFESOR GUÍA

ANDRÉS FUENTES

CORREFERENTE

LEOPOLDO SANTIBÁÑEZ

VALPARAÍSO, 24 DE ABRIL DE 2019

TABLA DE CONTENIDO

1 RESUMEN EJECUTIVO 7
2 INTRODUCCIÓN 8
3 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 9
4 OBJETIVOS 12
4.1 Objetivo General 12
4.2 Objetivos Específicos 12
5 ALCANCE 13
6 ANTECEDENTES GENERALES 14
6.1 Evolución del Comercio Marítimo Internacional 14
6.2 World-Class Ports 16
6.2.1 Ranking de Puertos Mundiales 17
6.2.2 Ranking de Puertos Latinoamericanos y del Caribe 19
6.3 Puerto de Valparaíso hoy 22
6.4 Puerto de San Antonio hoy 28
7 MARCO TEÓRICO 36
7.1 Benchmarking 36
7.2 Programación Lineal 36
7.3 Análisis Envolvente de Datos 38
7.3.1 Modelo DEA-CCR 40
7.3.2 Método de Dos Etapas 46
7.3.3 Modelo BBC 47
7.3.4 Descomposición de la Eficiencia 49
8 METODOLOGÍA 50
8.1 Justificación de la metodología 50
8.2 Selección de unidades y variables 50
8.3 Desarrollo del modelo DEA-CCR multiplicativo 52
8.4 Desarrollo del modelo DEA-CCR envolvente 53
8.5 Determinación de valores objetivos para las variables inputs y output 54
8.6 Desarrollo del Método de Dos Etapas 54
8.7 Desarrollo del Modelo BCC 55

8.8 Descomposición de la Eficiencia 55
9 RESULTADOS 56
9.1 Base de datos 56
9.2 Modelo DEA-CCR multiplicativo 56
9.3 Modelo DEA-CCR envolvente 61
9.4 Valores objetivos de variables input y output 63
9.5 Método de Dos Etapas 64
9.6 Modelo BCC 65
9.7 Descomposición de la Eficiencia 66
10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 68
11 DISCUSIÓN 70
12 LIMITACIONES 72
14 REFERENCIAS 73
15 ANEXOS 76
15.1 Resultados Modelo multiplicativo 76
15.2 Resultados Modelo Envolvente 79
15.3 Resultados Método de Dos Etapas 81
15.4 Resultados Modelo BCC 85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: *Maritime Shipping Routes and Strategic locations.* (Fuente Shipping density data adapted from National Center for Ecological Analysis and Synthesis, A Global Map of Human Impacts to Marine Ecosystems). 16

Ilustración 2: *Top 20 Puertos Latinoamericanos y del Caribe.* (Fuente CEPAL) 20

Ilustración 3: *Ubicación de sitios Puerto de Valparaíso.* (Fuente Puerto Valparaíso). 24

Ilustración 4: *Ubicación de los Sitios y Terminales de Puerto San Antonio.* (Fuente Empresa Puerto de San Antonio). 30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: *Top 10 Puertos de Contenedores del Mundo 2015.* (Fuente Revista del Sector Marítimo). 17

Tabla 2: *Caracteristicas sitios de atraque y equipamiento Puerto Valparaíso*. (Fuente Puerto Valparaíso). 25

Tabla 3: *Transferencia histórica del Puerto de Valparaíso medida en miles de toneladas [Mton]*. (Fuente Puerto Valparaíso). 27

Tabla 4: *Capacidad de acopio actual por terminal medido en toneladas años. (*Fuente Puerto Valparaíso). 28

Tabla 5: *Capacidad de transferencia de carga anual en Puerto Valparaíso medida en toneladas año.* (Fuente Puerto Valparaíso). 28

Tabla 6: *Características de los Sitios de Atraque de Puerto San Antonio.* (Fuente Empresa San Antonio). 31

Tabla 7: *Equipos de Puerto San Antonio*. (Fuente Empresa Puerto San Antonio). 33

Tabla 8: *Transferencia Histórica Puerto San Antonio (cifras en toneladas).* (Fuente Elaboración Propia). 34

Tabla 9: *Capacidad de Transferencia de Carga Puerto San Antonio.* (Fuente Empresa Puerto San Antonio). 35

Tabla 10: *Base de Datos.* (Fuente Elaboración Propia). 56

Tabla 11: *Resultados Modelo Multiplicativo.* (Fuente Elaboración propia). 57

Tabla 12: *Contribución de inputs y output (%).* (Fuente Elaboración Propia). 58

Tabla 13: *Análisis de Restricciones del Modelo Multiplicativo para Puerto San Antonio.* (Fuente Elaboración Propia). 59

Tabla 14: *Análisis de Restricciones del Modelo Multiplicativo para Puerto Colón.* (Fuente Elaboración propia). 60

Tabla 15: *Análisis de Restricciones el Modelo Multiplicativo para Puerto Valencia.* (Fuente Elaboración Propia). 60

Tabla 16: *Análisis de Restricciones del Modelo Multiplicativo para Puerto Singapur.* (Fuente Elaboración Propia). 60

Tabla 17: *Resultado Modelo Envolvente.* (Fuente Elaboración Propia)..... 62

Tabla 18: *Resumen de conjuntos de referencia*. (Fuente Elaboración Propia)..... 63

Tabla 19: *Valores Observados de Puerto Ineficientes*. (Fuente Elaboración Propia)..... 63

Tabla 20: *Valores Objetivos Calculados de Puertos Ineficientes*. (Fuente Elaboración Propia). 63

Tabla 21: *Valores de Holgura para cada una de las Variables de los Puertos Ineficientes*. (Elaboración Propia)..... 64

Tabla 22: *Resultados Modelo de Dos Etapas.* (Fuente Elaboración Propia). 65

Tabla 23: *Resultados Modelo BCC.* (Fuente Elaboración Propia). 66

Tabla 24: *Tabla de Eficiencia CCR, BCC y de Escala*. (Fuente Elaboración Propia). 66

Tabla 25: *Tabla Resumen de Ranking de Puertos Estudiados.* (Fuente Elaboración Propia). 67

1 RESUMEN EJECUTIVO

Los puertos, hoy en día, poseen un rol fundamental en la economía de la región a la cual pertenecen y, debido a su gran influencia en aspectos económicos es que se hace indispensable potenciar su crecimiento y desarrollo. Antes de comenzar con un plan de expansión para un puerto, es de suma importancia conocer bajo qué niveles de eficiencia están operando hoy en día, a fin de generar proyecciones que maximicen la utilización de sus recursos. La presente tesis, a través de la optimización de los modelos de programación lineal CCR y BCC, propuestos por el "Análisis Envolvente de Datos", genera un Benchmarking entre los principales puertos a nivel mundial, dentro de los cuales se encuentran Santos, Colón, Shanghai, Valencia, Singapur y Montevideo, y los puertos chilenos de Valparaíso y San Antonio, determinando los niveles de eficiencia bajo los cuales estos operan actualmente, según cómo cada una de las unidades del estudio hace uso de sus recursos. Las variables independientes analizadas fueron Área de Patio, Número de Grúas Gantry, Longitud de Muelles y Calado Máximo, y la variable dependiente relacionada con la productividad de los puertos fue el Nivel de Transferencia Anual. Según lo anterior, se obtuvo que Puerto de Valparaíso opera bajo un nivel de eficiencia del 100%, comparándose con los puertos Santos y Shanghai, y que Puerto de San Antonio no hace una correcta utilización de sus recursos, quedando en último lugar en el ranking de los ocho puertos estudiados. Para el puerto de San Antonio, la variable que no está siendo aprovechada de manera óptima es el Número de Grúas, lo que le genera al puerto una pérdida de 605.000 TEUs al año, situación que debe ser considerada para futuros proyectos de expansión que busquen maximizar la utilización de sus recursos.

2 INTRODUCCIÓN

El Comercio Marítimo Internacional representa alrededor del 90% del comercio mundial de mercancías y es considerado el sistema de transporte más eficiente y rentable. Hoy, la globalización mundial ha creado una interdependencia entre países basado en el intercambio de sus productos y es el transporte marítimo la alternativa predilecta para el proceso de distribución de bienes.

Año a año, los niveles de demanda mundial aumentan y el Comercio Internacional y, por ende, el Marítimo Internacional, vive una constante evolución que lo obliga a enfrentarse a importantes necesidades de inversión y reinvención, a fin de adaptarse a las nuevas tecnologías y estándares de demanda.

Para Chile, los puertos desempeñan un rol fundamental en el crecimiento económico del país, siendo Valparaíso y San Antonio sus principales exponentes. Debido a la gran influencia que estos puertos tienen sobre la economía de la región, es que se ha comenzado con planes de expansión y crecimiento de las actuales terminales portuarias. A criterio del autor de esta tesis, antes de llevar a cabo la ejecución de los planes de expansión, es importante conocer el grado de utilización actual de las instalaciones de un puerto, a fin de proponer diseños futuros que, efectivamente, logren que el puerto obtenga la máxima producción posible con los recursos disponibles.

Es por esta razón que la presente tesis tiene como objeto principal determinar la eficiencia actual de Puerto Valparaíso y San Antonio respecto a la de los principales Puerto a Gran Escala, a través de un benchmarking basado en la utilización de los recursos de cada puerto por medio un modelo matemático no paramétrico denominado “Análisis Envolvente de Datos”.

3 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Durante los últimos años, el Comercio Marítimo Internacional ha sufrido grandes cambios, impulsados por la globalización económica, la transformación de servicios y los avances tecnológicos. Hoy en día, los mercados internacionales son globales, es decir, la competencia rige, no sólo para los productos finales, sino también para todos los insumos que intervienen en las cadenas de producción y distribución. Por lo que es claro concluir que la tecnología ha ampliado los mercados que los puertos pueden servir y exigen un mejoramiento de sus capacidades (Burkhalter, 1999).

En 1920 se aprobó la Ley N° 2.390 que asignó fondos para la construcción de los puertos de Valparaíso y San Antonio, siendo en 1910 y 1912, respectivamente, la inauguración de los trabajos en San Antonio y Valparaíso, donde fue levantada la actual infraestructura que ambos puertos poseen (Puerto Valparaíso, 2002). Puerto Valparaíso cuenta con dos Terminales para carga y pasajeros: Terminal Pacífico Sur (TPS), especialista en carga contenedorizada y Terminal Cerros de Valparaíso (TCVAL) especialista en carga fraccionada y con un proyecto para especializarse también en carga contenedorizada (Puerto Valparaíso, 2002), los cuales, en conjunto, poseen una capacidad total de transferencia de carga de 13.000.000 de toneladas anuales (Puerto Valparaíso, 2015). Por su parte, Puerto San Antonio cuenta con dos terminales: Terminal Molo Sur especializado en carga contenedorizada y Terminal Espigón multipropósito, los cuales suman en conjunto una capacidad total de transferencia de carga de 2.600.000 TEUs al año.

Ambos puertos chilenos han sido testigo de la creciente evolución del Comercio Marítimo Internacional, y Puerto Valparaíso lo expresa claramente en sus estadísticas de

evolución de TEUS[1] transferidos. Durante el año 2000, el Puerto de Valparaíso transfirió un total de 256.386 TEUS, casi una cuarta parte de lo que se transfirió en el transcurso del año 2017, cifra que alcanzó a superar 1.000.000 TEUS (Puerto Valparaíso, 2002).

Según estas cifras, el Puerto de Valparaíso se encuentra lejos de entrar al Top 10 del ranking realizado por la CEPAL[2] el pasado julio de 2017, ranking que clasifica a los puertos de América Latina y el Caribe según el nivel de TEUS transferidos. El Puerto de Santos, Brasil, alcanzó el primer lugar del ranking con un total de 3.578.192 TEUS en el año 2017, posicionándolo como el puerto con mayor nivel de movilizaciones dentro del área estudiada y el Puerto de San Antonio, Chile, fue ubicado en décimo lugar con un total de 1.296.890 TEUS durante el mismo año.

Puerto Valparaíso ha realizado análisis, estadísticas y proyecciones sobre los niveles de demanda futura y, por lo tanto, niveles de transferencia de carga con el comercio exterior en la Región de Valparaíso, las cuales han sido detalladas en su Plan Maestro (2015), indicando que para el año 2020 se espera una transferencia de casi 35.000.000 de toneladas y para el 2030, casi de 60.000.000. De igual modo, Puerto de San Antonio en su Plan Maestro (2013) proyecta que para el año 2023 se espera una demanda de 5.078.272 TEUs y para el año 2033 un total de 8.726.824 TEUs (Empresa Puerto San Antonio, 2013).

El problema surge debido a que los niveles actuales de utilización de ambos puertos están alcanzando sus capacidades máximas, por lo que, a pesar de que la demanda proyectada vaya en aumento, el Puerto de Valparaíso y el de San Antonio no cuentan con las condiciones necesarias para hacer frente a ella, viéndose en la obligación de tomar medidas al respecto.

---

[1] Acrónimo de *Twenty-foot Equivalent Unit* - Unidad Equivalente a Veinte Pies - y que se usa como unidad de medida inexacta en transporte marítimo expresada en contenedores (Diccionario de comercio exterior, s.f.).
[2] Acrónimo de *Comisión Económica para América Latina y el Caribe.*

Tal como lo menciona CEPAL en su publicación “Indicadores de productividad para la industria portuaria. Aplicación en América Latina y el Caribe” en del año 2006, a veces la necesidad de ampliar los terminales o bien aumentar su capacidad actual resulta ser algo inevitable. Sin embargo, antes de que un puerto ponga un plan en ejecución, y sobre todo uno de esta envergadura, es de gran importancia que sepa si ha utilizado completamente sus instalaciones existentes y maximizado su producción, es decir, si obtiene el máximo que es posible con los recursos disponibles.

Es ahí donde nacen las interrogantes a resolver durante el desarrollo de esta tesis: ¿Están alcanzando, actualmente, el Puerto de Valparaíso y San Antonio los niveles de eficiencia esperados según sus diseños? Si no operasen hoy bajo niveles de eficiencia óptimos ¿Cuáles serían las mejoras que debiesen generar a fin de alcanzar la optimalidad? Y, finalmente, en relación a cómo están utilizando sus recursos hoy los puertos ¿Son considerados puertos competitivos a nivel mundial?

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Determinar la eficiencia actual del Puerto de Valparaíso y San Antonio respecto a la de los principales Puertos a Gran Escala, por medio de una comparación según el manejo de recursos en base al Modelo de Programación Lineal planteado por el Análisis Envolvente de Datos, con la finalidad de evaluar si se han utilizado completamente las instalaciones existentes y, por ende, si se ha logrado la maximización de la producción de los puertos.

4.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar los puertos y variables a comparar, mediante previa investigación bibliográfica, con el objeto de formular los Modelos de Programación Lineal que plantea el Análisis Envolvente de Datos.
- Resolver los modelos DEA-CCR multiplicativo y envolvente, a través del complemento *Solver* del programa *Microsoft Excel*, a fin de obtener los índices de eficiencia relativa de cada puerto.
- Determinar los valores objetivos para cada una de las variables inputs y output escogidas, mediante el análisis de restricciones, con el propósito de proponer mejoras en la utilización de los recursos de cada puerto.
- Resolver el modelo de dos etapas propuesto por DEA, a través del complemento *Solver* del programa *Microsoft Excel*, con el fin de corroborar los resultados obtenidos por los modelos anteriores.

5 ALCANCE

La presente tesis se centra en desarrollar un Benchmarking entre los puertos Valparaíso y San Antonio y otros grandes puertos reconocidos a nivel mundial, basado en la utilización de sus recursos, con el propósito de determinar si los puertos chilenos están operando actualmente bajo estándares óptimos de eficiencia.

Según lo anterior, las herramientas de comparación a utilizar serán los modelos CCR y BCC propuestos por el Análisis Envolvente de Datos, donde las variables independientes de interés serán Área de Patio, Número de Grúas Gantry, Longitud de Muelles y Calado Máximo; la variable dependiente relacionada a la productividad de los puertos será Nivel de Transferencia Anual; y las unidades a estudiar serán los puertos de Valparaíso, San Antonio, Colón, Santos, Shanghai, Valencia, Singapur y Montevideo, centrando mayor atención en los resultados obtenidos por Puerto de Valparaíso y San Antonio.

6 ANTECEDENTES GENERALES

6.1 Evolución del Comercio Marítimo Internacional

La revolución tecnológica del contenedor y el desarrollo del intermodalismo ha dado lugar a una de las tendencias más significativas en el transporte marítimo internacional actual. Se trata del acelerado crecimiento del tamaño y la capacidad de carga de los buques. Este dinamismo y, por lo tanto, evolución tecnológica en las características de los buques, se explica por la importancia que poseen las economías de escala y la velocidad con que circulan las mercancías y los equipos de transporte (Martner y Moreno, 2001).

Los avances tecnológicos en la industria del transporte y la globalización de la competencia entre los proveedores de servicios de transporte han cambiado radicalmente el entorno en el que operan los puertos. La necesidad de una mayor eficiencia ha convertido a los puertos en un sector más intensivo en capital y en tecnología (Christidis, 2001).

