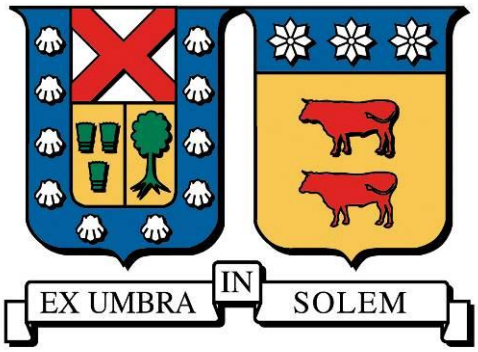


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

“Evaluación integral de un Data Center en Chile: considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos”

Gabriel Antonio Baltazar Olivares

MAGÍSTER EN ECONOMÍA ENERGÉTICA

2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☐ Memoria o trabajo de título ☒ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: "Evaluación integral de un Data Center en Chile: considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos"

Nombre del candidato(a): Gabriel Antonio Baltazar Olivares

Carrera / Grado: Magister Economía Energética

Campus: Vitacura **Departamento:** Ingeniería Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, ELIO GIOVANNI CUNEO HERVIEUX, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

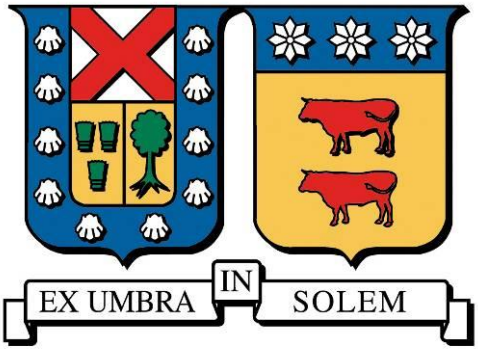
4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 23-09-2026 **Firma:** Powered by ecert Firma electrónica avanzada ELIO GIOVANNI CUNEO HERVIEUX 2026.09.23 16:26:59 -0300

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 22-09-2026 **Firma:** Gabriel Baltazar



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

"Evaluación integral de un Data Center en Chile: considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos"

Tesina de grado presentada por

Gabriel Antonio Baltazar Olivares

como requisito parcial para optar al grado de

Magíster en Economía Energética

Profesor Guía
Ing. Elio Cuneo

Profesor Correferente
Ing. Juan Carlos Olmedo

Profesor Correferente
Luis Fuentealba

Septiembre 2026

TÍTULO DE LA TESINA:

“Evaluación integral de un Data Center en Chile: considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos”

AUTOR:

Gabriel Antonio Baltazar Olivares

TRABAJO DE TESINA, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el Grado de Magíster en Economía Energética del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre Profesor: Ing. Elio Cuneo

Nombre Profesor: Ing. Juan Carlos Olmedo

Nombre Profesor: Ing. Luis Fuentealba

Septiembre de 2026, Santiago, Chile.

AGRADECIMIENTOS

Llegan a su termino 2 años de un gran esfuerzo en busca de seguir aprendiendo de esta área tan linda como es la energía. Toda una vida laboral en operaciones generando energía para el país y era hora de ver el otro lado, tener una mirada más global.

En primer lugar me gustaría agradecer a mis padres que sin lugar a duda son el motor que me da energía para avanzar en todas mis metas, en segundo lugar a mis hermanos que son lo más importante que te puedo tener y que se sientan orgulloso de su hermano mayor.

También quisiera agradecer a mi abuelita Lely por todo su cariño, a mis tíos y primos por siempre estar en todas y apoyándome siempre.

A mis amigos que creyeron en mí, a mis compañeros del magister que saben de primera mano lo que se tuvo que sufrir, a los profesores del magister por su entrega y enseñanza, a mi empresa Engie y jefatura (Ivan Canto, Daniel Morales y Milan Vlahovic) por darme todas las facilidades para poder asistir a clases.

Gracias totales a todos aquellos que hicieron posible este logro.

DEDICATORIA

A mis padres por todo su amor que me han dado.

A mis hermanos que son lo más importante en mi vida.

A todas aquellas personas que hicieron posible este logro.

Gracias totales.

ÍNDICE

RESUMEN 12
ABSTRACT 13
GLOSARIO 14
1. Introducción 16
2. Objetivos 17
2.1 Objetivo General 17
2.2 Objetivos Específicos 17
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO 18
3.1 Revisión técnica, regulatoria y ambiental 18
3.2 Definición del caso de estudio y de los escenarios territoriales 18
3.3 Modelación técnica, energética e hídrica 18
3.4 Evaluación económica y flexibilidad 19
3.5 Sensibilidad, comparación y guía de localización 19
4. ESTADO DEL ARTE 20
4.1 Fundamentos técnicos de los centros de datos 20
4.1.1 Definición y clasificación de centros de datos 20
4.1.2 Estándares de disponibilidad y redundancia 21
4.1.3 Arquitectura física y eléctrica 22
4.2 Contexto de mercado en Chile 24
4.3 Indicadores de eficiencia energética 26
4.3.1 PUE: definición y descomposición 26
4.3.2 Termodinámica del enfriamiento y la variable geográfica 28
4.4 Impacto ambiental y uso de recursos hídricos 28
4.5 Sistemas de enfriamiento 30
4.6 Conectividad y latencia 33
4.7 Marco normativo 33
4.7.1 Marco regulatorio internacional 33
4.7.2 Marco institucional y normativo en Chile 34

4.7.3 Plan Nacional de Data Centers (PDATA 2024–2030) 35
4.8 Participación en el mercado eléctrico chileno 36
4.8.1 Flexibilidad de la demanda y rol de los centros de datos 36
4.8.2 Caracterización de la flexibilidad 37
4.8.3 Recursos de flexibilidad del centro de datos 38
4.8.4 Servicios complementarios en el Sistema Eléctrico Nacional 40
5. Análisis del marco regulatorio, ambiental y territorial aplicable a data centers en Chile 42
5.1 Alcance del análisis regulatorio y ambiental 42
5.2 Marco regulatorio común aplicable a los data centers 43
5.2.1 Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental 43
5.2.2 Planificación territorial y compatibilidad de uso de suelo 45
5.2.3 Conexión eléctrica y obras energéticas asociadas 45
5.2.4 Generación de respaldo, almacenamiento de combustibles y sustancias peligrosas 46
5.2.5 Abastecimiento de agua, refrigeración y permisos sanitarios 47
5.2.6 Emisiones atmosféricas, ruido, residuos y gestión de contingencias 48
5.3 Permisos y exigencias según la configuración del proyecto 49
5.4 Diferenciación ambiental y territorial por macrozona 50
5.4.1 Macrozona Norte 51
5.4.2 Macrozona Centro 52
5.4.3 Macrozona Sur 52
5.5 Matriz comparativa de riesgos y permisos por macrozona 53
5.6 Implicancias para la prefactibilidad de proyectos de data centers 54
6. Caso de estudio: data center tipo de 30 MW 56
6.1 Definición y criterio de comparación del caso base 56
6.2 Configuración funcional y balance energético nominal 57
6.3 Dimensionamiento físico del edificio y del emplazamiento 59
6.3.1 White space y edificio principal 59