En la década de los noventa se produce un predominio del transporte de contenedores en todo el mundo. Lo que antes era un comercio limitado a unos pocos puertos de mar, constituye ahora la actividad principal de la mayoría de ellos y de un número cada vez mayor de puertos fluviales. La mayor parte de las mercancías, en el comercio internacional marítimo, se transporta actualmente en contenedores, y el tráfico de contenedores es la principal fuente de ingresos y beneficios en la mayoría de los puertos. Hasta tal punto esto es así, que, en la práctica, el número de contenedores manejados ha reemplazado a la carga total como medida de la actividad, el tamaño y la importancia de un puerto (Christidis, 2001).

El predominio de los contenedores ha dado lugar a una tendencia continua hacia buques de transporte de contenedores cada vez mayores. Los buques de este tipo más modernos pueden transportar más de 6.000 TEU. La adquisición de tales buques, así como

la infraestructura de terminales y el equipo necesarios para que el puerto pueda darles servicio suponen economías de escala, pero exigen inversiones de capital importantes, a las que sólo pueden hacer frente las grandes empresas de transporte o los grandes puertos. Además, la operación eficiente de los buques de transporte de contenedores sólo es posible, en términos económicos, si se utiliza un pequeño número de puertos como nodos de una red internacional de transporte marítimo. Para que el sistema funcione de modo eficaz, se precisa una amplia red de servicios de distribución que conecte a dichos nodos con puertos secundarios y sistemas de distribución terrestres (Christidis, 2001).

Se estima que, en 2015, el volumen del comercio marítimo mundial representó más del 80% del comercio de mercancías en todo el mundo. En cuanto al valor de ese comercio, la proporción del comercio marítimo es, según algunos observadores, del 55% y, según otros, de más de dos tercios del total del comercio de mercancías (UNCTAD, 2016).

En 2015 —por primera vez en los registros de la UNCTAD[3]— se estimó que el volumen del comercio marítimo mundial superó los 10.000 millones de toneladas, siendo China el país que ejerce una influencia clave en el comercio marítimo, generando la mayor parte del aumento del volumen de las importaciones, sobre todo las de mercancías a granel (UNCTAD, 2016). Así como China, y Asia en general, ha mantenido su posición dominante como principal zona de carga y descarga, son los países en desarrollo los que ocupan una posición clave como importadores y exportadores a nivel mundial y consolidan su posición como proveedores de materias primas y refuerzan su posición como importantes fuentes de consumo y actores principales en los proceses manufactureros globalizados (UNCTAD, 2016). Lo expuesto anteriormente puede verse reflejado en la Imagen 1, presentada a

[3] Siglas de *United Nations Conference on Trade and Development (Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo).*

continuación, la cual expone las principales rutas de Comercio Marítimo Internacional, manifestando el claro predominio que poseen los países desarrollados sobre la totalidad de las transacciones marítimas.

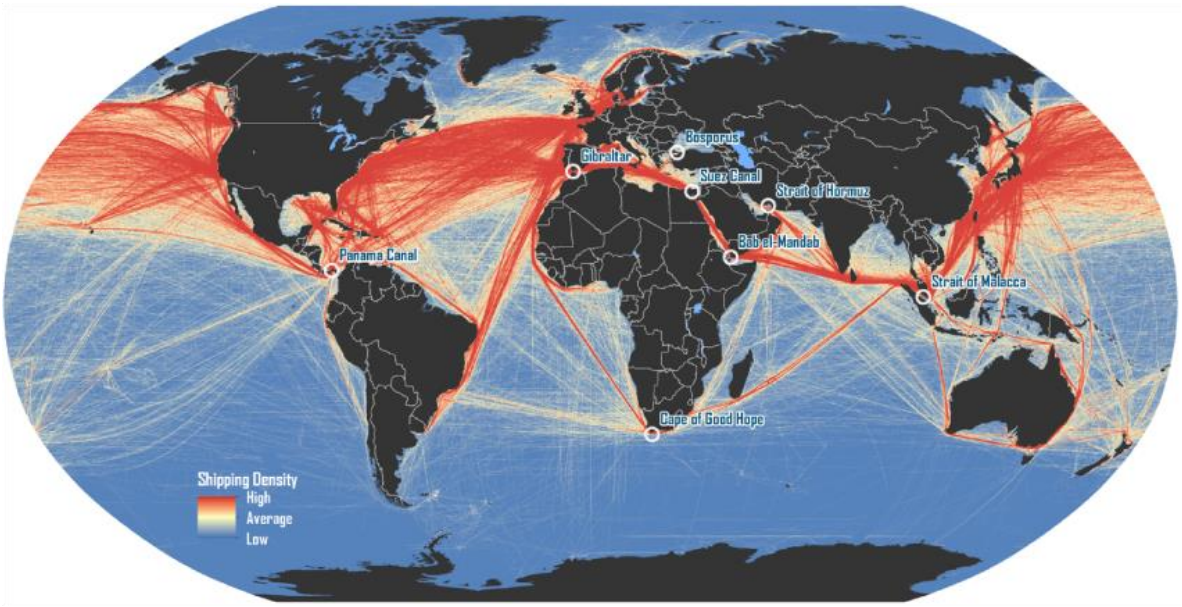

Ilustración 1: *Maritime Shipping Routes and Strategic locations.* (Fuente Shipping density data adapted from National Center for Ecological Analysis and Synthesis, A Global Map of Human Impacts to Marine Ecosystems).

Desde la presentación de estos antecedentes, nace la necesidad de conocer cómo operan los puertos de mayor escala en el mundo, los cuales actúan como modelos a seguir para otros de menor tamaño, como lo es el caso de Chile.

6.2 World-Class Ports

Para el 2007, Shanghai desplazó a Hong Kong como segundo puerto mundial en gestión de contenedores, sólo por detrás de Singapur. Esto subraya el creciente atractivo de Shanghai como principal puerto de entrada al mercado chino, cuyo dinamismo posiciona a Hong Kong en una nueva situación a la baja en la lista mundial de puertos. Existen cuatro razones por las que los especialistas en puertos consideran que el puerto de Shanghai lidera en los rankings de puertos mundiales. En primer lugar, su situación geográfica estratégica,

juntos a la desembocadura del río Yangtsé, siendo ésta la principal vía fluvial de entrada hacia el corazón de China, otorgándole así ventajas comparativas sobre otros puertos vecinos. En segundo lugar, el creciente volumen de intercambios de China, los cuales coinciden con el aumento en el volumen de contenedores embarcados desde Shanghai. En tercer lugar, la superioridad logística y tecnológica que, según las autoridades chinas, consideran que posee Shanghai sobre el resto de los puertos del mundo, logrando satisfacer las demandas del sector para modernizar y expandir sus instalaciones. Finalmente, se tienen cuestiones políticas económicas que Shanghai goza hoy en día (Díaz-Bautista, 2008).

6.2.1 Ranking de Puertos Mundiales

En conjunto, Asia lideró mundialmente el volumen de movimiento de contenedores en 2015 con un 72% dentro de los primeros 50 puertos del mundo, como se expone en la Tabla 1 del Top 10 de Puertos de Contenedores del Mundo (2015).

Puerto	País	Mteu en 2015	Mteu en 2014	Variación 14-15
Shanghai	China	36,54	35,29	3,54%
Singapur	Singapur	30,92	33,87	-8,7%
Shenzhen	China	24,20	24,04	0,7%
NingboZhoushan	China	20,63	19,45	6,0%
Hong Kong	China	20,07	22,23	9,6%
Busan	Corea del Sur	19,47	18,68	4,22%
Guangzhou Harbor	China	17,60	16,63	5,77%
Qingdao	China	17,44	16,62	4,9%
Jebel Ali, Dubai	U.A.E.	15,60	15,25	2,3%
Tianjin	China	14,11	14,06	0,43%

Tabla 1: *Top 10 Puertos de Contenedores del Mundo 2015.* (Fuente Revista del Sector Marítimo).

Los puertos europeos cuentan con una cuota de mercado de un 13,2%, América con un 9,6% y Medio Oriente con un 5,25%.

A continuación, se presenta un breve resumen que contiene las principales características que destacan a los tres Puertos más grandes del mundo por sobre el resto, según el ranking del año 2015:

I. Shanghai, China

El puerto de Shanghai, con cientos de años de historia, dispone de terminales de contenedores ubicadas en las áreas de Yangshan, Waigaogiao y Wusong, abarcando más de 13 [km] de longitud de muelle, con 156 grúas de puerto y un área total destinada a contenedores de 7.600.000 [m^2]. Shanghai ha movido, durante el año 2015, 36,54 MTEU.

Cabe destacar que el Puerto de Shanghai fue uno de los primeros en implementar obligatoriamente la nueva normativa ECA[4] en China, reduciendo gradualmente al 0.5% el contenido de azufre en los buques.

II. Singapur, Singapur

El puerto de Singapur llegó a ser el puerto más grande del mundo. Este puerto abastece el mercado de reexportación a una escala gigantesca. Esta infraestructura está conectada a más de 600 puertos repartidos por más de 100 países del mundo. Actualmente, cuenta con 212 grúas de muelle, capaces de operar en los buques más grandes y de apilar 22 contenedores por columna (Megaconstrucciones, s.f.) y con más de 17.3 [km] de longitud de muelle en total.

III. Shenzhen, China

La ciudad de Shenzhen, desconocida para muchos, es la ciudad más moderna de China y la ciudad con el crecimiento poblacional más alto de la historia de la humanidad (Megaconstrucciones, s.f.), y hoy en día goza de uno de los puertos más grandes del mundo,

[4] Acrónimo de *Estándares de Calidad Ambiental.*

el cual cuenta con una capacidad total de 140 muelles de atraque, distribuidos en una totalidad de 22,14 [km] de longitud de puerto, de los cuales 90 muelles son operacionales (Guillén, 2015).

Así como es relevante identificar las características y cualidades que logran destacar a estos Puertos de Clase mundial por sobre el resto de los puertos del mundo, también es importante realizar el mismo análisis, pero esta vez a nivel continental, el cual relacione puertos de países hermanos, los cuales poseen niveles de desarrollo mucho más comparables entre sí.

6.2.2 Ranking de Puertos Latinoamericanos y del Caribe

CEPAL elabora cada año un ranking que muestra el detalle de los movimientos de carga en contenedores de 120 puertos de la región, en base a información recopilada directamente de las autoridades portuarias y operadores de los terminales marítimos. En 2016, esta actividad disminuyó un 0,9%, con un volumen aproximado de 47,5 MTEU (CEPAL, 2017). A continuación, se presenta la Imagen 2 que expone el Top 20 de los Puertos Latinoamericanos y del Caribe realizado por CEPAL.

Ilustración 2: *Top 20 Puertos Latinoamericanos y del Caribe.* (Fuente CEPAL)

De acuerdo al ranking realizado por CEPAL, se realiza un breve resumen que contiene las principales características que destacan a los tres Puertos más grandes de América Latina y el Caribe por sobre el resto, según el ranking del año 2016 realizado por CEPAL:

I. Santos, Brasil

El puerto de Santos alcanzó su máximo histórico el movimiento de carga al transferir, en 2017, un total de 129.865.022 toneladas. La exportación fue un factor preponderante, pues

este flujo fue el responsable del 72,04% del movimiento total del puerto (Portal Portuario, 2018).

A pesar de que Santos se haya convertido en el principal hub[5] de la costa este de América del Sur, aún posee una gran restricción y es que puede operar sólo con buques de hasta 333 metros de eslora en tiempos en que los armadores ya anunciaron que en estas cosas los buques dedicados tendrán, por lo menos, 366 metros de eslora en los próximos dos años. Actualmente, Santos posee un total de 55 terminales que ocupan un área de casi 8 millones de metros cuadrados (La Nación, 2016).

II. Colón, Panamá

Cercanos a la zona libre de Colón se encuentran dos importantes puertos: Manzanillo International Terminal y Colon Container Terminal (Evergreen). El primero, ofrece servicios portuarios a las líneas navieras que transitan a través del Canal de Panamá o que sirven a la región del Caribe. Posee 1.240 metros continuos de muelle para buques portacontenedores, un patio de contenedores de 37 hectáreas, 20 hectáreas adicionales en actual desarrollo, 51 hectáreas disponibles para futuras ampliaciones y moviliza 70.000 TEUS al mes. Por su parte, Evergreen posee una capacidad tecnológica que le permite mover 34 TEUS por hora y tiene la capacidad de almacenar 400.000 TEUS en su patio de contendores, con un total de 37 hectáreas de área de terminal y 982 metros de muelle (Gamba, 2012).

III. Balboa, Panamá

Balboa posee una ubicación ideal para crecer como un centro de distribución de mercancías conectando los principales servicios de línea desde el Lejano Oriente y América

[5] Puerto central o de redistribución de carga, es decir, un puerto al que llegan las líneas navieras de largo recorrido, que descargan sus mercancías en dicho puerto, para que después se redistribuyan en líneas de recorrido más corto. (Aduanas en Canarias, 2009).

del Norte, hacia la Costa Oeste de América del Sur, Central y el Caribe. Posee un total de 182 hectáreas dedicadas al almacenamiento de contenedores y 5 muelles para barcos portacontenedores. Balboa opera con 25 grúas pórticas y 47 RTGs[6]. La operación de trasbordo de carga contenerizada representa el 90,1% del total de movimiento de contenedores, resultando en total casi 3 MTEUS durante el año 2017 (Georgia Tech Panama, s.f.).

6.3 Puerto de Valparaíso hoy

La ciudad de Valparaíso es la capital de la provincia y región del mismo nombre. Limita al norte con la ciudad de Viña del Mar y es parte de la zona urbana denominada gran Valparaíso, que comprende las ciudades de Valparaíso, Viña del Mar, Concón, Quilpué y Villa Alemana. La ciudad de Valparaíso está compuesta por 42 cerros de carácter principalmente residencial y un plan o casco antiguo en el que se emplean las actividades comerciales, bancarias y recreativas. La ciudad cuenta con una bahía, denominada Bahía de Valparaíso, abierta al Norte con una amplia boca de acceso y sin obstrucciones que afecten el acercamiento de las naves, limpia de escollos submarinos, fondo de arena con profundidades que varían entre los 10 y 50 metros (Puerto Valparaíso, 2015).

El Puerto de Valparaíso se ubica en la Bahía del mismo nombre, abrigada naturalmente a las corrientes marinas y vientos y, además, protegido por un molo de abrigo de 1.000 metros de longitud, lo que permite que tenga aguas abrigadas para las operaciones portuarias en un gran porcentaje de los días del año. Las coordenadas geográficas aproximadas del puerto son 33°02’ Latitud Sur y 71°38’ Longitud Oeste (Puerto Valparaíso, 2015).

[6] Acrónimo de *Grúas Pórtico sobre Neumáticos.*

El Puerto de Valparaíso goza de una ubicación estratégica, la cual le ha permitido ser un aporte fundamental al comercio internacional del país. Puerto Valparaíso es el principal puerto para las cargas de exportación e importación de la IV, V, VI, VII y Región Metropolitana del país y, además, es utilizado por la región del Cuyo en Argentina, la que se compone de las provincias de Mendoza, San Juan, San Luis y La Rioja.

Puerto Valparaíso cuenta, en la actualidad, con un total de ocho sitios de atraque, distribuidos en dos terminales: Terminal 1 con cinco sitios de atraque y Terminal 2 con tres sitios. Los sitios 1, 2 y 3 conforman un borde de atraque de 620 metros de longitud y los sitios 4 y 5 otro borde de atraque de 382,7 metros, como se expresa en la Imagen 3; estos sitios conforman el denominado Terminal 1, actualmente, operado por la empresa concesionaria Terminal Pacífico Sur Valparaíso S.A. (TPS). El Terminal 2 corresponde al llamado Espigón, con los sitios 6, 7 y 8, operado por la empresa concesionaria Terminal Cerros de Valparaíso (TCV).

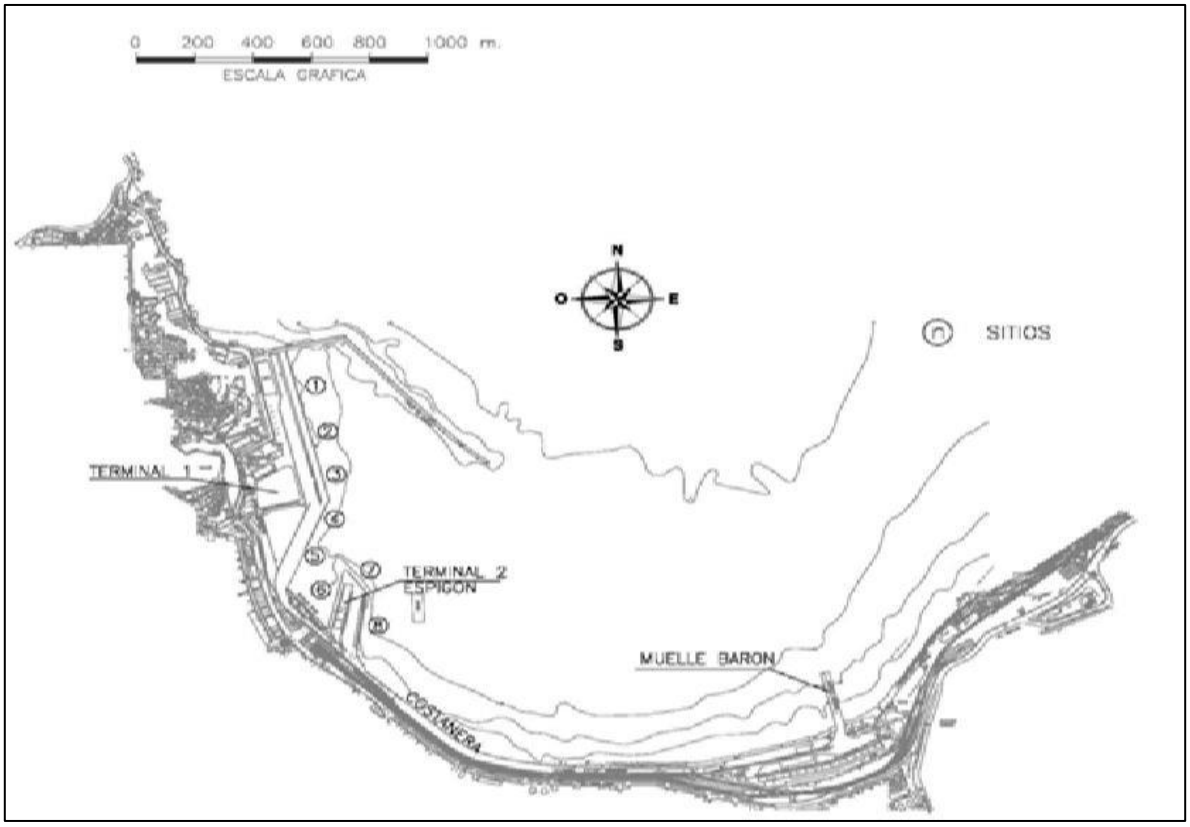

Ilustración 3: *Ubicación de sitios Puerto de Valparaíso.* (Fuente Puerto Valparaíso).

Estos ocho sitios, se encuentran protegidos por un Molo de Abrigo, obra que se inicia desde la Punta Duprat, se interna en dirección Noreste hasta una distancia de 300 metros y continúa en dirección Sureste en una longitud de 700 metros. La longitud total de sitios de atraque es de 1.607,7 metros y se presenta a continuación en la Tabla 2:

Terminal			1				2	
Sitio[4]	1	2	3	4	5	6	7	8
Longitud [m]	188,5	200	231,5	200	182,7	245	120	240
Longitud Continua [m]		620		382,7		--	--	--
Profundidad [m][5]	14,5	14,5	14,5	10	10	9	7	9
Ancho del Delantal [m][6]	26,4	26,4	26,4	19,5	19,5	14,4	14,4	14,4
Número de grúas		7					1	
Año de Construcción	1998-1999	1997-1998	1996-1997	1922-1932	1922-1932	1922-1932	1922-1932	1922-1932
Calado Máximo Autorizado [m][7]	13,8	13,8	13,8	9,4	8,5	8,5	6,2	8,4
Tipo de Estructura	Tablero Hormigón Armado sobre Pilotes Tubulares Metálicos	Tablero Hormigón Armado sobre Pilotes Tubulares Metálicos	Tablero Hormigón Armado sobre Pilotes Tubulares Metálicos	Tablero apoyado en Pilas de Hormigón y Muro de Bloques de Hormigón	Muro de Bloques de Hormigón	Muro de Bloques de Hormigón	Muro de Cajones de Hormigón	Muro de Bloques de Hormigón

Tabla 2: *Caracteristicas sitios de atraque y equipamiento Puerto Valparaíso*. (Fuente Puerto Valparaíso).

En cuanto al equipamiento para la transferencia y manejo de cargas, Puerto Valparaíso, según lo que expresa en su Memoria Anual del año 2015, cuenta con lo detallado en los siguientes puntos:

- Sitios 1, 2 y 3:
  - grúas pórtico marca Kocks, capacidad de levante 50[ton]bajo spreader, trocha 24,38[m], alcance 39,0 [m], propiedad de TPSV.
  - grúas pórtico marca ZPMC, capacidad de levante 50 [ton] bajo spreader, trocha 24,38 [m], alcance 50 [m], propiedad de TPSV.
  - 1 grúa pórtico marca ZPMC, capacidad de levante 50 [ton] bajo spreader, trocha 24,38 [m], alcance 50 [m]; doble boom; propiedad de TPSV.
  - 2 grúas móvil GOTTWALD, modelo HMK 280E y 300E, capacidad máxima 100 [ton], alcance 50 [m], propiedad de TPSV.

- Espigón y Costanera:
  - 1 grúa móvil marca GOTTWALD, modelo HMK 6407, capacidad máxima 100 [ton], alcance 51 [m], propiedad de TCVAL.
- Otros equipos:
  - 12 equipos para apilamiento de contenedores en patio tipo RTG, marca Kalmar, capacidad máxima 32,5 [ton] bajo spreader, 26,1 metros de trocha (ancho 7+1)[7], 5 sobre 1 en altura, propiedad de TPSV.
  - equipos de patio para manejo de contenedores, Reack Stacker KALMAR, propiedad de TCVAL.
  - grúas horquilla diésel, marca Komatsu, propiedad de TCVAL.
  - 27 grúas horquilla gas, marca Komatsu, propiedad de TCVAL.
  - equipos de patio para manejo de contenedores, tipo Reach-Stacker, propiedad TPSV.
  - 5 equipos para apilamiento de contenedores vacíos tipo Empty Handler, propiedad de TPSV.

En lo que respecta a los niveles de cargas transferidas del Puerto de Valparaíso, según lo que se informa a través de su Memoria Anual 2015, en el año 2013, se movilizó un total de 11.080 [Mton], de las cuales el 84% del total correspondió a carga contenedorizada y el 16% restante a carga de tipo fraccionada. En el siguiente cuadro se resume la transferencia registrada en el Puerto de Valparaíso los últimos trece años, siendo el último registro el año 2014:

[7] El ancho corresponde a siete contenedores más el espacio para que ingrese el camión.

Tipo de Carga	Contenedorizada	Fraccionada	Total
2001	2.956	1.513	4.469
2002	3.065	1.601	4.665
2003	3.379	1.725	5.104
2004	4.012	2.041	6.053
2005	3.836	1.864	5.699
2006	6.218	1.753	7.971
2007	8.438	1.275	9.714
2008	9.527	1.372	10.899
2009	7.003	973	7.976
2010	8.890	1.261	10.151
2011	9.305	1.229	10.534
2012	8.814	1.554	10.368
2013	8.424	1.834	10.258
2014	9.302	1.778	11.080

Tabla 3: *Transferencia histórica del Puerto de Valparaíso medida en miles de toneladas [Mton]*. (Fuente Puerto Valparaíso).

En lo que respecta a la capacidad portuaria actual del Puerto de Valparaíso, es importante destacar que ésta se determina según el volumen de carga que el puerto es capaz de transferir en el periodo de un año y se establece considerando la capacidad del frente de atraque, áreas de respaldo, puertas de acceso y vías de conexión con el hinterland. Esta capacidad estará definida por aquel componente que presente el rendimiento más restrictivo expresado en toneladas por año.

Para el cálculo de la capacidad portuaria actual del Puerto de Valparaíso, se han realizado diferentes consideraciones que se encuentran expresadas claramente en la Memoria Anual 2015 de Puerto Valparaíso y, de la cual, se han rescatado la siguiente tabla resumen de capacidad de acopio y capacidad de transferencia, respectivamente:

Terminal	Capacidad Ton/Año
1	9.537.716
2	2.590.156

Tabla 4: *Capacidad de acopio actual por terminal medido en toneladas años.* (Fuente Puerto Valparaíso).

Sitio	Ocupación	Capacidad
1	55%	3.268.709
2	55%	3.722.441
3	55%	3.946.728
4 y 5	55%	770.834
Subtotal T1		11.708.712
6	55%	432.487
7	55%	0,0
8	55%	725.948
Subtotal T2		1.158.435
Total		12.867.147

Tabla 5: *Capacidad de transferencia de carga anual en Puerto Valparaíso medida en toneladas año.* (Fuente Puerto Valparaíso).

Como se mencionó anteriormente, la capacidad está definida por aquella actividad que presente el menor rendimiento. Para el caso de Terminal 1, su capacidad viene determinada por su capacidad de acopio, la cual corresponde a 9.537.716 [ton/año] y, para el caso de Terminal 2, su actividad restrictiva corresponde a la capacidad de transferencia, siendo esta 1.158.435 [ton/año]. Por lo tanto, de lo anterior, se puede estimar que la capacidad actual del Puerto de Valparaíso corresponde, aproximadamente, a 10.696.151 toneladas anuales.

6.4 Puerto de San Antonio hoy

La Empresa Portuaria San Antonio administra el denominado Puerto San Antonio, el que se encuentra ubicado en la V Región de Chile, Provincia San Antonio, Comuna y Ciudad

del mismo nombre. La provincia de San Antonio limita al Norte con la Provincia de Valparaíso, al Este con la Región Metropolitana de Santiago, al Sur con la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins y al Oeste con el Océano Pacífico. La ciudad de San Antonio se encuentra a 109 kilómetros al Oeste de Santiago. Cuenta con una población, según el último censo realizado en el año 2012, de 87.697 personas, concentrándose en el área urbana un 95,7%. El Puerto de San Antonio se ubica al norte de la desembocadura del río Maipo, protegido por un molo de abrigo, lo que permite que tenga aguas abrigadas para las operaciones portuarias en un gran porcentaje de los días del año. Sus coordenadas geográficas, correspondientes a un punto de referencia cercano a la Gobernación Marítima, son: Latitud 33°34'41'' S y Longitud 71°36'47'' W (Empresa Portuaria San Antonio, 2013).

La infraestructura del puerto está formada por cuatro frentes de atraque: Terminal Molo Sur (sitios 1, 2 y 3), Terminal Espigón (sitios 4, 5, 6 y 7), Terminal Norte (sitio 8) y Terminal Policarpo Toro (sitio 9). Las características de los sitios de atraque se encuentran resumidas en la Tabla 6, mientras que la Ilustración 4 indica la ubicación de los sitios y los terminales antes mencionados.

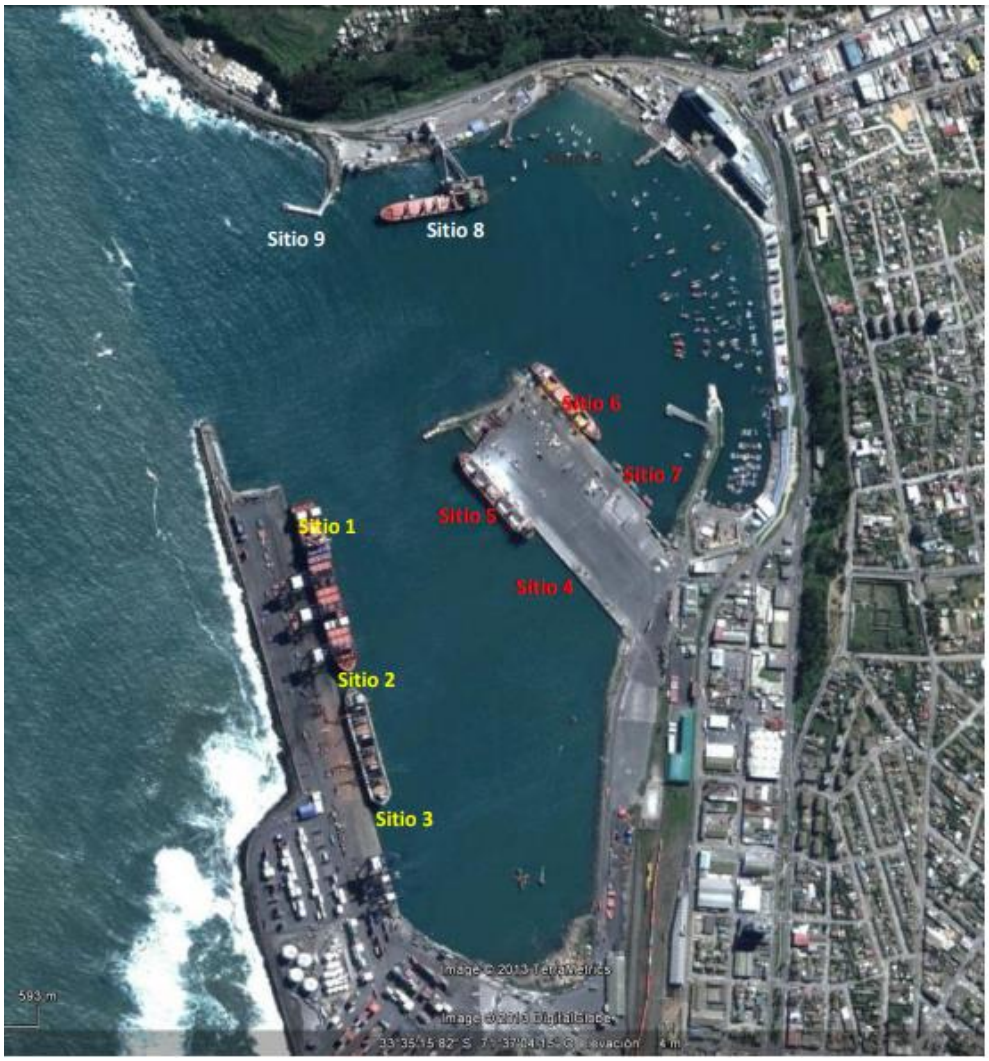

Ilustración 4: *Ubicación de los Sitios y Terminales de Puerto San Antonio*. (Fuente Empresa Puerto de San Antonio).

Frente de Atraque	Sitio	Longitud (m)	Eslora Máxima (m)	Calado Máximo (m)	Ancho Delantal (m)	Especialización		Estado del Sitio	Estado del Delantal	Estado Área de Respaldo
Molo Sur	1	769	363	13,5	35	E/D	Contenedor	O	O	O
	2		253	11,34	35	E/D	Contenedor Canaleta (*)	O	O	O
	3		253	11,34	35	E/D	Contenedor Canaleta (*)	O	O	O
Espigón	4	341	237	9,45	35	E/D	Multipropósito	O	O	O
	5			9,45	35	E/D	Multipropósito	O	O	O
	6	321	190-225	7,93	35	E/D	Multipropósito	OR	OR	OR
	7		120	6,28	35	E/D	Multipropósito	OR	OR	OR
Terminal Norte	8	186	230	11	-	D	Granel Sólido	O	-	O
Policarpo Toro	9	62,3	190	10	-	E/D	Granel Líquido	O	-	O

Simbología: E: Embarque | O: Operable
D: Descarga | OR: Operable con Restricciones

Notas: (*) En este sitio, se emplaza una canaleta con ductos para la transferencia de graneles líquidos y ácido sulfúrico.

Tabla 6: *Características de los Sitios de Atraque de Puerto San Antonio.* (Fuente Empresa San Antonio).

El Terminal Molo Sur corresponde a un dique de 900 metros de longitud por 90 metros de ancho aproximadamente, y cuenta con tres sitios de atraque denominados sitios 1, 2 y 3, que, en conjunto con sus respectivas áreas de respaldo, abarcan una superficie aproximada de 30 hectáreas. Los sitios de atraque del Molo Sur, en su conjunto permiten transferir principalmente carga del tipo fraccionada y contenedorizada, por medio de seis grúas pórtico para contenedores, instaladas sobre un tablero de hormigón armado apoyado sobre pilotes tubulares metálicos. La conexión entre el tablero y la explanada se materializa mediante una plataforma biarticulada capaz de absorber los asentamientos diferenciales entre la zona de pilotes y el muro lateral de contención que se apoya sobre los rellenos. En virtud del mecanismo previsto en la Ley N° 19.542, que modernizó el sector portuario estatal, el frente de atraque Molo Sur fue entregado en concesión, a partir del 1 de enero del año 2000, a San Antonio Terminal Internacional S.A. (STI) para su administración, desarrollo,

mantenimiento y explotación. Actualmente, el Concesionario de dicho frente de atraque ha implementado un proyecto de ampliación, que consistió en la extensión del muelle entregado en concesión en 204 metros hacia el norte (constituyendo un Frente de Atraque continuo de 769 metros), junto con instalaciones de tierra y equipamiento necesario para el manejo de todo tipo de carga. Esta obra tiene como objetivo la transferencia de contenedores. Además, se consideró la ejecución de un dragado a la cota –15 metros NRS en una extensión aproximada de 300 metros por 200 metros de ancho. Asimismo, el proyecto contempló la habilitación de dos sistemas de embarque de graneles líquidos en los sitios 2 y 3 los cuales se encuentran en operación (Empresa Portuaria San Antonio, 2013).