6.3.2 Patios técnicos y superficie del predio 60
6.4 Arquitectura eléctrica y sistema de respaldo 62
6.4.1 Autonomía de combustible 64
6.5 Arquitectura térmica y perfil operacional 65
6.5.1 Utilización anual y sensibilidad energética 67
6.6 Base común y variables de comparación entre macrozonas 68
7. Flexibilidad del data center tipo 70
7.1 Recursos de flexibilidad considerados 70
7.2 Flexibilidad del sistema UPS 71
7.3 Flexibilidad de las cargas informáticas 73
7.4 Flexibilidad térmica mediante almacenamiento de agua fría 74
7.5 Portafolio de flexibilidad del caso de estudio 76
7.6 Escenarios de flexibilidad del data center 78
7.7 Valorización económica referencial de los recursos flexibles 79
7.8 Proyección del potencial de flexibilidad al año 2030 81
8. Análisis económico comparativo del data center tipo 84
8.1 Alcance y base de cálculo 84
8.2 Eficiencia energética y consumo por emplazamiento 85
8.3 WUE directo y huella hídrica indirecta 89
8.4 CAPEX por emplazamiento 91
8.5 OPEX energético y cargos de transmisión 94
8.5.1 Energía 94
8.5.2 Transmisión 94
8.6 Costo total de propiedad comparable 95
8.6.1 Incorporación de la flexibilidad 96
8.7 Síntesis comparativa 97
9. Análisis de sensibilidad, escenarios y guía de localización 99
9.1 Metodología y rangos de análisis 99
9.2 Sensibilidad univariada del TCO 100

9.2.1 Energía, transmisión y tasa de descuento 101
9.2.2 Conexión, fibra, terreno y logística 102
9.2.3 PUE, utilización y flexibilidad 103
9.3 Puntos de quiebre 104
9.4 Escenarios integrados 105
9.5 Sensibilidad ambiental 107
9.6 Recomendación de localización por emplazamiento 109
9.7 Jerarquía de decisión 110
9.8 Guía detallada para la localización de data centers en Chile 111
9.8.1 Definición del proyecto y antecedentes mínimos 112
9.8.2 Filtros habilitantes y descarte temprano 112
9.8.3 Evaluación técnica, económica y temporal del sitio 113
9.8.4 Umbrales de referencia derivados del caso de estudio 114
9.8.5 Compatibilidad estratégica por macrozona 115
10. Conclusiones y recomendaciones finales 117
10.1 Resultado económico y robustez de la comparación 117
10.2 Conclusiones técnicas 118
10.3 Conclusiones por macrozona 118
10.3.1 Macrozona Norte: Antofagasta 119
10.3.2 Macrozona Centro: Valparaíso 120
10.3.3 Macrozona Sur: Concepción 120
10.4 Conclusiones sobre flexibilidad 121
10.5 Limitaciones 122
10.6 Recomendaciones para factibilidad 122
10.7 Cierre 123
11. REFERENCIAS 125
12. ANEXOS DE CÁLCULO 127
12.1 Desarrollo del caso base de 30 MW 127
12.2 Desarrollo del potencial de flexibilidad 128

12.3 Procesamiento climático y cálculo del PUE 129
12.4 Desarrollo económico y puntos de quiebre 130

RESUMEN

Esta tesina evalúa comparativamente la localización de un data center con un consumo de 30 MW en Chile, considerando emplazamientos representativos de las macrozonas Norte, Centro y Sur. El problema surge de que la expansión de esta infraestructura digital exige decisiones que combinan disponibilidad eléctrica, eficiencia energética, uso de agua, conectividad, permisos, inversión y continuidad operacional, mientras la discusión nacional se ha concentrado principalmente en proyectos individuales y en la zona central. Para aislar el efecto territorial se definió una arquitectura común de 25 MW de carga TI, estándar Tier III y refrigeración híbrida directa al chip, aplicada a Antofagasta, Valparaíso y Concepción. Sobre esta base se modelaron el PUE, el WUE directo e indirecto, el CAPEX, los costos de energía y transmisión y el costo total de propiedad a veinte años. Además, se cuantificaron recursos de flexibilidad mediante UPS, cargas informáticas diferibles y almacenamiento térmico, y se desarrollaron sensibilidades, puntos de quiebre y escenarios integrados.

Los resultados muestran que Concepción alcanza el menor TCO, con 383, 86 MUSD, seguida por Valparaíso con 386,15 MUSD y Antofagasta con 427,61 MUSD. La diferencia de 0,6 % entre Centro y Sur es inferior a la incertidumbre propia de una prefactibilidad, por lo que ambas alternativas conforman la lista corta general. Concepción presenta el menor PUE y mejora a alta utilización; Valparaíso registra el menor CAPEX y resulta más robusta ante una ocupación gradual; Antofagasta no lidera el caso de propósito general, pero adquiere valor estratégico para edge minero, analítica industrial y procesos batch cuando existe demanda ancla, infraestructura habilitante y un contrato energético favorable. El WUE indirecto es menor en el Norte, aunque este resultado no sustituye la evaluación física y jurídica del agua en cada predio. La flexibilidad es técnicamente viable y su valorización representa una fracción reducida del TCO, por lo que se presenta como un aporte complementario.

La contribución principal es una guía de localización que ordena filtros habilitantes, evaluación técnico-económica, umbrales de decisión y compatibilidad entre macrozona y servicio digital. Se concluye que no existe un ganador territorial universal: la selección debe sustentarse en información específica de conexión, contrato eléctrico, fibra, agua, permisos, plazo y perfil de carga.

Palabras clave: data centers; localización; TCO; PUE; WUE; flexibilidad; Chile.

ABSTRACT

This thesis comparatively assesses the siting of a 30 MW colocation data center in Chile using representative locations in the Northern, Central, and Southern macrozones. The research addresses a decision problem in which power availability, energy efficiency, water use, digital connectivity, permitting, investment, and operational continuity must be evaluated jointly, whereas the national debate has largely focused on individual projects and the central area. To isolate the territorial effect, a common technical architecture was defined: 25 MW of IT load, Tier III availability, and hybrid direct-to-chip cooling. This architecture was evaluated in Antofagasta, Valparaíso, and Concepción. The study modeled PUE, direct and indirect WUE, CAPEX, energy and transmission costs, and a twenty-year total cost of ownership. It also quantified flexibility resources based on UPS capacity, deferrable computing workloads, and thermal energy storage, and developed sensitivity tests, break-even values, and integrated scenarios.

The results show that Concepción has the lowest TCO at USD 383.86 million, followed by Valparaíso at USD 386.15 million and Antofagasta at USD 427.61 million. The 0.6% difference between the Central and Southern cases is below the uncertainty expected at pre-feasibility level; therefore, both locations form the general shortlist. Concepción achieves the lowest PUE and improves at high utilization, while Valparaíso has the lowest CAPEX and is more robust under gradual occupancy. Antofagasta does not lead the general-purpose case, but it can provide strategic value for mining edge computing, industrial analytics, and batch processing when an anchor demand, enabling infrastructure, and a favorable electricity contract are available. The Northern case also has the lowest indirect WUE under the adopted assumptions, although this indicator does not replace a site-specific assessment of physical and legal water availability. Flexibility is technically feasible, and its estimated economic value represents a small share of TCO, so it is presented as a complementary attribute.

The main contribution is a siting guide that combines enabling filters, technical-economic evaluation, decision thresholds, and compatibility between each macrozone and the intended digital service. The study concludes that no macrozone is universally optimal: the final decision must rely on site-specific evidence regarding grid connection, electricity contracts, fiber routes, water, permits, schedule, and workload profile.