El Terminal Costanera Espigón es un segundo frente de atraque entregado en concesión, en este caso a la empresa Puerto Central (PCE) en noviembre del año 2011, que lo opera en modalidad mono-operador. Posee dos bordes de atraque: uno correspondiente a los sitios 4 y 5, y el otro a los sitios 6 y 7. En todos ellos se transfieren graneles sólidos y líquidos, carga contenedorizada y fraccionada. El frente de atraque poniente, sitios 4 y 5, tiene una longitud de 341 metros, con un calado máximo autorizado de 9,45 metros. El sitio 4 está construido con un tablestacado y rellenos, mientras que el sitio 5, con pilotes de acero y una plataforma de hormigón armado. En ejecución se encuentra un proyecto de dragado a la cota -12 [mNRS], cuyo término está considerado para mediados del año 2013. Los sitios 6 y 7, en el frente de atraque oriente, tienen en total una longitud de 321 metros. Están construidos con una losa de hormigón armado. Los calados máximos autorizados de los sitios son 7,93 y 6,28 metros, respectivamente. Estos sitios se encuentran operativos, pero con restricciones, debido a los daños provocados por el sismo de 1985 (Empresa Portuaria San Antonio, 2013).

En lo que respecta a los equipos con los que cuenta Puerto San Antonio (a la fecha de la elaboración del Plan Maestro), estos se describen en la siguiente tabla:

Terminal	Equipo	Cantidad	Capacidad	Uso
Molo sur	Grúa tipo Gantry	2	40 Ton.	Transferencia de contenedores
	Grúa tipo Gantry	4	60 Ton.	Transferencia de contenedores
	Grúa tipo RTG	2	30 Ton.	Apilamiento de contenedores
	Maquinaria Reachstacker	13	Full	Apilamiento de contenedores
	Maquinaria Top Lifter	9	Full	Apilamiento de contenedores
	Maquinaria Top Lifter	3	Vacíos	Apilamiento de contenedores
	Grúa móvil tipo Gottwald 300E	1	100 Ton.	Transferencia y carga de contenedores
Costanera - Espigón	Grúa móvil Liebherr MHC LHM 400	2	104 Ton.	Transferencia y carga de contenedores
	Maquinaria Reachstacker	3	Full	Apilamiento de contenedores
	Maquinaria Top Lifter	1	Vacíos	Apilamiento de contenedores
Puerto Panul	Grúa Level Luffing o "cuello de garza"	1	Pala Chica 14 Ton.	Descarga de graneles sólidos
			Pala Grande 20 Ton.	
	Planta mecanizada Applevage	1	7 Ton.	Descarga de graneles sólidos

Tabla 7: *Equipos de Puerto San Antonio.* (Fuente Empresa Puerto San Antonio).

En el año 2012, Puerto San Antonio movilizó un total de diez y seis millones seiscientos setenta y siete mil cuatrocientos quince toneladas (16.677.415), de las cuales un 63,8% del total correspondió a carga contenedorizada, un 20,9% a graneles sólidos, un 7,5% a graneles líquidos y el 7,8% restante a carga fraccionada. La transferencia de carga por el puerto de San Antonio ha experimentado un incremento sostenido durante la última década convirtiéndolo en el puerto N° 1 de Chile. Del total de carga transferida, la carga contenedorizada ha sido la de mayor crecimiento (Empresa Portuaria San Antonio, 2013).

Año	Contenedores	Carga Fraccionada	Graneles Sólidos	Graneles Líquidos	Total	Incremento Anual
1990	251.678	673.109	1.075.666	132.232	2.132.685	
1991	394.234	558.129	1.290.245	135.103	2.377.711	10,3%
1992	367.408	558.223	1.742.348	168.778	2.836.757	16,2%
1993	885.093	525.778	1.915.487	174.446	3.500.804	19,0%
1994	1.325.867	627.778	2.013.411	189.483	4.156.539	15,8%
1995	2.482.002	959.132	2.015.443	179.699	5.636.276	26,3%
1996	3.100.952	1.157.569	1.993.616	187.491	6.439.628	12,5%
1997	3.742.280	1.076.197	1.630.505	163.994	6.612.976	2,6%
1998	3.946.874	940.803	2.259.368	212.179	7.359.224	10,1%
1999	3.935.405	845.211	3.001.488	514.876	8.296.980	11,3%
2000	4.604.180	1.046.606	2.952.458	562.457	9.165.700	9,5%
2001	4.270.651	1.036.593	2.735.445	809.621	8.852.310	-3,5%
2002	4.724.405	772.208	2.831.578	946.317	9.274.509	4,6%
2003	5.499.885	681.922	2.530.008	1.037.854	9.749.668	4,9%
2004	6.770.295	613.297	2.418.029	950.388	10.752.009	9,3%
2005	7.987.169	695.780	2.336.185	1.143.632	12.162.765	11,6%
2006	6.748.475	705.756	3.705.312	1.103.932	12.263.476	0,8%
2007	6.564.856	1.027.002	4.062.086	986.945	12.640.889	3,0%
2008	7.051.791	1.314.169	3.721.765	1.112.636	13.200.362	4,2%
2009	7.010.838	943.678	3.007.974	1.147.488	12.109.977	-9,0%
2010	8.527.786	1.514.633	3.253.506	1.139.547	14.435.472	16,1%
2011	9.337.061	1.699.397	3.465.905	1.208.237	15.710.600	8,1%
2012	10.638.270	1.294.419	3.492.674	1.252.052	16.677.415	5,8%

Tabla 8: *Transferencia Histórica Puerto San Antonio (cifras en toneladas)*. (Fuente Elaboración Propia).

Finalmente, en lo que respecta a la capacidad de transferencia del puerto, según lo planteado en su Plan Maestro (2013), se estima que la capacidad óptima del terminal Molo Sur es del orden de 1.100.000 TEUs anuales. Si se considera la ampliación de ese terminal a 900 metros de muelle y 40 hectáreas de respaldo, la capacidad se estima en 1.300.000 TEUs anuales. La capacidad actual estimada del Terminal Costanera Espigón, considerando sus sitios de atraque es de 130.000 TEUs anuales.

Terminal	TEUS (*)
Situación Actual	
Molo Sur	1.100.000
Costanera - Espigón	130.000
Total	**1.230.000**
Con Ampliaciones	
Molo Sur	1.300.000
Costanera - Espigón	1.300.000
Total	**2.600.000**

Terminal	Granel Sólido [ton]
Sitio 8	2.100.000

Terminal	Granel Líquido [ton]
Sitio 9	785.000

(*) Estos terminales podrán transferir carga fraccionada y graneles siempre que exista disponibilidad de sitios de atraque.

Tabla 9: *Capacidad de Transferencia de Carga Puerto San Antonio*. (Fuente Empresa Puerto San Antonio).

7 MARCO TEÓRICO

7.1 Benchmarking

El benchmarking es una técnica o herramienta de gestión que consiste en tomar como referencia los mejores aspectos o prácticas de otras empresas, ya sean competidoras directas o pertenecientes a otro sector, y adaptarlos a la propia empresa realizándoles adaptaciones y/o mejoras (Arturo, 2015). Este proceso ayuda a obtener nuevas ideas, mediante la comparación de aspectos de la propia empresa con los de los líderes o los competidores más fuertes del mercado. Según la definición de David T. Kearns, Director General de Xerox Corporation, "el benchmarking es un proceso sistemático y continuo de medir productos, servicios y prácticas contra los competidores reconocidos como líderes en su sector." En resumen, el benchmarking consiste en tomar como referencia a los mejores y adaptar sus métodos y estrategias a los de la propia empresa.

Para el desarrollo de esta tesis, se ha optado por generar un benchmarking que permita analizar los niveles de eficiencia del Puerto de Valparaíso y San Antonio en contraste a los de sus máximos competidores, los mayores Puertos de Clase Mundial, según el manejo y utilización de recursos. Esta comparación se realiza mediante Modelos de Programación Lineal propuestos por el Análisis Envolvente de Datos (DEA), por lo que, primeramente, se procede a introducir, de manera conceptual, esta técnica matemática llamada programación lineal.

7.2 Programación Lineal

La programación lineal corresponde a un algoritmo matemático, a través del cual se resuelven situaciones reales en las que se pretende identificar y resolver dificultades para aumentar la productividad respecto a los recursos, aumentando así los beneficios. El objetivo

primordial de la programación lineal es optimizar, es decir, maximizar o minimizar funciones lineales en varias variables reales, con restricciones lineales, optimizando una función objetivo también lineal (Salazar, s.f.).

Esta técnica es muy utilizada en la dirección de operaciones, siendo uno de los grandes avances científicos que se dieron en la primera mitad del siglo XX. Su campo de estudio es la asignación óptima de los recursos limitados entre diferentes actividades empresariales como, por ejemplo, la selección de la mejor combinación de factores que maximicen el beneficio; el desarrollo de un programa de producción para hacer frente a la demanda esperada, minimizando los costos asociados; la determinación de la distribución de los productos desde los almacenes hasta sus puntos de venta, entre muchos más (Masa, s.f.).

Con el fin de poder desarrollar un modelo de programación lineal de manera correcta, es esencial identificar y determinar los elementos básicos de un modelo matemático: función objetivo, variables y restricciones.

La función objetivo tiene una estrecha relación con la pregunta general que se desea responder, puede tener criterio de maximización o minimización y se expresa de la siguiente manera:

$$Max! = \sum_{i=1}^{N} f_i * X_i \tag{1}$$

$$Min! = \sum_{i=1}^{N} f_i * X_i \tag{2}$$

Donde $f_i: coeficientes$

Las variables de decisión son las incógnitas del problema. Son factores controlables del sistema que se está modelando y, como tal, estas pueden tomar diversos valores posibles,

de los cuales se precisa conocer su valor óptimo, el cual contribuya con la consecución del objetivo de la función general del problema.

Las restricciones, expresadas como ecuaciones y/o inecuaciones lineales, representan todo aquello que limita la libertad de los valores que pueden tomar las variables de decisión.

Tradicionalmente, la resolución de problemas de programación lineal se realiza mediante el Método Simplex.

La programación lineal es una técnica muy utilizada en el área de gestión de operaciones y distintos autores la han empleado, con el objetivo de lograr maximizar los beneficios, o bien minimizar los costos, de unidades específicas. A. Charnes, W.W. Cooper y E. Rhodes desarrollan esta técnica creando un modelo, denominado Análisis Envolvente de Datos, capaz de maximizar la eficiencia de unidades mediante el método de benchmarking.

7.3 Análisis Envolvente de Datos

El Análisis Envolvente de Datos es una técnica no paramétrica para la medición de la eficiencia relativa de unidades organizacionales en situaciones donde existen múltiples entradas y/o salidas. Lo orígenes de DEA se remontan a los años 70, cuando A. Charnes, W.W. Cooper y E. Rhodes desarrollaron la técnica extendiendo el trabajo de Farrell (1957) (Restrepo, s.f.).

Desde su introducción, la investigación en DEA ha sido prolífica, tanto en el ámbito teórico como en el aplicado y es posible encontrar diversos trabajos realizados en distintas áreas como: medición del desempeño de instituciones educativas, benchmarking en procesos logísticos, comparación de sucursales de oficinas regionales de bancos, regulación de

servicios públicos, entre muchas otras. Esto ha hecho de DEA una de las áreas de la investigación de operaciones más aceptada, relevante y difundida (Restrepo, s.f.).

DEA estudia la productividad y la define como la suma ponderada de salidas sobre la suma ponderada de entradas:

$$Productividad = \frac{Suma\ ponderada\ de\ Salidas}{Suma\ ponderada\ de\ Entradas} \tag{3}$$

Las entidades que son evaluadas con DEA se conocen como DMU[8] (*Decision Making Unites*), término que permite referirse a un grupo amplio de unidades organizacionales que pueden ser personas, empresas, países, etc. (Restrepo, s.f.).

En DEA se optimiza para cada DMU un modelo de programación matemática con la finalidad de construir una frontera de eficiencia, de tal forma que las unidades que determinan la frontera son denominadas eficientes y aquellas que no permanecen sobre la misma, son consideradas ineficientes. Una unidad será eficiente si y sólo si no es posible incrementar las cantidades de producto manteniendo fijas las cantidades de insumos utilizadas, ni es posible disminuir las cantidades de insumos empleadas sin alterar las cantidades de producto obtenidas (Londoño y Giraldo, 2009).

Adicionalmente, DEA permite comparar cada unidad ineficiente con aquellas que son eficientes, con el fin de establecer la cuantía, en términos absolutos o relativos, de la reducción de entradas y/o incremento de las salidas, que la unidad ineficiente debería tratar de promover para convertirse en eficiente (Londoño y Giraldo, 2009).

Dentro de DEA existen dos orientaciones del modelo: input orientado y output orientado. La primera orientación busca, dado el nivel de outputs, la máxima reducción

[8] Una *DMU* es cualquier unidad que puede evaluarse en términos de sus habilidades para convertirse en insumo o producto (Cooper, Seiford y Zhu, 2004;3).

proporcional de los inputs permaneciendo en la frontera de posibilidades de producción, mientras que la orientación basada en los outputs busca, dado el nivel de inputs, el máximo incremento proporcional de los outputs permaneciendo dentro de la frontera de posibilidades de producción.

7.3.1 Modelo DEA-CCR

Este modelo fue desarrollado por Charnes, Cooper y Rhodes en 1978 con base en los conceptos de eficiencia inicialmente planteados por Farrell en 1957. El Modelo CCR proporciona medidas de eficiencia tipo radial, orientada a salidas y/o entradas y rendimientos constantes a escala, supone convexidad y libre disposición de entradas.

7.3.1.1 Modelo DEA-CCR en forma fraccional

El DEA, estudiado desde la perspectiva de un modelo output orientado, define la eficiencia técnica (relativa) de cada una de las unidades como el cociente entre la suma ponderada de los inputs ($\sum_{i=1}^{m} v_i x_{i0}$) y la suma ponderada de los outputs ($\sum_{r=1}^{s} u_r y_{r0}$). Por lo tanto, el modelo DEA-CCR output orientado en términos de cociente queda expresado como:

$$
\begin{aligned}
&(FP_0)\ \underset{u,v}{\text{Min}}\, h_0 = \frac{\sum_{i=1}^{m} v_i x_{i0}}{\sum_{r=1}^{s} u_r y_{r0}} \\
&s.a. \\
&\frac{\sum_{i=1}^{m} v_i x_{i0}}{\sum_{r=1}^{s} u_r y_{r0}} \geq 1 \qquad j = 1,2,\dots,n \\
&u_r, v_i \geq 0
\end{aligned}
\tag{4}
$$

Donde:

- n representa la cantidad de unidades estudiadas (j=1,2,…,n), donde cada una de ellas utiliza los mismos inputs (en diferentes cantidades) para obtener los mismos outputs (en diferentes cantidades).
- $x_{ij}(x_{ij} \geq 0)$ es la cantidad de inputs i consumidas por las j-ésima unidad.
- x_{i0} es la cantidad de inputs i consumido por la unidad evaluada, DMU_0.
- $y_{ij}(y_{ij} \geq 0)$ es la cantidad de producto r producida por la j-ésima unidad.
- u_r (r=1,2,...,s) y v_i (i=1,2,…,m) son los pesos o multiplicadores de los productos e insumos respectivamente.
- $\sum_{i=1}^{m} v_i x_{i0}$: es la suma ponderada de los insumos y se conoce como input virtual.
- $\sum_{r=1}^{s} u_r y_{r0}$: es la suma ponderada de los productos y se conoce como output virtual.

El modelo FP_0, problema no lineal, pretende obtener el conjunto óptimo de pesos (o multiplicadores) u_r y v_i que maximicen la eficiencia relativa h_0 de la $unidad_0$ definida como el cociente entre la suma ponderada de outputs y la suma ponderada de inputs, sujeto a la restricción de que ninguna unidad puede tener una puntuación de eficiencia menor a uno usando estos mismos pesos (Jaime, 2016).

7.3.1.2 Modelo DEA-CCR en forma multiplicativa

El modelo DEA-CCR en forma fraccional también puede escribirse de manera multiplicativa reemplazando el problema fraccional (FP_0) por uno lineal (LP_0), seleccionando la solución (μ,δ) para que $\sum_{r=1}^{s} \mu_r y_{ro} = 1$ (output virtual normalizado a la

unidad). Realizando este cambio de variable en el modelo fraccional, se obtiene un problema lineal equivalente, el cual puede escribirse como:

$$(LP_0)\ \underset{\mu,\delta}{\text{Min}}\ \omega_0 = \sum_{i=1}^{m} \delta_i\, x_{i0}$$

$$s.a.$$

$$\sum_{r=1}^{s} \mu_r y_{r0} = 1 \qquad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{m} \delta_i\, x_{ij} - \sum_{r=1}^{s} \mu_r y_{rj} \geq 0 \qquad j = 1,2,\dots,n$$

$$\mu_r, \delta_i \geq \varepsilon \qquad con\ \varepsilon \geq 0$$

La solución del problema dado por el modelo anterior debe ser resuelto para cada una de las unidades consideradas y determinará los valores óptimos de los pesos $\mu_r\ y\ \delta_i$, es decir, μ_r^* y δ_i^*.

Una vez resuelto el problema, se considerará a la $unidad_0$ CCR-eficiente (o eficiente) si ω_0^*=1 y existe al menos una solución óptima (μ^*, δ^*), con $\mu^* > 0$ y $\delta^* > 0$. En caso contrario, la $unidad_0$ es CCR-ineficiente.

Como se menciona anteriormente, en la forma multiplicativa (LP_0), el output virtual se encuentra normalizado a la unidad, es decir, $\sum_{i=1}^{m} \mu_r\, y_{r0} = 1$, mientras que el input virtual es igual a la puntuación de eficiencia, es decir, $\sum_{i=1}^{m} \delta_i x_{i0} = \omega_0$. Para la unidad evaluada, los valores de inputs y outputs virtuales expresan información sobre la importancia que una unidad atribuye a determinados input y outputs con el objetivo de obtener la máxima puntuación de eficiencia.

En consecuencia, es posible determinar la importancia o contribución de cada output ($\mu_r^* y_{r0}$) respecto del total ($\sum_{r=1}^{s} \mu_r y_{r0} = 1$), así como la contribución de cada input ($\delta_i^* x_{io}$) a la puntuación de eficiencia ($\sum_{i=1}^{m} \delta_i x_{i0} = \omega_0$). Estos resultados proporcionan indicación de la medida en que las variables output e input han sido usadas en la determinación de la eficiencia, jugando un papel como medida de la sensibilidad de las puntuaciones de eficiencia.

Así cómo es posible identificar aquellos inputs y outputs que contribuyen de mayor manera en la determinación de la eficiencia de cada puerto, también es posible identificar, para cada unidad ineficiente, aquellos competidores eficientes que fuerzan a la $unidad_0$ a ser ineficiente. En caso de que una unidad sea ineficiente, entonces debe existir al menos una restricción (o unidad) de:

$$\sum_{r=1}^{s} \mu_r y_{rj} - \sum_{i=1}^{m} \delta_i x_{ij} \leq 0 \tag{6}$$

para la cual el peso (μ^*, δ^*) produce la igualdad de dicha restricción. Por lo tanto, sea el conjunto dado por:

$$E_0' = \left\{ \sum_{r=1}^{s} \mu_r y_{rj} = \sum_{i=1}^{m} \delta_i x_{ij} \right\}; j = 1,2, \dots, n \tag{7}$$

El subconjunto E_0 de E_0', compuesto por las unidades eficientes, es llamado conjunto de referencia de la unidad evaluada, $unidad_0$, siendo la existencia de estas unidades eficientes las que fuerzan a la $unidad_0$ a ser ineficiente.

7.3.1.3 Modelo DEA-CCR en forma envolvente

Asociado a cada problema lineal, existe otro problema de programación lineal denominado dual (*PD*), que posee importantes propiedades y relaciones notables con respecto al problema lineal original, el cual se denomina como problema primal (*PP*).

El problema dual tiene tantas variables como restricciones y tantas restricciones como variables tiene el problema primal.

La principal ventaja que tiene el problema dual es que puede ser utilizado para determinar la solución del problema primal.

Si se asocia la variable θ con la restricción que normaliza el output virtual y las variables duales λ a las otras restricciones, el problema dual asociado al modelo DEA-CCR output orientado primal (EP_0) viene dado de la siguiente manera:

$$
\begin{aligned}
&(EP_0) \quad \underset{\theta,\lambda}{\text{Max}}\ z_0 = \theta \\
&s.a. \\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j x_{ij} \leq x_{i0} \quad ; \ \forall i \\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j y_{rj} \geq \theta\, y_{r0} \quad ; \ \forall r \\
&\lambda_j \geq 0 \\
&\theta\, libre
\end{aligned}
\tag{8}
$$

Donde:

- λ_j representa el peso de la unidad j.
- $1/_{\theta}$ denota la puntuación de eficiencia técnica de la $unidad_0$.

Nuevamente, el problema dado por el modelo EP_0 debe ser resuelto para cada una de las *n* unidades. Como el problema lineal DEA-CCR primal input orientado (LP_0) tiene *n+1* restricciones y el problema lineal DEA-CCR dual input orientado (EP_0) tiene *s+m* restricciones, y como el número de unidades evaluadas suele ser mucho mayor que le número total de inputs y outputs, es más conveniente resolver el problema del modelo DEA-CCR dual.

7.3.1.4 Caracterización de la eficiencia y valores de holguras

Si la solución del problema dado por el modelo (EP_0) resulta ser $\theta^* = 1$, entonces la unidad que está siendo evaluada es eficiente, de acuerdo a la definición de Farrell (1957), en relación con las otras unidades, puesto que no es posible encontrar ninguna unidad o combinación lineal de unidades que obtenga al menos el output de la $unidad_0$ utilizando menos factores. En caso contrario, la unidad es ineficiente, es decir, si $\theta^* > 1$ es posible obtener, a partir de los valores λ_j^* obtenidos en la resolución del modelo (EP_0) una combinación de unidades que "funcione mejor" que la unidad que ha sido evaluada.

Tal y como está definido, el problema planteado en el modelo (EP_0) es resuelto en una única etapa, de forma que las variables de holgura s_r^{+*} (variable de holgura output) y s_i^{-*} (variable de holgura input) son obtenidas de forma residual. Por tanto, es posible que no se satisfaga la condición de eficiencia de Pareto-Koopmans, más restrictiva que la anterior condición de eficiencia de Farell, según la cual una unidad es eficiente si y sólo si $\theta^* = 1$ y todas las holguras son cero, en caso contrario la unidad es calificada como ineficiente.

Así, si en el óptimo resulta que $s_r^{+*} > 0$, esto significa que sería posible incrementar el output *r* de la $unidad_0$ en la cantidad dada por esa holgura, con lo que la $unidad_0$ debería producir output *r* en la cantidad $(y_r + s_r^{+*})$ en lugar de en la cantidad observada y_r.

Análogamente, si se obtuviese una holgura input tal que $s_i^{-*} > 0$, esto indicaría que el input *i* de la unidad evaluada podría ser reducido en la cantidad dada por s_i^{-*}, de tal forma que el input i debería ser usado en la cantidad $(x_i - s_i^{-*})$ en lugar de en la cantidad x_i.

7.3.2 Método de Dos Etapas

Existen casos en que se obtienen unidades débilmente eficientes, esto quiere decir que la $unidad_0$ evaluada cumple con $\theta^* = 1$ y $s_r^{+*} \neq 0$ y/o $s_i^{-*} \neq 0$ para alguna *i* y *r* en alguna solución óptima alterna. Para evitar la existencia de eficiencia débil, se plantea una segunda etapa para la evaluación de la eficiencia de las unidades evaluadas, la cual consiste en encontrar una solución que maximice la suma de excesos en las entradas y faltantes de salida, mientras $\theta = \theta^*$ se mantiene fijo y queda expresada, bajo el criterio de output orientado, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
&\underset{\theta,\lambda,s_i^-,s_r^+}{\text{Max}} \sum_{i=1}^{m} s_i^- + \sum_{r=1}^{s} s_r^+ \\
&s.a. \\
&\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\lambda_j + s_i^- = x_{i0} \qquad i = 1,2,\dots,m \\
&\sum_{j=1}^{n} y_{rj}\lambda_j - s_r^+ = \theta * y_{r0} \qquad r = 1,2,\dots,s \\
&\lambda_j, s_i^-, s_r^+ \geq 0 \qquad \forall \text{ i, j, r}
\end{aligned} \tag{9}$$

Como se menciona anteriormente, la primera etapa tiene como objetivo determinar el valor óptimo de θ, es decir, el máximo aumento proporcional en los outputs que podría ser logrado por la unidad estudiada, dado los niveles de inputs y, a partir del óptimo θ^* obtenido, en esta segunda etapa, se ajustan los inputs ($\theta^* x_0$) y se procede a maximizar las holguras

inputs y outputs para mover radialmente el punto proyectado en la etapa uno, que satisface la condición de eficiente de Farrell, a un punto sobre la envolvente eficiente que satisfaga la condición de optimalidad de Pareto-Koopmans.

Finalmente, es frecuente formular lo problemas dados por los modelos (8) y (9) en un único modelo de la siguiente manera:

$$\underset{\theta,\lambda,s_i^-,s_r^+}{\text{Max}}\ z_0 = \theta + \varepsilon\left(\sum_{i=1}^{m} s_i^- + \sum_{r=1}^{s} s_r^+\right)$$

$$\text{s. a.}$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\lambda_j + s_i^- = x_{i0} \qquad i = 1,2,\dots,m \tag{10}$$

$$\sum_{j=1}^{n} y_{rj}\lambda_j - s_r^+ = \theta * y_{r0} \qquad r = 1,2,\dots,s$$

$$\lambda_j, s_i^-, s_r^+ \geq 0 \qquad \forall\ \text{i, j, r}$$

La resolución de este este modelo de dos etapas, dará una solución óptima (θ^*, s_i^-, s_r^+), de tal forma que, cuanto mayor sea θ^*, más ineficiente será la unidad evaluada. Y una unidad será calificada como técnicamente eficiente si y sólo si $\theta^* = 1$ y todas las holguras son nulas ($s_i^- = 0, s_r^+ = 0$). En caso contrario, la unidad será ineficiente. Siempre considerando que la eficiencia técnica output de la unidad evaluada será igual a $1/\theta^*$.

7.3.3 Modelo BBC

Una de las principales consideraciones al modelo CCR, es el hecho de que el modelo calcula la eficiencia de las DMUs bajo el supuesto de retorno a escala constante. De esta manera, la dimensión de las unidades que se comparan debe ser parecida, es decir, las DMUs que no son eficientes han de tener la capacidad para alcanzar el nivel de eficiencia de las

DMUs más eficientes y, por lo tanto, no contempla la posibilidad de existencia de ineficiencia debido a las diferencias entre las escalas operativas en cada DMU. Es por esto que se plantea el Modelo BCC (por las iniciales de sus autores Banker, Charnes y Cooper), propuesto por primera vez en 1984, el cual considera los retornos a escala variable indicando que cada unidad debe ser comparada con aquellas de su tamaño y no con todas las unidades presentes en el problema, eliminando así la influencia que pudiese tener la existencia de economías de escala en la evaluación del ratio de eficiencia de las unidades.

A modo de cumplir con esta nueva condición, se añade al Modelo de Dos Etapas, presentado anteriormente, una nueva restricción:

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1 \tag{11}$$

Resultado el Modelo BBC expresado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
&\underset{\theta,\lambda,s_i^-,s_r^+}{\text{Max}}\ z_0 = \theta + \varepsilon\left(\sum_{i=1}^{m} s_i^- + \sum_{r=1}^{s} s_r^+\right) \\
&\text{s. a.} \\
&\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\lambda_j + s_i^- = x_{i0} \qquad i = 1,2,\dots,m \\
&\sum_{j=1}^{n} y_{rj}\lambda_j - s_r^+ = \theta * y_{r0} \qquad r = 1,2,\dots,s \\
&\sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1 \\
&\lambda_j, s_i^-, s_r^+ \geq 0 \qquad \forall\ \text{i, j, r}
\end{aligned} \tag{12}$$

7.3.4 Descomposición de la Eficiencia

La eficiencia global de las unidades evaluadas bajo el Análisis Envolvente de Datos puede ser explicada por dos factores: por la eficiencia técnica pura, que explica la eficiencia propia de las operaciones de la unidad estudiada, y por la eficiencia de escala, la cual hace referencia a las condiciones favorables o desfavorables bajo las que opera la unidad.

Estos tres conceptos se relacionan de la siguiente manera:

$$Eficiencia\ Global = Eficiencia\ Técnica\ Pura\ x\ Eficiencia\ de\ Escala \qquad (13)$$

Con relación a los modelos propuestos por DEA, la eficiencia global corresponde al coeficiente de eficiencia obtenido por la optimización del Modelo CCR y la eficiencia técnica pura al coeficiente de eficiencia del Modelo BBC.

8 METODOLOGÍA

8.1 Justificación de la metodología

Para poder comenzar a proyectar sobre el Puerto de Valparaíso y San Antonio, con el fin de idear un diseño operacional que los convierta en Puertos de Clase Mundial y así poder hacer frente a la creciente demanda del Comercio Marítimo Internacional, es fundamental conocer los niveles de eficiencia actuales que presenta cada uno, pues esto permitirá obtener un feed-back respecto a cómo se están llevando a cabo las operaciones y proponer mejoras para futuros proyectos que logren alcanzar la maximización de la producción.

8.2 Selección de unidades y variables

El desarrollo de esta tesis se centra en comparar los niveles de eficiencia del Puerto de Valparaíso y Puerto San Antonio respecto a los de los principales Puertos de Clase Mundial, según cómo cada uno hace uso de sus propios recursos. Este análisis comparativo se lleva a cabo por medio de un reconocido procedimiento matemático denominado Análisis Envolvente de Datos, el cual, mediante técnicas de programación lineal, permite evaluar la eficiencia relativa de cada uno de los puertos según su manejo de inputs y obtención de outputs.

Primeramente, el modelo requiere la elección de las unidades a estudiar y, para este caso se ha decidido comparar a los puertos de Valparaíso y San Antonio con puertos que obtienen rendimientos similares a él y con los principales puertos del mundo. Los puertos a estudiar son: Valparaíso, San Antonio, Santos, Colón, Singapur, Shanghai, Valencia y Montevideo. La fundamentación de esta elección viene dada por el deseo de comparar las eficiencias de Valparaíso y San Antonio con la de otros puertos de tamaños y niveles de transferencia similares, como lo son Valencia y Montevideo y, además, con puertos que

obtienen rendimientos del orden de las proyecciones que esperan tener una vez se conviertan en Mega Puertos; es por esto que se eligieron puertos como Santos y Colón, que son aquellos que lideran el Comercio Marítimo Internacional en la zona de América Latina y El Caribe; y Singapur y Shanghai, quienes lideran a nivel mundial.

Seguidamente, debieron seleccionarse las variables inputs y outputs que explicarán la eficiencia de cada unidad estudiada. Es importante tener claridad en la definición de cada término, procurando que los inputs correspondan a los recursos que se utilizan en un proceso productivo para confeccionar bienes o servicios terminados, y los outputs concuerden con aquellos bien o servicios producidos.

Para este benchmarking de puertos, se escogieron cuatro variables inputs (variables independientes) que explican la infraestructura de cada unidad, dentro de estas se encuentran: el número de grúas gantry, el área de almacenamiento de contenedores en hectáreas, la longitud total de muelles en kilómetros y el calado máximo en metros. La grúa gantry (grúa pórtico o grúa de muelle) es una grúa destinada a la carga y descarga de contenedores en muelles, por lo que la cantidad de grúas gantry que posea un puerto influirá en el tiempo de carga o descarga de una nave, incidiendo directamente en los niveles de productividad del mismo. El área total de almacenamiento para contenedores que posea un puerto afecta a muchas variables como lo son las tarifas, la necesidad de rotación de carga y la cantidad de buques que éste puede recibir, por lo que, a mayor área de almacenamiento, mayores niveles de productividad poseerá. El muelle es la zona del puerto donde se realiza la carga y descarga de buques, por lo que de su dimensión depende la cantidad de buques que pueden ser atendidos de manera simultánea. El calado de un barco es la distancia vertical entre su línea de flotación y su quilla, de modo que, las embarcaciones de mayor tamaño poseerán un calado mayor a la de embarcaciones más pequeñas. Según esto, mientras mayor sea el calado de un

puerto, mayores serán las dimensiones de las embarcaciones que podrá acoger y, por ende, recibirá mayor cantidad de carga. Como puede notarse, cada una de estas variables posee una relación directamente proporcional con la productividad de un puerto, pudiendo esperarse que, a mayor nivel en cada una de ellas, mayor sean sus niveles de productividad.

Así mismo, se seleccionó una variable output (variable dependiente) que explica la productividad a través de los niveles de transferencia anual de cada puerto medidos en millones de TEUs.

Para cada una de las variables independientes se consideraron los datos más actuales que pudieron ser obtenidos para cada puerto y para la variable dependiente se usaron los datos del último ranking realizado el año 2017. Además, cabe mencionar que, el Modelo de Programación Lineal del Análisis Envolvente de Datos soporta una cantidad de n unidades a estudiar, m variables inputs y s variables outputs, por lo que el tamaño y dimensión del modelo queda a criterio del usuario y, para este caso, la información disponible de los puertos analizados fue la limitante principal en la confección de la base de datos y del tamaño del modelo.

8.3 Desarrollo del modelo DEA-CCR multiplicativo

En este trabajo, el modelo DEA-CCR es desarrollado con el complemento *Solver* del programa de *Microsoft Excel*, el cual está diseñado específicamente para la resolución de problemas de optimización numérica. Este Modelo de Programación Lineal posee dos orientaciones: input y output orientado. Ambas orientaciones estiman la misma frontera y, por lo tanto, el mismo conjunto de unidades eficientes, pero pueden obtener diferentes medidas de eficiencia para cada unidad ineficiente. Para el desarrollo de esta tesis, se decide utilizar el modelo output orientado, bajo la justificación de que lo que buscan hoy Puerto de

Valparaíso y San Antonio es conocer la manera de sacarle el máximo provecho al uso de sus recursos, con el fin de aumentar así sus niveles de transferencia, puesto que son puertos en crecimiento.