Keywords: data centers; siting; TCO; PUE; WUE; flexibility; Chile.

GLOSARIO

Sigla	Inglés	Español	Sigla	Inglés	Español
AI / IA	Artificial Intelligence	Inteligencia artificial	**IXP**	Internet Exchange Point	Punto de intercambio de tráfico de internet
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers	Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado	**MMR**	Meet-Me Room	Sala de interconexión de redes y operadores
BESS	Battery Energy Storage System	Sistema de almacenamiento de energía en baterías	**NPV / VPN**	Net Present Value	Valor presente neto
BMS	Building Management System	Sistema de gestión del edificio	**OPEX**	Operating Expenditure	Gastos de operación
CAPEX	Capital Expenditure	Gastos de capital o inversión inicial	**PBE**	Base Energy Price	Precio básico de la energía
CDU	Coolant Distribution Unit	Unidad de distribución de refrigerante	**PDATA**	National Data Center Plan	Plan Nacional de Data Centers
CNE	National Energy Commission	Comisión Nacional de Energía	**PDU**	Power Distribution Unit	Unidad de distribución de potencia
COP	Coefficient of Performance	Coeficiente de desempeño	**PPA**	Power Purchase Agreement	Contrato de compraventa de energía
CRAC	Computer Room Air Conditioner	Unidad de aire acondicionado para sala informática	**PUE**	Power Usage Effectiveness	Eficiencia del uso de la energía
CRAH	Computer Room Air Handler	Unidad manejadora de aire para sala informática	**SEA**	Environmental Assessment Service	Servicio de Evaluación Ambiental
CUE	Carbon Usage Effectiveness	Eficiencia del uso de carbono	**SEC**	Superintendency of Electricity and Fuels	Superintendencia de Electricidad y Combustibles
D2C	Direct-to-Chip Cooling	Refrigeración directa al chip	**SEIA**	Environmental Impact Assessment System	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
DCIM	Data Center Infrastructure Management	Gestión de infraestructura del data center	**SEN**	National Electric System	Sistema Eléctrico Nacional
DVFS	Dynamic Voltage and Frequency Scaling	Escalado dinámico de voltaje y frecuencia	**SEREMI**	Regional Ministerial Secretariat	Secretaría Regional Ministerial
EMS	Energy Management System	Sistema de gestión de energía	**SLA**	Service-Level Agreement	Acuerdo de nivel de servicio
EPRI	Electric Power Research Institute	Instituto de Investigación de Energía Eléctrica	**SMA**	Superintendency of the Environment	Superintendencia del Medio Ambiente
ERF	Energy Reuse Factor	Factor de reutilización de energía	**SSCC**	Ancillary Services	Servicios Complementarios

Sigla	Inglés	Español	Sigla	Inglés	Español
EWIF	Electricity Water Intensity Factor	Factor de intensidad hídrica de la electricidad	**TCO**	Total Cost of Ownership	Costo total de propiedad
FVP	Present Value Factor	Factor de valor presente	**TES**	Thermal Energy Storage	Almacenamiento de energía térmica
GPU	Graphics Processing Unit	Unidad de procesamiento gráfico	**TMY**	Typical Meteorological Year	Año meteorológico típico
HPC	High-Performance Computing	Computación de alto rendimiento	**UPS**	Uninterruptible Power Supply	Sistema de alimentación ininterrumpida
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning	Calefacción, ventilación y aire acondicionado	**WACC**	Weighted Average Cost of Capital	Costo promedio ponderado de capital
ISO/IEC	International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission	Organización Internacional de Normalización / Comisión Electrotécnica Internacional	**WUE**	Water Usage Effectiveness	Eficiencia del uso de agua
IT / TI	Information Technology	Tecnologías de la información			

1. INTRODUCCIÓN

Los data centers son infraestructuras críticas para la economía digital. En ellos se procesan, almacenan y transmiten los datos utilizados por servicios financieros, telecomunicaciones, plataformas en la nube, inteligencia artificial y procesos industriales. Su operación continua requiere suministro eléctrico confiable, respaldo, refrigeración, conectividad y seguridad. Su desarrollo relaciona la expansión digital con la planificación energética, el uso de recursos y la infraestructura territorial.

Chile reúne condiciones relevantes para el crecimiento de esta industria, como conectividad internacional, redes de fibra óptica, disponibilidad de generación eléctrica y una participación creciente de fuentes renovables. Estas condiciones varían entre territorios. La capacidad y el plazo de conexión, el precio de la energía, el clima, el agua, la redundancia de fibra, el uso de suelo y las exigencias ambientales presentan diferencias entre las macrozonas Norte, Centro y Sur. La concentración de proyectos en la zona central convive con oportunidades regionales vinculadas a la minería, la actividad industrial y nuevos servicios digitales.

La motivación de esta tesina surge de la necesidad de analizar la localización de data centers en Chile mediante una visión integrada. La energía, el agua, la conectividad y los permisos suelen examinarse por separado, aunque su interacción determina el desempeño del proyecto. El estudio considera un data center tipo de 30 MW y compara emplazamientos representativos en Antofagasta, Valparaíso y Concepción. La evaluación incorpora variables técnicas, ambientales, regulatorias y económicas, además de la flexibilidad como atributo complementario, para aportar criterios de prefactibilidad aplicables a la selección de sitios en las tres macrozonas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar técnica y económicamente la instalación de un data center de gran escala en Chile, comparando escenarios de localización en las macrozonas Norte, Centro y Sur. El estudio analiza la demanda eléctrica, la eficiencia hídrica y energética, así como los riesgos regulatorios y ambientales, con el fin de proponer lineamientos estratégicos para un diseño sostenible.

2.2 Objetivos Específicos

- Analizar instalaciones de data center a nivel mundial considerando aspectos técnicos, regulatorios y ambientales.
- Analizar el marco regulatorio y ambiental aplicable —SEIA, lineamientos específicos para data centers, normativa de uso de agua y combustibles y exigencias del SEN—, identificando diferencias y riesgos relevantes según el emplazamiento.
- Cuantificar la demanda eléctrica y el consumo anual de agua de un data center tipo, a partir de indicadores WUE y de la tecnología de enfriamiento seleccionada, y asignarlos a escenarios Norte, Centro y Sur, considerando la estructura de generación predominante y las señales de precio de energía de cada macrozona.
- Comparar económicamente las alternativas de desarrollo en las macrozonas Norte, Centro y Sur e incorporar, de manera complementaria, el potencial de prestación de servicios complementarios.
- Proponer criterios y buenas prácticas para la localización y el diseño de data centers en Chile, diferenciados por macrozona y considerando la tecnología de enfriamiento seleccionada.

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La investigación se desarrolló mediante un enfoque cuantitativo, descriptivo y comparativo, orientado a evaluar la localización de un data center de gran escala en las macrozonas Norte, Centro y Sur de Chile. Se mantuvo constante la arquitectura técnica para aislar el efecto del emplazamiento sobre la eficiencia energética e hídrica, la inversión, los costos de operación, la regulación y la infraestructura. El alcance correspondió a una evaluación de prefactibilidad organizada en cinco etapas. Los parámetros no disponibles se trataron como supuestos de prefactibilidad, declarados de forma explícita y sometidos a sensibilidad cuando podían alterar el ordenamiento territorial.

3.1 Revisión técnica, regulatoria y ambiental

Se revisó literatura académica, normas, documentos institucionales y antecedentes sectoriales sobre disponibilidad, arquitecturas eléctricas y térmicas, tecnologías de enfriamiento, PUE, WUE, conectividad y flexibilidad de demanda. Asimismo, se analizó el marco chileno aplicable al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, uso de agua, combustibles, emisiones, ruido, instalaciones eléctricas y planificación territorial. Esta revisión permitió definir los criterios técnicos, ambientales y regulatorios utilizados en la comparación.

3.2 Definición del caso de estudio y de los escenarios territoriales

Se estableció un data center tipo de 30 MW de potencia total, 25 MW de carga TI, disponibilidad Tier III y refrigeración líquida Direct-to-Chip en configuración híbrida con rechazo seco. El equipamiento TI activo se excluyó del CAPEX para conservar un alcance comparable del facility. Antofagasta, Valparaíso y Concepción representaron las macrozonas Norte, Centro y Sur. Para cada alternativa se recopilaron antecedentes climáticos, eléctricos, de transmisión, fibra, suelo, agua, riesgos y compatibilidad territorial.

3.3 Modelación técnica, energética e hídrica

Se estimó el consumo anual del facility a partir de la carga TI y de un PUE calculado para cada emplazamiento según el clima y el régimen de enfriamiento. El modelamiento climático se estructuró por regímenes térmicos y se contrastó con registros horarios de años pasados

correspondientes a Antofagasta, Valparaíso y Concepción. El uso de agua se analizó mediante un WUE directo y un componente indirecto atribucional asociado a la generación eléctrica de cada macrozona. También se dimensionaron las áreas principales, la infraestructura eléctrica, el respaldo, los patios técnicos y la conexión, con el fin de cuantificar la demanda eléctrica y la huella hídrica bajo una base común.

3.4 Evaluación económica y flexibilidad

Se estimaron el CAPEX común, el CAPEX territorial, el OPEX energético, los cargos de transmisión y el costo total de propiedad para un horizonte de veinte años. Se utilizó una tasa real de descuento y señales prospectivas de precio de energía, manteniendo separadas las partidas dependientes del sitio. La flexibilidad se evaluó como atributo complementario mediante UPS, cargas informáticas diferibles y almacenamiento térmico. Para cada recurso se definieron potencia, duración, reserva, restricciones, recuperación y valorización referencial. Un BESS dedicado se trató como escenario futuro y no se incorporó sin considerar inversión y degradación.

3.5 Sensibilidad, comparación y guía de localización

Se aplicó una sensibilidad determinística univariada sobre CAPEX, conexión, precio de energía, transmisión, PUE, utilización, tasa de descuento, fibra, terreno y flexibilidad. Se calcularon puntos de quiebre y se construyeron escenarios integrados para identificar las condiciones bajo las cuales cambia la alternativa de menor costo. Los resultados técnicos, económicos, ambientales y regulatorios se integraron en una guía de localización con filtros habilitantes, criterios de descarte, antecedentes mínimos y reglas de decisión. La recomendación distinguió entre aplicaciones de propósito general y usos específicos, como cloud, colocation, IA, HPC y edge computing asociado a minería y procesos industriales.

4. ESTADO DEL ARTE

Este capítulo presenta los fundamentos técnicos, económicos y regulatorios de los centros de datos que constituyen la base conceptual de esta tesina. Se abordan los fundamentos técnicos de estas instalaciones, el contexto de mercado en Chile, los indicadores de eficiencia energética, el impacto ambiental y el uso de recursos hídricos, los sistemas de enfriamiento, la conectividad, el marco normativo y la participación de los centros de datos en el mercado eléctrico.

4.1 Fundamentos técnicos de los centros de datos

El análisis de un centro de datos requiere precisar qué es esta instalación, cómo se clasifican estos recintos y de qué manera se estructuran física y eléctricamente.

4.1.1 Definición y clasificación de centros de datos

Un centro de datos es una instalación que concentra el equipamiento de tecnologías de la información —servidores, sistemas de almacenamiento y equipos de red— junto con la infraestructura de soporte que garantiza su operación continua: suministro eléctrico, climatización, seguridad y control. Funcionalmente, la instalación se organiza en dos capas. La carga de TI corresponde al consumo de los equipos de cómputo y constituye la carga crítica del recinto. La infraestructura de soporte agrupa los consumos de refrigeración, respaldo y servicios auxiliares. La potencia crítica no admite interrupción, mientras que los consumos de soporte presentan grados de maniobrabilidad relevantes para la eficiencia y la gestión energética del recinto.

Según su escala y modelo de negocio, los centros de datos se clasifican habitualmente en cuatro categorías (Tabla 4.1). Los centros hyperscale son instalaciones de gran tamaño operadas por un único propietario, con cargas del orden de decenas a centenas de megawatts y un diseño estandarizado. Los centros de colocation arriendan espacio, energía y refrigeración a múltiples clientes que instalan y administran su propio equipamiento. Los centros enterprise son instalaciones propias de una organización para su uso interno, y los centros edge son instalaciones de menor escala ubicadas cerca del usuario final para reducir la latencia.

Tabla 4.1. Clasificación de centros de datos según escala y modelo de negocio.

Tipo	Operación	Escala típica	Control de cargas
Hyperscale	Único propietario (nube / gran plataforma)	Decenas a centenas de MW	Del operador
Colocation	Arriendo a múltiples clientes	Modular, variable	Del cliente
Enterprise	Organización, uso propio	Pequeña a media	Del propietario
Edge	Distribuido, cercano al usuario	kW a pocos MW	Variable

Fuente: elaboración propia con base en ISO/IEC 22237.

Una distinción operativa transversal es la que separa el *facility* del *IT load*. El *facility* comprende la envolvente física y la infraestructura de soporte —obra civil, suministro eléctrico, respaldo y climatización—, mientras que el *IT load* corresponde al equipamiento de cómputo. La frontera es especialmente nítida en el modelo de *colocation*, donde el operador provee y gestiona el *facility*, pero el equipamiento de cómputo y sus cargas de trabajo pertenecen al cliente. Esta separación determina qué componentes están bajo control del operador y cuáles no.

El caso de estudio de esta tesina corresponde a un centro de datos de *colocation* de 30 MW. Este modelo es el más representativo del desarrollo de la industria en Chile, y su rasgo distintivo —el operador controla la infraestructura de soporte, pero no las cargas de cómputo del cliente— es una característica determinante de este tipo de instalación.

4.1.2 Estándares de disponibilidad y redundancia

La continuidad operativa es el requisito rector del diseño de un centro de datos. La industria formaliza este requisito mediante estándares de disponibilidad, entre los cuales el más difundido es la clasificación *Tier* del Uptime Institute, que ordena las instalaciones en cuatro niveles crecientes de robustez (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Niveles de disponibilidad Tier del Uptime Institute.

Nivel	Característica distintiva	Redundancia
Tier I	Infraestructura básica	N
Tier II	Componentes redundantes	N+1

Nivel	Característica distintiva	Redundancia
Tier III	Mantenibilidad concurrente	N+1
Tier IV	Tolerancia a fallas	2N / 2(N+1)

Fuente: Uptime Institute.