Este modelo multiplicativo busca determinar el valor óptimo de ω_0, es decir, el máximo aumento proporcional en los outputs que podría ser logrado por la $unidad_0$, dado sus niveles de inputs. La optimización del modelo (5) es realizada para cada uno de los puertos estudiados, por lo que cada puerto obtiene su propio nivel de eficiencia relativa, según cómo sus competidores hacen uso de sus recursos, y los pesos obtenidos por cada variable input y output. A partir de estos últimos resultados se determina la contribución en términos de porcentaje da cada variable input y output mediante las siguientes operaciones, respectivamente:

$$\frac{\delta_i x_{i0}}{\sum_{i=1}^{s} \delta_i x_{i0}} * 100 \tag{14}$$

$$\frac{\mu_r y_{r0}}{\sum_{r=1}^{s} y_r y_{r0}} * 100 \tag{15}$$

Finalmente, para cada puerto ineficiente, se determina, según el análisis de la restricción $\sum_{r=1}^{s} \mu_r y_{rj} - \sum_{i=1}^{m} \delta_i x_{ij} \leq 0$, su conjunto de referencia.

8.4 Desarrollo del modelo DEA-CCR envolvente

Al igual que en el modelo multiplicativo, la optimización del modelo dual se realiza para cada uno de los puertos y se obtiene, para cada uno de ellos, la maximización de su función objetivo, θ.

Para cada unidad ineficiente, se analiza su conjunto de referencia según los valores obtenidos de λ y se proceden a calcular de manera residual las variables de holgura input s_i^- y output s_r^+.

8.5 Determinación de valores objetivos para las variables inputs y output

Luego de la optimización de ambos modelos (multiplicativo y envolvente), se procede a ordenar toda la información rescatada en una tabla resumen, con el fin de facilitar el cálculo de los valores objetivos de las variables inputs y output para cada puerto ineficiente. Este cálculo se lleva a cabo mediante la suma producto entre los valores λ y los valores observados de los puertos eficientes que forman parte del conjunto de referencia de cada puerto ineficiente. Finalmente, se realiza una comparación entre sus valores objetivos obtenidos y sus valores observados y se procede a proponer mejoras que buscan alcanzar la eficiencia de cada uno.

8.6 Desarrollo del Método de Dos Etapas

Como bien se explica en el Capítulo 7, la primera etapa de este modelo es coincidente con la del modelo DEA-CCR en forma envolvente, por lo que, teniendo esos resultados, se procedió a realizar la segunda etapa. Para esto, se realiza la optimización del modelo de programación lineal (9) para cada uno de los puertos estudiados (no como en los modelos anteriores que las holguras eran calculadas sólo para los puertos ineficientes), identificando como variables las holguras de los inputs y outputs, con el objeto de lograr su maximización.

Finalmente, se procedió a comparar los resultados obtenidos en la segunda etapa de este modelo, con los de los modelos anteriores y se propusieron mejoras para cada uno de los puertos, que tienen como objetivo ayudarlos a alcanzar la eficiencia técnica.

8.7 Desarrollo del Modelo BCC

Al igual que para los modelos anteriores, el Modelo BBC (12) se optimizó para cada uno de los puertos de este estudio y, posteriormente, se realizó un análisis en relación a las diferencias de resultados obtenidos entre el Modelo de Dos Etapas y BBC.

8.8 Descomposición de la Eficiencia

En base a los coeficientes de eficiencia obtenidos por la optimización de los modelos CCR y BBC se realiza una tabla comparativa con los niveles de Eficiencia Técnica Global, Eficiencia Técnica Pura y Eficiencia de Escala.

Finalmente, se construye una tabla comparativa y resumen con un ranking entre todos los puertos estudiados, sus respectivos porcentajes de eficiencia y las mejoras para cada uno de los puertos ineficientes a fin de alcanzar la eficiencia.

9 RESULTADOS

9.1 Base de datos

Como se explica en el Capítulo 8, el desarrollo de este trabajo comienza con la formación de la base de datos que fue utilizada para la optimización de los modelos que propone el Análisis Envolvente de Datos. La información recopilada de las variables analizadas para cada uno de los puertos se encuentra estructurada en la siguiente tabla:

	INPUT				OUTPUT
	ÁREA DE PATIO	INFRAESTRUCTURA	LONGITUD MUELLES	CALADO MÁXIMO	NIVELES DE TRANSFERENCIA
PUERTO	[Ha]	N° gruas ganty	[km]	[m]	[MTEU]
Valparaíso, Chile	15.06	9.00	1.008	14.5	1.0737
San Antonio, Chile	30.00	15.00	2.191	14.9	1.2969
Colón, Panamá	159.30	37.00	1.222	16.5	3.8912
Santos, Brasil	98.00	26.00	1.108	15.0	3.5782
Shanghai, China	760.00	156.00	13.000	17.5	40.2300
Valencia, España	122.24	27.00	13.232	16.0	4.8322
Singapur, Singapur	700.00	212.00	17.350	18.0	33.7000
Montevideo, Uruguay	10.00	7.00	4.500	14.0	0.9394

Tabla 10: *Base de Datos*. (Fuente Elaboración Propia).

Sobre esta base de datos se desarrollan cada uno de los modelos de programación lineal propuestos por DEA.

9.2 Modelo DEA-CCR multiplicativo

Los resultados de la optimización del primer modelo desarrollado, el Modelo DEA-CCR Multiplicativo, se presentan a continuación en la Tabla 11:

		PESOS INPUTS				PESOS OUTPUT
PUERTO	EFICIENCIA	DELTA 1	DELTA 2	DELTA 3	DELTA 4	MIU
Valparaíso, Chile	**1.00**	**0.048**	0.000	**0.036**	**0.016**	**0.931**
San Antonio, Chile	**0.68**	**0.040**	0.000	**0.030**	**0.013**	**0.771**
Colón, Panamá	**0.99**	0.000	0.000	**0.791**	**0.003**	**0.257**
Santos, Brasil	**1.00**	**0.001**	0.000	**0.791**	0.000	**0.279**
Shanghai, China	**1.00**	**0.001**	0.000	**0.001**	0.000	**0.000**
Valencia, España	**0.73**	**0.007**	**0.017**	0.000	0.000	**0.207**
Singapur, Singapur	**0.91**	**0.002**	0.000	0.000	**0.001**	**0.030**
Montevideo, Uruguay	**1.00**	**0.055**	0.000	**0.042**	**0.019**	**1.064**

Tabla 11: *Resultados Modelo Multiplicativo.* (Fuente Elaboración propia).

La eficiencia de cada puerto corresponde al cociente entre 1 y el valor de la función objetivo del modelo, es decir, $\frac{1}{\omega_0}$. Para este caso de estudio, Puerto Valparaíso, Santos, Singapur y Montevideo alcanzan niveles de eficiencia igual al 100% y, por otro lado, San Antonio, Colón, Valencia y Singapur resultaron ser unidades ineficientes en la proporción $(1 - eficiencia) * 100$.

Como el enfoque de este análisis es output orientado, el porcentaje de ineficiencia de cada unidad explica la proporción en que sus niveles de producción deben ser aumentados a fin de convertirse en una unidad eficiente. Por ejemplo, para el caso de San Antonio, dada la utilización de sus recursos, el puerto debiese mejorar en un *32%* su transferencia de TEUs para así alcanzar la eficiencia técnica.

Como es sabido, los pesos μ_r representan la importancia de cada variable output respecto del total. Como en este caso de estudio en particular sólo se trabaja con una variable output, su porcentaje de importancia para todos los puertos analizados es igual al 100%. Ahora bien, en lo que respecta a los pesos δ_i, estos corresponden a la contribución de cada variable input a la puntuación de eficiencia de la unidad evaluada, por tanto, las variables independientes que obtienen pesos mayores a cero $(\delta_i > 0)$ son las que influyen en la eficiencia de la unidad. El porcentaje de contribución de cada variable independiente, presentado en la Tabla 12, explica el efecto que tendrá la reducción del consumo de dicho

input en los niveles de eficiencia de la unidad estudiada. Por ejemplo, para el caso de Puerto San Antonio, la reducción del consumo del *input 1* generará el mayor impacto en sus niveles de eficiencia, seguida de una reducción en el consumo del *input 4* y, finalmente, una reducción del *input 3*. Por lo tanto, explicado de manera general, toda variable input que posea el porcentaje de contribución más alto será aquella que proporcionará un mayor efecto sobre la eficiencia de la unidad, dada la reducción de su consumo y aquella que presente el menor porcentaje, proporcionará el menor efecto. Toda variable que obtenga porcentaje de contribución igual a cero ($\delta_i = 0$) no proporcionará mejoras en la eficiencia técnica de la unidad, dada la reducción de su consumo.

	ÁREA DE PATIO	INFRAESTRUCTURA	LONGITUD MUELLES	CALADO MÁXIMO	NIVELES DE TRANSFERENCIA
PUERTO	**INPUT 1**	**INPUT 2**	**INPUT 3**	**INPUT 4**	**OUTPUT**
Valparaíso, Chile	**72.74%**	-	**3.68%**	**23.58%**	**100.00%**
San Antonio, Chile	**81.81%**	-	**4.51%**	**13.68%**	**100.00%**
Colón, Panamá	-	-	**95.38%**	**4.62%**	**100.00%**
Santos, Brasil	**12.31%**	-	**87.69%**	-	**100.00%**
Shanghai, China	**97.97%**	-	**1.27%**	**0.76%**	**100.00%**
Valencia, España	**66.24%**	**33.76%**	-	-	**100.00%**
Singapur, Singapur	**98.56%**	-	-	**1.44%**	**100.00%**
Montevideo, Uruguay	**55.21%**	-	**18.77%**	**26.02%**	**100.00%**

Tabla 12: *Contribución de inputs y output (%).* (Fuente Elaboración Propia).

Como se menciona anteriormente, los valores de los pesos inputs y outputs expresan información sobre la importancia que una unidad atribuye a determinados insumos y productos con el fin de obtener su máxima puntuación de eficiencia. Según lo anterior, Puerto de Valparaíso, bajo el benchmarking realizado, alcanza el 100% de eficiencia asignándole una mayor importancia a la variable Área de Patio, seguida de Calado Máximo y, por último, Longitud de Muelle. Estos porcentajes de importancia debiesen ser considerados a la hora de desarrollar planes de expansión y crecimiento del puerto.

Finalmente, mediante el análisis de restricciones es posible determinar el conjunto de referencia para cada uno de los puertos que obtuvieron niveles de eficiencia inferiores al 100%. Este conjunto se determina identificando aquellas restricciones (o unidades) para las cuales el peso (δ^*, μ^*) produce su igualdad. Debe recordarse que, en el Modelo Multiplicativo, la restricción (6) debe escribirse para todo *j*, con *j=1,2,…,n*, donde *n* es la cantidad de puertos estudiados. Por lo tanto, el *j* de aquella restricción que está en igualdad proporcionará el nombre del puerto que formará parte del conjunto de referencia de la unidad ineficiente. Para el caso de Puerto San Antonio (resultados en la Tabla 13), las restricciones 2, 6 y 9 están en igualdad, por lo que los puertos de Valparaíso, Shanghai y Montevideo conforman su conjunto de referencia, forzando a San Antonio a ser una unidad ineficiente. El mismo análisis fue realizado para los otros tres puertos ineficientes, donde se obtuvo que el conjunto de referencia para el Puerto de Colón está conformado por Santos y Shanghai, y el conjunto de referencia para Puerto de Valencia y Singapur corresponde a Santos y Shanghai (resultados en Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16, respectivamente).

SAN ANTONIO	MIN			
	F.O	**1.47**		
	s.a	1.000	=	1.000
	Valparaíso	0.828	⩾	0.828
	San Antonio	1.467	⩾	1.000
	Colón	6.629	⩾	3.000
	Santos	4.154	⩾	2.759
	Shanghai	31.020	⩾	31.020
	Valencia	5.504	⩾	3.726
	Singapur	28.759	⩾	25.985
	Montevideo	0.724	⩾	0.724

Tabla 13: *Análisis de Restricciones del Modelo Multiplicativo para Puerto San Antonio.* (Fuente Elaboración Propia).

COLÓN	MIN			
	F.O	**1.01**		
	s.a	1.000	=	1.000
	Valparaíso	0.839	⩾	0.276
	San Antonio	1.776	⩾	0.333
	Colón	1.014	⩾	1.000
	Santos	0.920	⩾	0.920
	Shanghai	10.339	⩾	10.339
	Valencia	10.518	⩾	1.242
	Singapur	13.783	⩾	8.661
	Montevideo	3.601	⩾	0.241

Tabla 14: *Análisis de Restricciones del Modelo Multiplicativo para Puerto Colón*. (Fuente Elaboración propia).

VALENCIA	MIN			
	F.O	**1.37**		
	s.a	1.000	=	1.000
	Valparaíso	0.266	⩾	0.222
	San Antonio	0.480	⩾	0.268
	Colón	1.819	⩾	0.805
	Santos	1.174	⩾	0.740
	Shanghai	8.325	⩾	8.325
	Valencia	1.372	⩾	1.000
	Singapur	8.840	⩾	6.974
	Montevideo	0.194	⩾	0.194

Tabla 15: *Análisis de Restricciones el Modelo Multiplicativo para Puerto Valencia*. (Fuente Elaboración Propia).

SINGAPUR	MIN			
	F.O	**1.10**		
	s.a	1.000	=	1.000
	Valparaíso	0.036	⩾	0.032
	San Antonio	0.060	⩾	0.038
	Colón	0.262	⩾	0.115
	Santos	0.165	⩾	0.106
	Shanghai	1.194	⩾	1.194
	Valencia	0.204	⩾	0.143
	Singapur	1.101	⩾	1.000
	Montevideo	0.028	⩾	0.028

Tabla 16: *Análisis de Restricciones del Modelo Multiplicativo para Puerto Singapur*. (Fuente Elaboración Propia).

9.3 Modelo DEA-CCR envolvente

Este segundo modelo, al igual que el Modelo Multiplicativo, entrega los valores de la eficiencia técnica de cada uno de los puertos analizados. La unidad será eficiente si obtiene un valor de función objetivo igual a uno ($\theta^* = 1$) y será ineficiente si su función objetivo es mayor a uno ($\theta^* > 1$). Según esto, se corrobora que los puertos de Valparaíso, Santos, Shanghai y Montevideo son eficientes, mientras que San Antonio, Colón, Valencia y Singapur son ineficientes técnicamente.

Por otro lado, las variables λ_j corresponden a la intensidad que la $unidad_0$ le ha asignado a la $unidad_j$ y, a partir de estos valores, es posible obtener una combinación de DMUs que "funcione mejor" que la unidad ineficiente que ha sido evaluada. Si la unidad evaluada es eficiente, como es el caso de Puerto Valparaíso, obtendrá un vector de intensidades o pesos con valores iguales a cero, a excepción de su propio peso, que tendrá un valor igual a uno, lo que explica que no existe una combinación de unidades que obtenga mejores rendimientos de los que ya obtiene Valparaíso. En cambio, si la unidad es ineficiente, como es el caso de Puerto San Antonio, obtendrá un vector con pesos mayores a cero $(\lambda_j > 0)$ para cada uno de los puertos que forman parte de su conjunto de referencia, los cuales indican la intensidad con la que cada uno de ellos influye sobre la eficiencia de dicha DMU y, a partir de estos valores, se obtiene la combinación que permite construir una unidad que utiliza una menor cantidad de insumos para producir al menos los misma cantidad de productos.

Para este modelo, el cálculo de las holguras se realiza de manera residual, es decir, restando cada lado de las inecuaciones que representan las restricciones del modelo. Si se obtienen valores de holgura input mayores a cero ($s_i^- > 0$), esto indica que el input i de la

unidad evaluada podría ser reducido en la cantidad dada por s_i^{-*}, de tal forma que el input *i* debería ser usado en la cantidad $(x_i - s_i^*)$. Analizando los resultados de Puerto San Antonio, mediante la Tabla 17, es posible observar que obtiene una holgura *input 2* igual a 3.1158, lo que quiere decir que, a fin de alcanzar la eficiencia técnica, el puerto debiese reducir su número de grúas en 4 unidades (redondeo a la unidad superior de 3.1158). Si el puerto en estudio reduce su número de grúas de 15 a 11 unidades y mantiene constante el resto de sus variables inputs, obtendrá al menos los mismos niveles de transferencia de TEUs que transfiere actualmente.

Como Puerto Valparaíso alcanza el 100% de eficiencia, no existen mejoras en el consumo de inputs y/o producción de outputs que permitan aumentar la eficiencia de la unidad.

Para este caso de estudio en particular, no se obtienen valores de holgura output (s_r^+), pues sólo se está trabajando con una variable dependiente, por lo que la eficiencia de la unidad analizada explica el porcentaje en el que los niveles de producción deben ser aumentados a fin de alcanzar la eficiencia técnica.