El Tier I corresponde a una infraestructura básica, sin componentes redundantes, en la que cualquier falla o tarea de mantenimiento obliga a detener la operación. El Tier II incorpora componentes redundantes en los sistemas de energía y refrigeración, lo que reduce el riesgo ante la falla de un equipo. El Tier III introduce la mantenibilidad concurrente: dispone de múltiples caminos de distribución de energía y refrigeración, de modo que cualquier componente puede retirarse de servicio para mantenimiento sin interrumpir la operación. El Tier IV agrega la tolerancia a fallas, con caminos activos redundantes que permiten que un evento imprevisto en cualquier componente no afecte el servicio.

La robustez de cada nivel se materializa mediante topologías de redundancia, que describen cuánta capacidad de respaldo se instala respecto de la estrictamente necesaria. La notación N designa la capacidad justa para atender la carga; N+1 agrega una unidad adicional por cada conjunto de N; 2N duplica íntegramente los sistemas; y 2(N+1) combina ambos criterios. La topología escogida determina el número de equipos —grupos electrógenos, unidades de enfriamiento, módulos de alimentación ininterrumpida— y, con ello, la potencia instalada de la infraestructura de soporte.

Un requisito asociado a la disponibilidad es la autonomía de respaldo, entendida como el tiempo durante el cual la instalación debe sostener la carga crítica ante una interrupción del suministro externo. Esta autonomía se provee habitualmente mediante grupos electrógenos, para respaldos prolongados, y sistemas de alimentación ininterrumpida basados en baterías, que cubren la transición hasta el arranque de los generadores.

4.1.3 Arquitectura física y eléctrica

La disposición física de un centro de datos se organiza en torno al *white space*, el área acondicionada que aloja los *racks* de equipos de cómputo. Un parámetro central de diseño es la densidad de potencia por *rack*, expresada en kilowatts por *rack*, que define la concentración de calor a evacuar y las exigencias sobre los sistemas eléctricos y de enfriamiento. Esta densidad

ha mostrado una tendencia sostenida al alza, impulsada por las cargas de inteligencia artificial y el cómputo acelerado por unidades de procesamiento gráfico (GPU), que concentran una potencia por equipo muy superior a la de los servidores convencionales.

La cadena eléctrica conduce la energía desde la acometida en media o alta tensión hasta los equipos de cómputo a través de una sucesión de etapas (Figura 4.1): la transformación de tensión, los tableros de distribución, los sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) —habitualmente de doble conversión, que aíslan la carga crítica de las perturbaciones de la red— y las unidades de distribución de potencia (PDU) que alimentan los *racks*. En paralelo, los grupos electrógenos constituyen el respaldo de mayor duración ante interrupciones prolongadas del suministro.

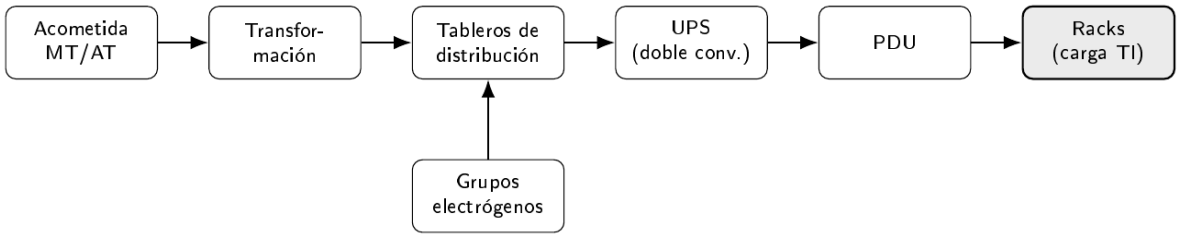


Figura 4.1. Cadena eléctrica de un centro de datos, desde la acometida hasta la carga de TI, con respaldo por grupos electrógenos.

Fuente: elaboración propia.

Desde el punto de vista del balance de potencia, el consumo total de la instalación se descompone en tres grandes bloques: la carga de TI, que agrupa los equipos de cómputo; los sistemas de refrigeración, encargados de evacuar el calor generado; y los servicios auxiliares, que incluyen iluminación, seguridad, oficinas y las pérdidas de la propia cadena eléctrica. La proporción entre estos bloques determina la eficiencia global del recinto.

Dentro de esta arquitectura, ciertos componentes de la infraestructura de soporte presentan capacidad de modulación: los sistemas UPS pueden gestionar potencia mediante su electrónica y su respaldo en baterías, y los equipos de refrigeración admiten cierta variación gracias a la inercia térmica del recinto. Estas características constituyen la base física de la capacidad de gestión energética de un centro de datos.

4.2 Contexto de mercado en Chile

En la última década, Chile se ha consolidado como un destino estratégico para la instalación de centros de datos, impulsado por una combinación de ventajas geográficas, tecnológicas y climáticas. La conectividad es uno de sus pilares: el país cuenta con una red de fibra óptica nacional y cables submarinos que lo posicionan como punto de enlace digital entre Sudamérica, Norteamérica y Asia-Pacífico. Desde la perspectiva eléctrica, la disponibilidad de energía competitiva y la transición hacia fuentes limpias han impulsado el crecimiento del mercado. El Estado reconoce esta industria como estratégica y proyecta consolidar al país como referente regional en infraestructura digital (MinCiencia, 2024).

Pese a las ventajas distribuidas a lo largo del territorio, el desarrollo del ecosistema se ha concentrado casi exclusivamente en el radio urbano de Santiago, con especial intensidad en el sector norte de la capital, liderado por comunas como Quilicura y Cerrillos (Tironi & Albornoz, 2025) (Figura 4.2). Esta aglomeración responde a la búsqueda de accesibilidad logística y proximidad a los nodos de consumo.

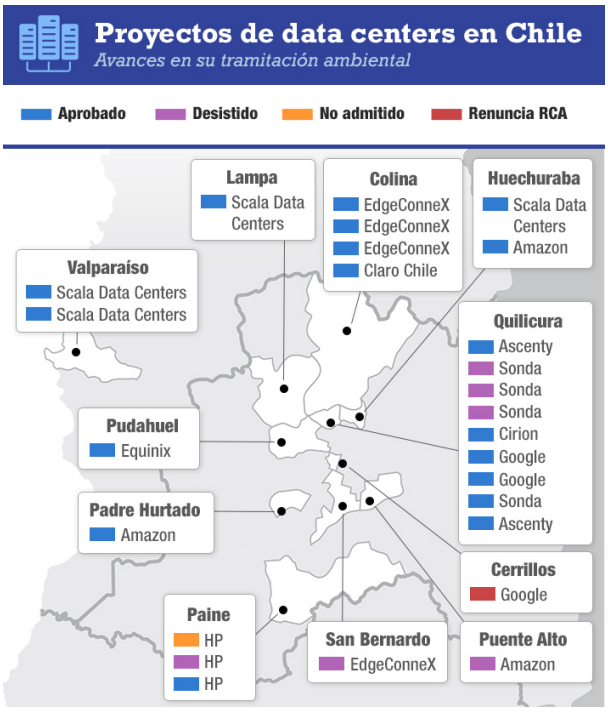


Figura 4.2. Distribución de proyectos de centros de datos en Chile.

Fuente: El Mercurio, reproducido en MinCiencia (2024).

Normativamente, estas instalaciones pueden clasificarse como infraestructura energética o equipamiento; sin embargo, la acumulación masiva de combustible diésel para sus generadores de respaldo ha generado fricción con los planes reguladores comunales, que a menudo las sitúan en la categoría de actividades molestas o peligrosas (Zúñiga Barroso, 2024). A ello se suma que garantizar la continuidad operativa en la Región Metropolitana es cada vez más difícil, debido a la disponibilidad limitada de las redes de transmisión y de las subestaciones locales.

Los centros de datos se han convertido en uno de los consumidores de electricidad de más rápido crecimiento a nivel global, lo que incide directamente en la operación de la red y en las metas de descarbonización (Knittel, Senga, & Wang, 2025). Este crecimiento ha instalado la discusión sobre la localización de nuevas instalaciones y su relación con la disponibilidad energética y los recursos hídricos del territorio.

El mercado chileno combina operadores de colocation y proyectos hyperscale vinculados con grandes proveedores de servicios en la nube. Los reportes sectoriales proyectan un crecimiento sostenido de la capacidad instalada durante la segunda mitad de la década, impulsado por nuevas inversiones, la expansión de la conectividad y la demanda de servicios digitales (Mordor Intelligence, 2026). Aunque la Región Metropolitana continúa concentrando la mayor parte del ecosistema, la cartera de proyectos comienza a incorporar otras regiones del país.

En el contexto latinoamericano, Chile compite por la inversión en centros de datos principalmente con Brasil y México, mercados que presentan mayor escala y clústeres consolidados. La posición competitiva de Chile se sustenta en la participación renovable de su matriz eléctrica, la estabilidad institucional, las condiciones climáticas favorables de las zonas centro y sur y la conectividad internacional. Sus principales desafíos son la concentración de la demanda en la Región Metropolitana, la disponibilidad de red y la presión sobre los recursos hídricos, factores que inciden directamente en la localización y el costo de los nuevos proyectos (MinCiencia, 2024; Mordor Intelligence, 2026).

4.3 Indicadores de eficiencia energética

4.3.1 PUE: definición y descomposición

La evaluación del desempeño de un centro de datos se apoya en métricas estandarizadas a nivel global. El indicador más difundido es el *Power Usage Effectiveness* (PUE), introducido por The Green Grid, definido como la razón entre la energía eléctrica total consumida por la instalación y la energía utilizada por los equipos de tecnologías de la información:

$$PUE = \frac{E_{total}}{E_{IT}} \quad (1)$$

Para identificar el origen de las ineficiencias, la energía total de la instalación se descompone en sus componentes principales:

$$E_{total} = E_{IT} + E_{refrigeración} + E_{potencia} + E_{otros} \quad (2)$$

donde E_refrigeración corresponde al consumo de los sistemas de climatización, E_potencia a las pérdidas en transformadores y sistemas de alimentación ininterrumpida, y E_otros a iluminación y seguridad (Zhou, Gu, & Ma, 2024). Un PUE igual a la unidad representa el caso ideal en que toda la energía se destina al cómputo; los valores reales son superiores, y la diferencia respecto de la unidad refleja el peso de la infraestructura de soporte, dominada por el enfriamiento.

Los reportes industriales muestran que numerosos centros de datos operaban históricamente con valores de PUE superiores a 2,0, mientras que las instalaciones de última generación declaran valores en torno a 1,1–1,5 (Kahil et al., 2025; MinCiencia, 2024) (Figura 4.3). El PUE depende de la tecnología de enfriamiento y de las condiciones climáticas del emplazamiento, por lo que no constituye un valor único, sino que varía a lo largo del año según el régimen térmico.

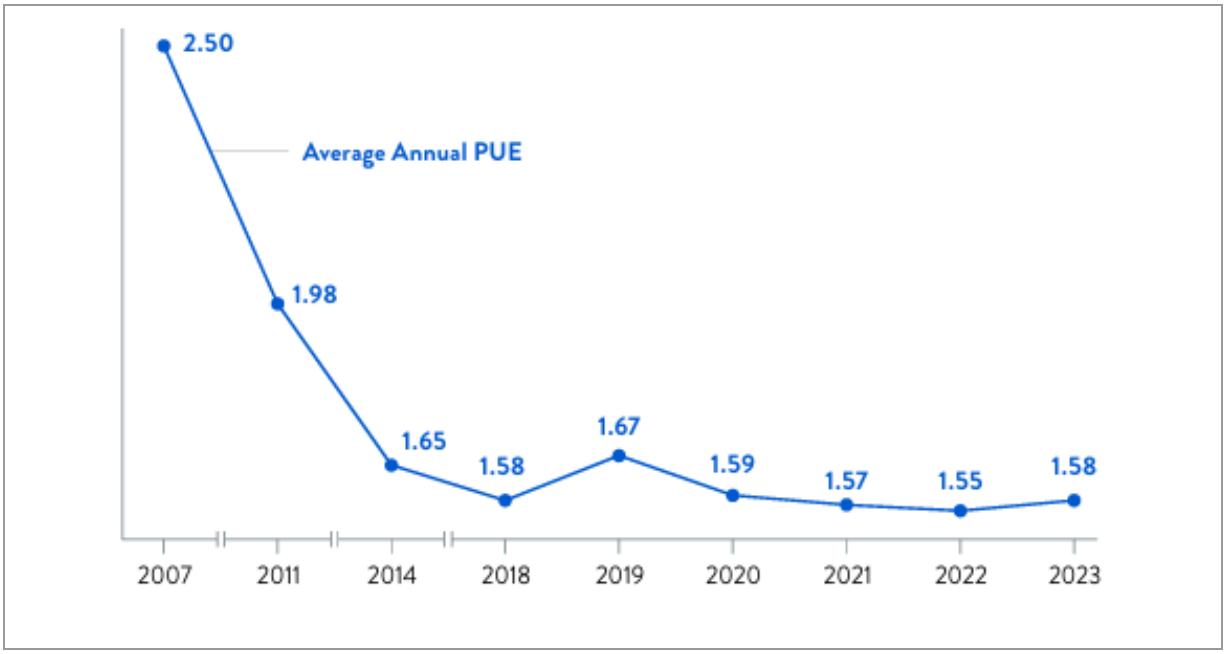


Figura 4.3. Evolución del PUE promedio anual en centros de datos.

Fuente: EPRI (2024).

El PUE incide de forma directa sobre el gasto operativo anual por consumo eléctrico:

$$C_{anual} = PUE \cdot P_{IT} \cdot 8760 \cdot C_{kWh} \quad (3)$$

donde P_IT es la potencia de los equipos informáticos, 8760 las horas del año y C_kWh el precio de la energía. En consecuencia, reducciones del PUE tienen un impacto económico proporcional a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

El PUE presenta limitaciones como métrica única (Kahil et al., 2025; Takci et al., 2025): no captura la productividad computacional de la carga de TI, de modo que dos instalaciones con igual PUE pueden diferir en el volumen de trabajo procesado por kWh; es un indicador agregado y estático, que no refleja variaciones horarias ni estacionales; y puede mejorarse aumentando la carga de TI sin reducir el consumo absoluto. Por ello se han propuesto métricas complementarias, como el *Data Center Infrastructure Efficiency* (DCiE), inverso del PUE, el *Carbon Usage Effectiveness* (CUE), que incorpora las emisiones de la electricidad consumida, y diversos índices de productividad energética (Kahil et al., 2025).