		Puertos							
		Valparaíso	San Antonio	Colón	Santos	Shanghai	Valencia	Singapur	Montevideo
	Eficiencia	**1.0000**	**0.6819**	**0.9861**	**1.0000**	**1.0000**	**0.7290**	**0.9081**	**1.0000**
Lambda	λ Valparaíso	**1.0000**	**0.7540**	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	λ San Antonio	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	λ Colón	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	λ Santos	0.0000	0.0000	**1.0997**	**1.0000**	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	λ Shanghai	0.0000	**0.0212**	**0.0003**	0.0000	**1.0000**	**0.1558**	**0.9193**	0.0000
	λ Valencia	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	λ Singapur	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	λ Montevideo	0.0000	**0.2569**	0.0000	0.0000	0.0000	**0.3857**	**0.1366**	**1.0000**
Holguras	Input 1	0.0000	0.0000	**51.3235**	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	Input 2	0.0000	**3.1158**	**8.3657**	0.0000	0.0000	0.0000	**67.6398**	0.0000
	Input 3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	**9.4711**	**4.7848**	0.0000
	Input 4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	**7.8736**	0.0000	0.0000
	Output	0.0000	**0.6050**	**0.0547**	0.0000	0.0000	**1.7968**	**3.4100**	0.0000

Tabla 17: *Resultado Modelo Envolvente.* (Fuente Elaboración Propia).

9.4 Valores objetivos de variables input y output

La Tabla 18, presente a continuación, explica los conjuntos de referencia de cada puerto ineficiente y la intensidad con la que cada uno de los puertos eficientes influye sobre estos (valores obtenidos de la optimización del Modelo Envolvente):

		Puertos Eficientes			
		Valparaíso	Santos	Shanghai	Montevideo
Puertos Ineficientes	San Antonio	**0.7540**	-	**0.0212**	**0.2569**
	Colón	-	**1.0997**	**0.0003**	-
	Valencia	-	-	**0.1558**	**0.3857**
	Singapur	-	-	**0.9193**	**0.1366**

Tabla 18: *Resumen de conjuntos de referencia*. (Fuente Elaboración Propia).

Según estos resultados, fue posible calcular los valores objetivos de las variables inputs y output y, por ende, las propuestas de mejora para cada variable.

A continuación, se presentan tres tablas que explican los valores observados de cada puerto ineficiente, los valores objetivos (obtenidos según el cálculo mencionado en el Capítulo 8 y, finalmente, los valores de holgura para cada uno de ellos:

	Valores Observados				
	INPUT 1	INPUT 2	INPUT 3	INPUT 4	OUTPUT
San Antonio	30.000	15.000	2.191	14.900	1.2969
Colón	159.300	37.000	1.222	16.500	3.8912
Valencia	122.241	27.000	13.232	16.000	4.8322
Singapur	700.000	212.000	17.350	18.000	33.7000

Tabla 19: *Valores Observados de Puerto Ineficientes.* (Fuente Elaboración Propia).

	Valores Objetivos				
	INPUT 1	INPUT 2	INPUT 3	INPUT4	OUTPUT
San Antonio	30.000	11.884	2.191	14.900	1.902
Colón	107.976	28.634	1.222	16.500	3.946
Valencia	122.241	27.000	3.761	8.126	6.629
Singapur	700.000	144.360	12.565	18.000	37.110

Tabla 20: *Valores Objetivos Calculados de Puertos Ineficientes.* (Fuente Elaboración Propia).

	Holguras				
	INPUT 1	INPUT 2	INPUT 3	INPUT 4	OUTPUT
San Antonio	-	**-3.116**	-	-	**0.605**
Colón	**-51.324**	**-8.366**	-	-	**0.055**
Valencia	-	-	**-9.471**	**-7.874**	**1.797**
Singapur	-	**-67.640**	**-4.785**	-	**3.410**

Tabla 21: *Valores de Holgura para cada una de las Variables de los Puertos Ineficientes.* (Elaboración Propia).

Como se explica anteriormente, los valores de holgura output presentados en la Tabla 21, corresponden al aumento de producción que debe alcanzar cada puerto dado su nivel de ineficiencia a fin de alcanzar la eficiencia técnica.

Puerto San Antonio, como se explica anteriormente, está realizando una mala utilización de su segundo input (Número de Grúas Gantry), pues si redujese su cantidad de grúas en 4 unidades, obtendría al menos la misma cantidad de outputs que obtiene actualmente. Expresado de otra manera, el modelo calcula que, si el puerto aprovechase óptimamente sus recursos disponibles, podría aumentar su producción en 605.000 TEUs al año, logrando así alcanzar el 100% de eficiencia.

9.5 Método de Dos Etapas

En la Tabla 22 se presentan los resultados obtenidos posterior a la optimización del Modelo de Dos Etapas, el que tiene como objetivo corroborar los resultados obtenidos por los modelos Multiplicativo y Envolvente.

		Puertos							
		Valparaíso	San Antonio	Colón	Santos	Shanghai	Valencia	Singapur	Montevideo
	Eficiencia	**1.0000**	**0.6819**	**0.9861**	**1.0000**	**1.0000**	**0.7290**	**0.9081**	**1.0000**
Lambda	λ Valparaíso	**1.0000**	**0.7540**	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	λ San Antonio	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	λ Colón	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	λ Santos	0.0000	0.0000	**1.0997**	**1.0000**	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	λ Shanghai	0.0000	**0.0212**	**0.0003**	0.0000	**1.0000**	**0.1558**	**0.9193**	0.0000
	λ Valencia	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	λ Singapur	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	λ Montevideo	0.0000	**0.2569**	0.0000	0.0000	0.0000	**0.3857**	**0.1366**	**1.0000**
Holguras	Input 1	0.0000	0.0000	**51.3235**	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	Input 2	0.0000	**3.1158**	**8.3657**	0.0000	0.0000	0.0000	**67.6398**	0.0000
	Input 3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	**9.4711**	**4.7848**	0.0000
	Input 4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	**7.8736**	0.0000	0.0000
	Output	0.0000	**0.6050**	**0.0547**	0.0000	0.0000	**1.7968**	**3.4100**	0.0000

Tabla 22: *Resultados Modelo de Dos Etapas.* (Fuente Elaboración Propia).

Para este caso, y como fácilmente puede comprobarse, los resultados mostrados en la tabla anterior coinciden con aquellos obtenidos mediable el procedimiento de resolución de una etapa.

9.6 Modelo BCC

La nueva restricción que considera el Modelo BCC provoca un cambio en los resultados obtenidos mediante el Modelo de Dos Etapas. Si bien, los niveles de eficiencia de cada uno de los puertos estudiados sólo varían en cifras decimales, al igual que los pesos de los conjuntos de referencia de cada puerto ineficiente, la suma de estos cambios provoca un efecto sobre los resultados de las holguras inputs y output de las unidades analizadas. Los resultados de la optimización del modelo se presentan en la siguiente tabla:

		Puertos							
		Valparaíso	San Antonio	Colón	Santos	Shanghai	Valencia	Singapur	Montevideo
	Eficiencia	**1.0000**	**0.6848**	**0.9902**	**1.0000**	**1.0000**	**0.7777**	**0.9087**	**1.0000**
Lambda	λ Valparaíso	**1.0000**	**0.7144**	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	λ San Antonio	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	λ Colón	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	λ Santos	0.0000	0.0000	**0.9904**	**1.0000**	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	λ Shanghai	0.0000	**0.0218**	**0.0096**	0.0000	**1.0000**	**0.1342**	**0.9200**	0.0000
	λ Valencia	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	λ Singapur	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	λ Montevideo	0.0000	**0.2637**	0.0000	0.0000	0.0000	**0.8658**	**0.0800**	**1.0000**
Holguras	Input 1	0.0000	0.0000	**54.9539**	0.0000	0.0000	**11.5698**	0.0000	0.0000
	Input 2	0.0000	**3.3160**	**9.7538**	0.0000	0.0000	0.0000	**67.9200**	0.0000
	Input 3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	**7.5911**	**5.0300**	0.0000
	Input 4	0.0000	**0.4663**	**1.4760**	0.0000	0.0000	**1.5302**	**0.7800**	0.0000
	Output	0.0000	**0.5969**	**0.0383**	0.0000	0.0000	**1.3812**	**3.3868**	0.0000

Tabla 23: *Resultados Modelo BCC.* (Fuente Elaboración Propia).

9.7 Descomposición de la Eficiencia

La Tabla 24, presente a continuación, expone la descomposición de la eficiencia según los resultados obtenidos por la optimización de los modelos CCR y BCC.

Puertos	Eficiencia CCR	Eficiencia BCC	Eficiencia Escala
Valparaíso	1.0000	1.0000	1.0000
San Antonio	0.6819	0.6848	0.9957
Colón	0.9861	0.9902	0.9959
Santos	1.0000	1.0000	1.0000
Shanghai	1.0000	1.0000	1.0000
Valencia	0.7290	0.7777	0.9373
Singapur	0.9081	0.9087	0.9994
Montevideo	1.0000	1.0000	1.0000

Tabla 24: *Tabla de Eficiencia CCR, BCC y de Escala*. (Fuente Elaboración Propia).

Como la Eficiencia de Escala para todos los puertos ineficientes alcanza valores muy cercanos a uno, se supone que estos, al igual que los puertos eficientes, operan bajo rendimientos de escala constante. Según lo anterior, se utilizan los resultados de la optimización del Modelo CCR para las propuestas de mejora de los puertos ineficientes, pues este modelo considera que las unidades estudiadas operan bajo rendimientos de escala constantes.

Finalmente, en la Tabla 25 se presenta un ranking de los puertos del estudio, según sus valores de eficiencia y sus respectivas mejoras obtenidas mediante el Modelo CCR propuesto por DEA.

			Mejoras				
Puerto	Ranking	Eficiencia	Input 1	Input 2	Input 3	Input 4	Output
Valparaíso	1	100.00%	-	-	-	-	-
Santos	1	100.00%	-	-	-	-	-
Shanghai	1	100.00%	-	-	-	-	-
Montevideo	1	100.00%	-	-	-	-	-
Colón	2	98.61%	-51.3235	-8.3657	-	-	0.0547
Singapur	3	90.81%	-	-67.6398	-4.7848	-	3.4100
Valencia	4	72.90%	-	-	-9.4711	-7.8736	1.7968
San Antonio	5	68.19%	-	-3.1158	-	-	0.6050

Tabla 25: *Tabla Resumen de Ranking de Puertos Estudiados*. (Fuente Elaboración Propia).

Es importante recordar que cada una de las mejoras propuestas por la tabla anterior, está expresada en las unidades correspondientes para cada variable.

10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de esta tesis se ha llevado a cabo mediante una metodología de programación no paramétrica llamada Análisis Envolvente de Datos y, gracias a ella, se ha logrado generar un Benchmarking que ha permitido comparar el desempeño de Puerto Valparaíso y San Antonio con el de otros grandes puertos a nivel mundial, logrando determinar la manera óptima de consumir los recursos que cada puerto tiene disponible, a fin de alcanzar su eficiencia.

Los estudios de esta naturaleza resultan de suma importancia a la hora de tomar decisiones en lo que respecta a las proyecciones de un puerto, pues permiten mejorar las condiciones de competitividad del mismo, basándose en las buenas prácticas que desarrollan otros puertos de mayor envergadura.

En base a los resultados obtenidos, es posible concluir que el puerto de Valparaíso hace una óptima utilización de sus recursos, alcanzando la eficiencia técnica, al igual que los reconocidos puertos de Shanghai, Santos y Montevideo. Con ello, se afirma que Puerto Valparaíso posee una alta capacidad de servicio para hacer frente al comercio exterior, por lo que los planes de expansión y ampliación de su infraestructura debiesen proyectar los actuales niveles de producción obtenidos en base al máximo uso de sus recursos, tal como se realiza hoy en día.

En lo que respecta al Puerto de San Antonio, los resultados del Modelo CCR muestran que el puerto no está realizando una correcta utilización de sus recursos, provocándole una pérdida de 605.000 TEUs al año, la cual está siendo generada por la variable Número de Grúas Gantry. Por lo tanto, los planes de ampliación del puerto debiesen considerar esta mejora, a fin de proyectar un Puerto de Clase Mundial que opere bajo óptimos niveles de eficiencia.

Dada la relevancia del tema tratado en esta tesis, es que se propone a modo de recomendación, ampliar la base de datos del estudio, con el fin de poder comparar a Puerto Valparaíso y San Antonio con otros Puertos de Clase Mundial y, además, adicionar análisis que permitan profundizar en la revisión de la eficiencia portuaria. Un análisis recomendado es el Índice de Malmquist, un índice multilateral utilizado para comparar la productividad de diversas economías a lo largo del tiempo, el cual logra determinar si el porcentaje de variación en la productividad total se debe a cambios tecnológicos o a un mejor aprovechamiento de los insumos. Finalmente, con las mejoras resultantes de la optimización de los modelos propuestos por DEA para cada una de las unidades ineficientes, se propone desarrollar una regresión lineal multivariada de unidades eficientes que explique una proyección para un puerto en vías de crecimiento como lo son Valparaíso y San Antonio.

11 DISCUSIÓN

El presente 3 de abril, el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones de Chile, a través de la Comisión Investigadora Ley N°19.542, entregó información respecto a las características del sistema portuario, los avances que se están realizando y las líneas de acción que se están implementando para su desarrollo. Dentro de este informe resalta la importancia que posee el transporte marítimo para el desarrollo del comercio exterior de Chile y que el crecimiento de la actividad portuaria está presionando la capacidad actual existente, tanto en el ámbito de infraestructura como de los equipos de los puertos y en las cadenas logísticas en las que participan. Además, distingue la necesidad de anticipar los requerimientos y planificar adecuadamente el desarrollo del sistema portuario.

Desde el año 2010 al 2017, se ha realizado una inversión total en infraestructura y equipos portuarios de US$1.291 millones, la que considera adquisición de equipos adaptados a una demanda creciente con naves más grandes y mayores lotes de carga, representada por la adquisición de 25 grúas pórtico, 29 grúas móviles, la habilitación de áreas de almacenamiento para contenedores refrigerados en los puertos de Valparaíso y San Antonio y rehabilitación y construcción de muelles antisísmicos. Estas inversiones, según análisis estadísticos, han logrado el crecimiento de los niveles de transferencia de los puertos chilenos, los cuales han alcanzado rendimientos comparables a nivel mundial medidos en TEUs/ml. Lo que ha propuesto esta tesis es comparar los niveles de rendimiento de los puertos chilenos con los de otros grandes puertos mundiales considerando un mayor número de variables, a fin de conocer si realmente se está obteniendo el máximo provecho de los recursos que hoy se tienen disponibles. Si bien es cierto, una inversión en infraestructura y equipamiento traerá beneficios al puerto, lo deseable sería conocer en qué variables es más conveniente invertir. Como bien explican los resultados de este trabajo, Puerto San Antonio

no está realizando una correcta utilización de sus Grúas Gantry, lo cual le genera una pérdida en sus niveles de productividad, por lo que invertir, actualmente, sobre esta variable generará cada vez menores beneficios marginales a costos muy elevados. Ambos puertos chilenos, Valparaíso y San Antonio, le otorgan a la variable Área de Patio un porcentaje de importancia mayor al 70% sobre sus niveles de eficiencia, lo que explica que los siguientes proyectos de desarrollo portuario debiesen reconocer la criticidad de esta variable, a modo de alcanzar operaciones óptimamente eficientes.

12 LIMITACIONES

La principal limitación para el desarrollo de esta tesis fue la poca información actualizada y disponible de los puertos a nivel mundial, lo que impidió desarrollar una amplia base de datos y, además, profundizar más en los análisis de eficiencia portuaria.

14 REFERENCIAS

Aduanas en Canarias. (2009). *¿Qué es un Puerto Hub?* Recuperado de: http://aduanasencanarias.blogspot.com/2009/02/que-es-un-puerto-hub.html

Arturo. (2015). Qué es y cómo aplicar el benchmarking. Recuperado de: https://www.crecenegocios.com/que-es-y-como-aplicar-el-benchmarking/

Burkhalter, L. (1999). *Privatización Portuaria: Bases, alternativas y consecuencias.* Santiago.

CEPAL. (2006). *Indicadores de productividad para la industria portuaria. Aplicación en América Latina y el Caribe.* Santiago, Chile.

CEPAL. (2017). *Ranking de Puertos. Los Top 20 en América Latina y el Caribe en 2016.* Recuperado de: https://www.cepal.org/es/infografias/ranking-puertos-top-20-america-latina-caribe-2016

Charnes A, WW Cooper and EL Rhodes (1978). *Measuring the Efficiency of Decision Making Units.* EJOR 2: 429-444.

Christidis, P. (2001). *Desarrollo de los Puertos y Problemas de Competencia*. Recuperado de: https://libros-revistas-derecho.vlex.es/vid/desarrollo-puertos-problemas-competencia-110747

Comercio Exterior. (s.f.) *Diccionario de Comercio Exterior: TEU.* Recuperado de: http://www.comercio-exterior.es/es/action-diccionario.diccionario+idioma-223+l-T+p-1679+pag-/Diccionario+de+comercio+exterior/TEU.htm

Díaz-Bautista, A. (2008). Los puertos en México y la política económica portuaria internacional. *Observatorio de la economía Latinoamericana, 25*, 1-33.