4.3.2 Termodinámica del enfriamiento y la variable geográfica

El principal desafío técnico en la operación de un centro de datos es la disipación de la carga térmica generada por los servidores. La eficiencia de los sistemas de refrigeración mecánica se cuantifica mediante el coeficiente de operación (COP):

$$COP = \frac{\dot{Q}_{removido}}{W_{eléctrico}} \quad (4)$$

donde Q_removido es el calor extraído de las salas y W_eléctrico el trabajo eléctrico consumido por el sistema de refrigeración. Para elevar el COP y reducir el componente de refrigeración del PUE, la industria recurre al enfriamiento libre (*free cooling*), que aprovecha las bajas temperaturas del aire exterior para reducir o suprimir la operación de los compresores mecánicos durante parte del año. El número de horas anuales en que las condiciones ambientales permiten este modo de operación depende directamente del clima del emplazamiento, lo que vincula la localización geográfica con la eficiencia energética de la instalación (Rojas Otárola, 2021).

La creciente densidad de potencia de los equipos de inteligencia artificial ha impulsado la transición desde la refrigeración por aire hacia el enfriamiento líquido. Su justificación reside en la ecuación de transferencia de calor sensible:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (5)$$

donde m es el flujo másico del fluido refrigerante, C_p es su calor específico y ΔT es el diferencial de temperatura. Dado que el calor específico del agua o de los fluidos dieléctricos es muy superior al del aire, el caudal másico necesario para remover una misma cantidad de calor es sustancialmente menor, lo que reduce el consumo de las bombas frente al de los ventiladores (Zhou et al., 2024).

4.4 Impacto ambiental y uso de recursos hídricos

Junto con la energía, el consumo de agua constituye un vector ambiental determinante en la operación de un centro de datos. Para cuantificar la eficiencia en el uso del agua destinada al enfriamiento, The Green Grid introdujo la métrica *Water Usage Effectiveness* (WUE), definida

como la razón entre el volumen total de agua consumida en el sitio y la energía útil consumida por los equipos informáticos:

$$WUE = \frac{V_{agua,total}\ (L)}{E_{IT}\ (kWh)} \quad (6)$$

La adopción de sistemas con alto consumo de agua, como las torres de enfriamiento evaporativo, se explica por una ventaja física: el elevado calor latente de vaporización del agua. Evaporar agua absorbe una cantidad de energía térmica muy superior a la requerida para calentar aire, por lo que disipar el calor de los servidores mediante evaporación permite reducir el uso de compresores mecánicos intensivos en electricidad.

La literatura distingue dos variantes de la métrica (Lei et al., 2025). El WUE directo corresponde al agua consumida en el sitio, típicamente en litros por kWh de TI. El WUE indirecto incorpora, además, el agua asociada a la generación de la electricidad que alimenta la instalación, y se obtiene como el producto entre el factor de intensidad hídrica de la generación (*Electricity Water Intensity Factor*, EWIF) del nodo de conexión y el PUE de la instalación:

$$WUE_{indirecto} = EWIF \cdot PUE \quad (7)$$

El EWIF representa los litros de agua consumidos o evaporados por las centrales para generar un kWh (Figura 4.4), y corresponde al promedio ponderado de los factores hídricos de cada tecnología de generación según su participación en la matriz. Estos factores por tecnología se encuentran documentados en la literatura, en los reportes del NREL para las fuentes convencionales y renovables, y en Mekonnen et al. (2015) para la hidroelectricidad de embalse. Cuando la matriz se abastece de generación solar fotovoltaica o eólica, el EWIF tiende a cero; cuando depende de centrales termoeléctricas, por el enfriamiento del ciclo de vapor, o hidroeléctricas de embalse, por la evaporación superficial, su valor se eleva considerablemente.

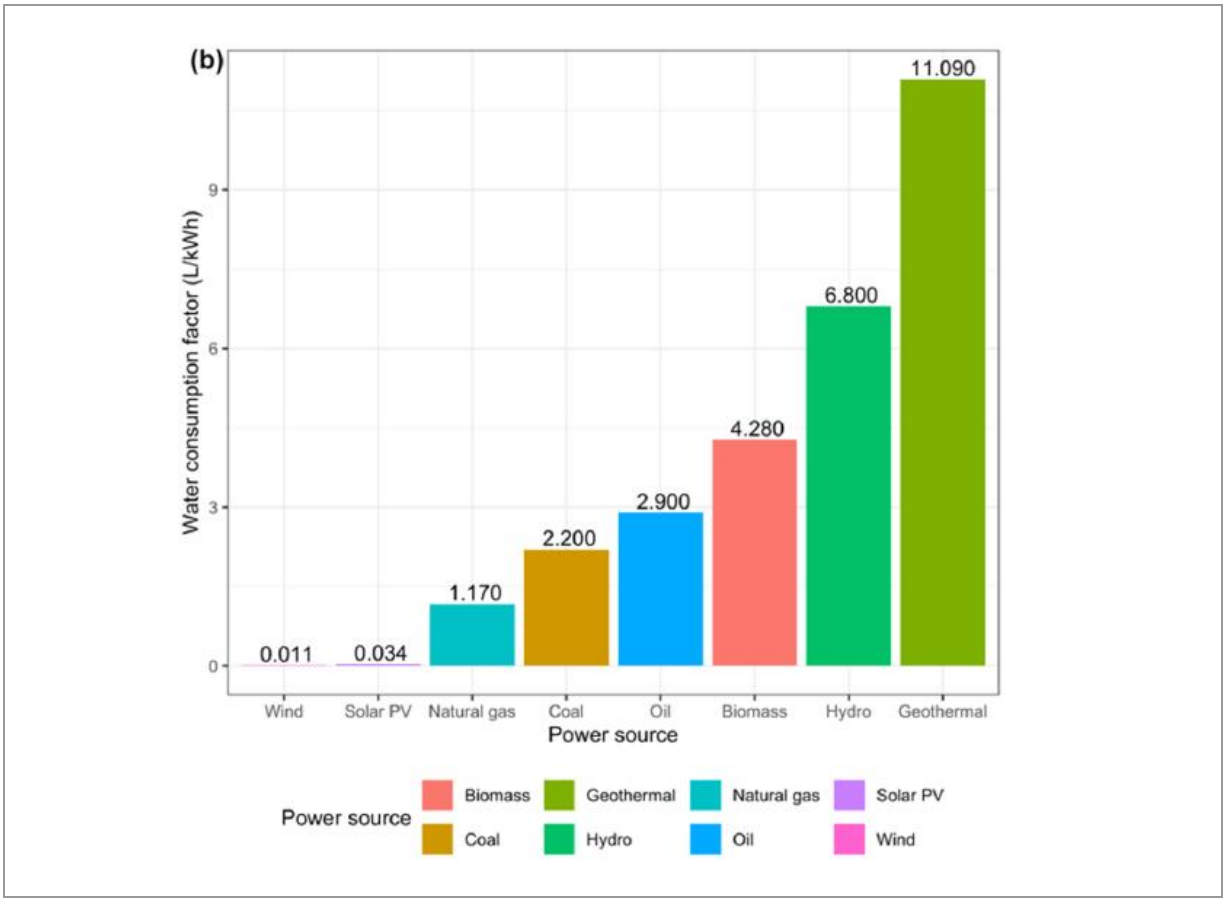


Figura 4.4. Consumo de agua por fuente de generación eléctrica.

Fuente: Lei et al. (2025).

La incorporación del EWIF desplaza parte de la huella hídrica desde el sitio hacia el sistema eléctrico: una instalación con bajo consumo directo de agua puede presentar una huella indirecta significativa si se abastece de una matriz intensiva en agua. De este modo, la huella hídrica total de un centro de datos depende no solo de su tecnología de enfriamiento, sino también de la composición de la matriz eléctrica que lo abastece.