Empresa Portuaria San Antonio. (2013). *Plan Maestro.* San Antonio.

Farrell, M. (1957). The measurement of productive efficiency. Journal of the Royal Statistical Society. *Series A*, 120, 3, 253–290.

Gamboa, J. (2012). *Puerto Colón Panamá.* Recuperado de: https://prezi.com/0kj-kdwqrztb/puerto-colon-panama/

Georgia Tech Panama. (s.f.). *Bilbao: Vistazo General.* Recuperado de: https://prezi.com/0kj-kdwqrztb/puerto-colon-panama/

Guillén, O. (2015). *Generalidades del Puerto de Shenzhen.* Recuperado de: https://prezi.com/iizjddmks7so/puerto-shenzhen/

Jaime, J. (2016). *Formulación en el Análisis Envolvente de Datos (DEA). Resolución de casos prácticos.* Universidad de Sevilla. Sevilla, España.

La Nación. (2016). *Puerto de Santos, el todopoderoso.* Recuperado de: https://www.lanacion.com.ar/1891941-puerto-de-santos-el-todopoderoso

Londoño, L. y Giraldo, Y. (2009). Análisis Envolvente de Datos -DEA- : Una aplicación al sector de telecomunicaciones de países de medianos ingresos. *Ecos de Economía, 13* (28), 53-73

Martner, C. y Moreno, M. (2001). *Tendencias recientes en el Transporte Marítimo Internacional y su impacto en los Puertos Mexicanos.* Sanfandila, México.

Masa, C. (s.f.). *Modelos de programación lineal.* Recuperado de: http://diccionarioempresarial.wolterskluwer.es/Content/Documento.aspx?params=H4sIAAAAAAAEAMtMSbF1jTAAASMTczMTtbLUouLM_DxbIwMDS0NDQ3OQQGZapUt-ckhlQaptWmJOcSoAKSi6YTUAAAA=WKE

MegaConstrucciones. (s.f.). *Puerto de Singapur.* Recuperado de: http://megaconstrucciones.net/?construccion=puerto-singapur

Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. (2019). *Comisión Investigadora Ley N°19.542: Características del sistema portuario.* [Diapositiva de PowerPoint].

Portal Portuario. (2018). *Brasil: Puerto de Santos logra máximo histórico al movilizar 129,8 millones de toneladas.* Recuperado de: https://portalportuario.cl/brasil-puerto-santos-logra-maximo-historico-al-movilizar-1298-millones-toneladas/

Puerto Valparaíso. (2002). *Estadísticas: Puerto Valparaíso.* Recuperado de: https://www.puertovalparaiso.cl/puerto/estadisticas

Puerto Valparaíso. (2002). *Historia: Puerto Valparaíso.* Recuperado de: https://www.puertovalparaiso.cl/puerto/historia

Puerto Valparaíso. (2002). *Modelo Logístico: Puerto Valparaíso.* Recuperado de: https://www.puertovalparaiso.cl/puerto/modelo_logistico

Puerto Valparaíso. (2015). *Plan Maestro Puerto Valparaíso.* Valparaíso.

Retrespo, M. (s.f.). *Análisis Envolvente de Datos: Introducción y herramienta pública para su utilización.* Universidad de Antioquía. Medellín, Colombia.

Revista del Sector Marítimo. (2016). *Top 10 Puertos de Contenedores del Mundo.* Recuperado de: https://sectormaritimo.es/top-10-puertos-del-mundo

Rodrigue, J. (s.f.). *Shipping density data adapted from National Center for Ecological Analysis and Synthesis, A Global Map of Human Impacts to Marine Ecosystems*. Dept. of Global Studies & Geography. Hofstra University, New York.

Salazar, B. (s.f.). *Programación lineal.* Recuperado de: https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/investigación-de-operaciones/programación-lineal/

UNCTAD. (2016). *Informe sobre el Transporte Marítimo 2016.* Publicación de Las Naciones Unidas. Sales No. S.16. II. D.7. Nueva York y Ginebra.

15 ANEXOS

15.1 Resultados Modelo multiplicativo

VALPARAÍSO	MIN			
	F.O	**1.00**		
	s.a	1.00	=	1.00
	Valparaíso	1.00	⩾	1.00
		1.77	⩾	1.21
		8.01	⩾	3.62
		5.02	⩾	3.33
	Shanghai	37.47	⩾	37.47
		6.65	⩾	4.50
		34.74	⩾	31.39
	Montevideo	0.874915948	⩾	0.87

SAN ANTONIO	MIN			
	F.O	**1.47**		
	s.a	1.000	=	1.00
	Valparaíso	0.828	⩾	0.83
	San Antonio	1.467	⩾	1.00
	Colón	6.629	⩾	3.00
	Santos	4.154	⩾	2.76
	Shanghai	31.020	⩾	31.02
	Valencia	5.504	⩾	3.73
	Singapur	28.759	⩾	25.99
	Montevideo	0.724	⩾	0.72

COLÓN	MIN			
	F.O	**1.01**		
	s.a	1.000	=	1.00
	Valparaíso	0.839	⩾	0.28
	San Antonio	1.776	⩾	0.33
	Colón	1.014	⩾	1.00
	Santos	0.920	⩾	0.92
	Shanghai	10.339	⩾	10.34
	Valencia	10.518	⩾	1.24
	Singapur	13.783	⩾	8.66
	Montevideo	3.601	⩾	0.24

SANTOS	MIN			
	F.O	**1.00**		
	s.a	1.00	=	1
	Valparaíso	0.82	⩾	0.30
	San Antonio	1.77	⩾	0.36
	Colón	1.17	⩾	1.09
	Santos	1.00	⩾	1.00
	Shanghai	11.24	⩾	11.24
	Valencia	10.63	⩾	1.35
	Singapur	14.61	⩾	9.42
	Montevideo	3.57	⩾	0.26

SHANGHAI	MIN			
	F.O	**1.00**		
	s.a	1.00	=	1
	Valparaíso	0.03	⩾	0.03
	San Antonio	0.05	⩾	0.03
	Colón	0.21	⩾	0.10
	Santos	0.13	⩾	0.09
	Shanghai	1.00	⩾	1.00
	Valencia	0.18	⩾	0.12
	Singapur	0.93	⩾	0.84
	Montevideo	0.02	⩾	0.02

VALENCIA	MIN			
	F.O	**1.37**		
	s.a	1.000	=	1.000
	Valparaíso	0.266	⩾	0.222
	San Antonio	0.480	⩾	0.268
	Colón	1.819	⩾	0.805
	Santos	1.174	⩾	0.740
	Shanghai	8.325	⩾	8.325
	Valencia	1.372	⩾	1.000
	Singapur	8.840	⩾	6.974
	Montevideo	0.194	⩾	0.194

SINGAPUR	MIN			
	F.O	**1.10**		
	s.a	1.000	=	1.000
	Valparaíso	0.036	⩾	0.032
	San Antonio	0.060	⩾	0.038
	Colón	0.262	⩾	0.115
	Santos	0.165	⩾	0.106
	Shanghai	1.194	⩾	1.194
	Valencia	0.204	⩾	0.143
	Singapur	1.101	⩾	1.000
	Montevideo	0.028	⩾	0.028

MONTEVIDEO	MIN			
	F.O	**1.00**		
	s.a	1.00	=	1
	Valparaíso	1.14	⩾	1.14
	San Antonio	2.02	⩾	1.38
	Colón	9.15	⩾	4.14
	Santos	5.74	⩾	3.81
	Shanghai	42.82	⩾	42.82
	Valencia	7.60	⩾	5.14
	Singapur	39.70	⩾	35.87
	Montevideo	1.00	⩾	1.00

Anexo 1: *Resultados Modelo Multiplicativo*. (Elaboración Propia).

15.2 Resultados Modelo Envolvente

VALPARAÍSO		RESTRICCIONES	
MAX			
F.O	**1.00**		
s.a	15.06	≤	15.06
	9.00	≤	9.00
	1.01	≤	1.01
	14.50	≤	14.50
	1.07	⩾	1.07

SAN ANTONIO			
MAX			
F.O	**1.47**		
s.a.	30.00	≤	30.00
	11.88	≤	15.00
	2.19	≤	2.19
	14.90	≤	14.90
	1.90	⩾	1.90

COLÓN			
MAX			
F.O	**1.01**		
s.a	107.98	≤	159.30
	28.63	≤	37.00
	1.22	≤	1.22
	16.50	≤	16.50
	3.95	⩾	3.95

SANTOS

MAX				
	F.O	**1.00**		
s.a		98.00	≤	98.00
		26.00	≤	26.00
		1.11	≤	1.11
		15.00	≤	15.00
		3.58	⩾	3.58

SHANGHAI

MAX				
	F.O	**1.00**		
s.a		760.00	≤	760.00
		156.00	≤	156.00
		13.00	≤	13.00
		17.50	≤	17.50
		40.23	⩾	40.23

VALENCIA

MAX				
	F.O	**1.37**		
s.a		122.24	≤	122.24
		27.00	≤	27.00
		3.76	≤	13.23
		8.13	≤	16.00
		6.63	⩾	6.63

SINGAPUR

MAX				
	F.O	**1.10**		
s.a		700.00	≤	700.00
		144.36	≤	212.00
		12.57	≤	17.35
		18.00	≤	18.00
		37.11	⩾	37.11

MONTEVIDEO

MAX				
	F.O	**1.00**		
s.a		10.00	≤	10.00
		7.00	≤	7.00
		4.50	≤	4.50
		14.00	≤	14.00
		0.94	⩾	0.94

Anexo 2: *Resultados Modelo Envolvente*. (Fuente Elaboración Propia).

15.3 Resultados Método de Dos Etapas

		RESTRICCIONES		
VALPARAÍSO	MAX			
	F.O	**1.00**		
	s.a	15.06	≤	15.06
		9.00	≤	9.00
		1.01	≤	1.01
		14.50	≤	14.50
		1.07	≥	1.07
SAN ANTONIO	MAX			
	F.O	**1.47**		
	s.a.	30.00	≤	30.00
		11.88	≤	15.00
		2.19	≤	2.19
		14.90	≤	14.90
		1.90	≥	1.90
COLÓN	MAX			
	F.O	**1.01**		
	s.a	107.98	≤	159.30
		28.63	≤	37.00
		1.22	≤	1.22
		16.50	≤	16.50
		3.95	≥	3.95
SANTOS	MAX			
	F.O	**1.00**		
	s.a	98.00	≤	98.00
		26.00	≤	26.00
		1.11	≤	1.11
		15.00	≤	15.00
		3.58	≥	3.58

SHANGHAI	MAX			
	F.O	**1.00**		
	s.a	760.00	≤	760.00
		156.00	≤	156.00
		13.00	≤	13.00
		17.50	≤	17.50
		40.23	≥	40.23
VALENCIA	MAX			
	F.O	**1.37**		
	s.a	122.24	≤	122.24
		27.00	≤	27.00
		3.76	≤	13.23
		8.13	≤	16.00
		6.63	≥	6.63
SINGAPUR	MAX			
	F.O	**1.10**		
	s.a	700.00	≤	700.00
		144.36	≤	212.00
		12.57	≤	17.35
		18.00	≤	18.00
		37.11	≥	37.11
MONTEVIDEO	MAX			
	F.O	**1.00**		
	s.a	10.00	≤	10.00
		7.00	≤	7.00
		4.50	≤	4.50
		14.00	≤	14.00
		0.94	≥	0.94

Anexo 3: *Resultados Primera Etapa de Método de Dos Etapas.* (Fuente Elaboración Propia).

VALPARAÍSO	MAX				
		F.O.	0		
	s.a		15.06	=	15.06
			9.00	=	9.00
			1.01	=	1.01
			14.50	=	14.50
			1.07	=	1.07
SAN ANTONIO	MAX				
		F.O.	4.41		
	s.a		30.00	=	30.00
			11.88	=	11.88
			2.19	=	2.19
			14.90	=	14.90
			1.90	=	3.20
COLÓN	MAX				
		F.O.	59.74		
	s.a		107.98	=	107.98
			28.63	=	28.63
			1.22	=	1.22
			16.50	=	16.50
			3.95	=	4.00
SANTOS	MAX				
		F.O.	0		
	s.a		98.00	=	98.00
			26.00	=	26.00
			1.11	=	1.11
			15.00	=	15.00
			3.58	=	3.58
SHANGHAI	MAX				
		F.O.	0		
	s.a		760.00	=	760.00
			156.00	=	156.00
			13.00	=	13.00
			17.50	=	17.50
			40.23	=	40.23

VALENCIA	MAX				
		F.O.	19.14		
	s.a		122.24	=	122.24
			27.00	=	27.00
			3.76	=	3.76
			8.13	=	8.13
			6.63	=	8.43
SINGAPUR	MAX				
		F.O.	75.83		
	s.a		700.00	=	700.00
			144.36	=	144.36
			12.57	=	12.57
			18.00	=	18.00
			37.11	=	40.52
MONTEVIDEO	MAX				
		F.O.	0		
	s.a		10.00	=	10.00
			7.00	=	7.00
			4.50	=	4.50
			14.00	=	14.00
			0.94	=	0.94

Anexo 4: *Resultados Segunda Etapa de Modelo de Dos Etapas.* (Fuente Elaboración Propia).

15.4 Resultados Modelo BCC

		RESTRICCIONES		
VALPARAÍSO	MAX			
	F.O	**1.00**		
	s.a	15.06	≤	15.06
		9.00	≤	9.00
		1.01	≤	1.01
		14.50	≤	14.50
		1.07	≥	1.07
		1.00	=	1.00
SAN ANTONIO	MAX			
	F.O	**1.46**		
	s.a.	30.00	≤	30.00
		11.68	≤	15.00
		2.19	≤	2.19
		14.43	≤	14.90
		1.89	≥	1.89
		1.00	=	1.00
COLÓN	MAX			
	F.O	**1.01**		
	s.a	104.35	≤	159.30
		27.25	≤	37.00
		1.22	≤	1.22
		15.02	≤	16.50
		3.93	≥	3.93
		1.00	=	1.00
SANTOS	MAX			
	F.O	**1.00**		
	s.a	98.00	≤	98.00
		26.00	≤	26.00
		1.11	≤	1.11
		15.00	≤	15.00
		3.58	≥	3.58
		1.00	=	1.00
SHANGHAI	MAX			
	F.O	**1.00**		
	s.a	760.00	≤	760.00
		156.00	≤	156.00
		13.00	≤	13.00
		17.50	≤	17.50
		40.23	≥	40.23
		1.00	=	1.00

VALENCIA	MAX			
	F.O	**1.29**		
	s.a	110.67	≤	122.24
		27.00	≤	27.00
		5.64	≤	13.23
		14.47	≤	16.00
		6.21	⩾	6.21
		1.00	=	1.00
SINGAPUR	MAX			
	F.O	**1.10**		
	s.a	700.00	≤	700.00
		144.08	≤	212.00
		12.32	≤	17.35
		17.22	≤	18.00
		37.09	⩾	37.09
		1.00	=	1.00
MONTEVIDEO	MAX			
	F.O	**1.00**		
	s.a	10.00	≤	10.00
		7.00	≤	7.00
		4.50	≤	4.50
		14.00	≤	14.00
		0.94	⩾	0.94
		1.00	=	1.00

Anexo 5: *Resultados Primera Etapa de Modelo BCC*. (Fuente Elaboración Propia).

			RESTRICCIONES		
VALPARAÍSO	MAX				
		F.O.	0		
	s.a		15.06	=	15.06
			9.00	=	9.00
			1.01	=	1.01
			14.50	=	14.50
			1.07	=	1.07
SAN ANTONIO	MAX				
		F.O.	4.38		
	s.a		30.00	=	30.00
			11.68	=	11.68
			2.19	=	2.19
			14.43	=	14.43
			1.89	=	2.49
COLÓN	MAX				
		F.O.	66.22		
	s.a		104.35	=	104.35
			27.25	=	27.25
			1.22	=	1.22
			15.02	=	15.02
			3.93	=	3.97
SANTOS	MAX				
		F.O.	0		
	s.a		98.00	=	98.00
			26.00	=	26.00
			1.11	=	1.11
			15.00	=	15.00
			3.58	=	3.58
SHANGHAI	MAX				
		F.O.	0		
	s.a		760.00	=	760.00
			156.00	=	156.00
			13.00	=	13.00
			17.50	=	17.50
			40.23	=	40.23

VALENCIA	MAX				
		F.O.	22.07		
	s.a		110.67	=	110.67
			27.00	=	27.00
			5.64	=	5.64
			14.47	=	14.47
			6.21	=	7.59
SINGAPUR	MAX				
		F.O.	77.12		
	s.a		700.00	=	700.00
			144.08	=	144.08
			12.32	=	12.32
			17.22	=	17.22
			37.09	=	40.47
MONTEVIDEO	MAX				
		F.O.	0		
	s.a		10.00	=	10.00
			7.00	=	7.00
			4.50	=	4.50
			14.00	=	14.00
			0.94	=	0.94

Anexo 6: *Resultados Segunda Etapa Modelo BCC.* (Fuente Elaboración Propia).