4.5 Sistemas de enfriamiento

Los sistemas de enfriamiento tienen por función evacuar el calor generado por los equipos de cómputo y mantenerlos dentro de los rangos de temperatura y humedad admisibles. Concentran una parte importante del consumo no asociado a TI y son determinantes tanto del PUE como del WUE. La creciente densidad de potencia por *rack* —que ha pasado de valores del orden de 10 a 15 kW a superar los 80 kW en configuraciones orientadas a inteligencia artificial

(Uptime Institute)— ha impulsado una transición desde las soluciones basadas en aire hacia el enfriamiento líquido. La literatura agrupa las tecnologías disponibles en cuatro grandes familias: soluciones basadas en aire, sistemas de agua helada, estrategias de *free cooling* y enfriamiento líquido (Zhou et al., 2024; Lei et al., 2025).

Las soluciones basadas en aire constituyen la tecnología tradicional. Emplean unidades de tratamiento de aire de sala (CRAC/CRAH), que operan por expansión directa de un refrigerante o mediante serpentines de agua helada, y distribuyen el aire frío por pisos falsos o ductos en configuraciones de pasillos frío/caliente. Su eficiencia depende del diseño de la distribución del aire y del control de las recirculaciones, que degradan el desempeño al mezclar aire caliente y frío. El aire posee una capacidad calorífica y una conductividad térmica reducidas, lo que limita su capacidad para evacuar calor al aumentar la densidad por rack (Zhou et al., 2024).

Los sistemas de agua helada utilizan *chillers* aire–agua o agua–agua para producir agua fría, que se distribuye a las unidades terminales en sala. Con frecuencia se complementan con torres de enfriamiento, donde el calor se disipa por evaporación: este mecanismo mejora la eficiencia del rechazo de calor y, por tanto, el PUE, pero aumenta de forma importante el consumo directo de agua, elevando el WUE (Lei et al., 2025).

Las estrategias de *free cooling* aprovechan condiciones ambientales favorables para reducir o suprimir la operación de los compresores. En su modalidad directa, el aire exterior se introduce filtrado a la sala; en la indirecta, se emplea un intercambiador que evita el contacto directo y puede incorporar humidificación adiabática para ampliar su rango. En climas templados y fríos es posible cubrir una fracción significativa de las horas del año con este modo, reduciendo sustancialmente el consumo de energía de enfriamiento (Zhou et al., 2024).

Las tecnologías de enfriamiento líquido aprovechan que el agua y los fluidos dieléctricos poseen una capacidad calorífica varias veces superior y una conductividad térmica muy superior a las del aire, lo que permite evacuar densidades mucho mayores con menor caudal y menor consumo de bombeo. Los intercambiadores en puerta trasera (*rear-door*) sustituyen la puerta posterior del *rack* por un serpentín refrigerado, como solución de transición que conserva la arquitectura de aire. En el extremo de mayor capacidad, la refrigeración por inmersión sumerge los servidores en un fluido dieléctrico, en configuraciones monofásicas o bifásicas, eliminando la infraestructura de aire y admitiendo las densidades más altas (Lei et al., 2025; ASHRAE).

La refrigeración directa al chip (*direct-to-chip*, D2C) ocupa una posición intermedia y de creciente adopción. Consiste en hacer circular un refrigerante líquido a través de placas frías (*cold plates*) montadas directamente sobre los componentes de mayor disipación —procesadores y aceleradores—, extrayendo el calor en su origen. Como las placas frías no cubren la totalidad de los componentes del servidor (memoria, fuentes y periféricos siguen disipando calor al aire), la solución opera habitualmente en configuración híbrida: la refrigeración líquida evacúa el calor de los chips de alta densidad, mientras un sistema de aire atiende la carga térmica residual. Esta arquitectura admite temperaturas de refrigerante elevadas, del orden de 18 a 25 °C, lo que amplía las horas de *free cooling* y reduce la operación de los *chillers* (ASHRAE; Kahil et al., 2025). Cuando el rechazo final se realiza con unidades secas (*dry coolers*) en lugar de torres evaporativas, la configuración híbrida permite minimizar el consumo directo de agua, a costa de un mayor consumo eléctrico en climas cálidos.

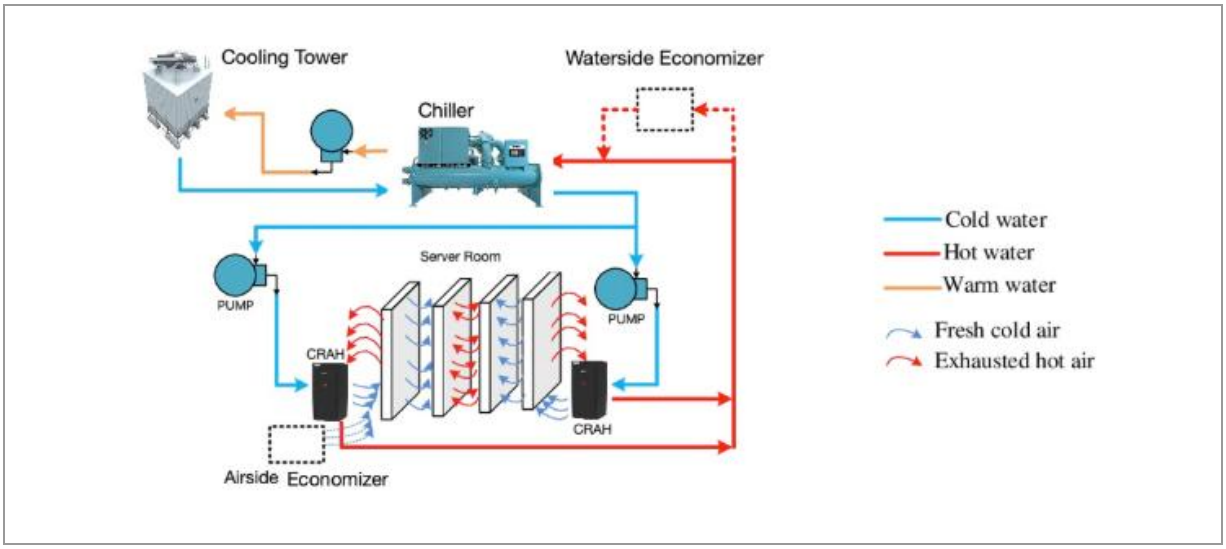


Figura 4.5. Principales tecnologías de enfriamiento para centros de datos.

Fuente: U.S. EPA ENERGY STAR.

La elección de la tecnología de enfriamiento constituye un problema de compromiso entre consumo de energía y de agua. Los sistemas con torres de enfriamiento y *chillers* agua–agua suelen alcanzar mejores valores de PUE, pero a costa de un WUE directo más alto, mientras que los sistemas completamente secos presentan el comportamiento inverso (Lei et al., 2025). Los esquemas híbridos, que combinan enfriamiento líquido, economizadores y unidades secas, buscan un equilibrio entre ambos extremos. Al considerar el WUE indirecto, esta decisión

depende también de la composición de la matriz eléctrica del sistema donde se conecta la instalación (Lei et al., 2025).

4.6 Conectividad y latencia

La conectividad es un atributo determinante en la localización de un centro de datos. El desempeño de los servicios alojados depende de la cercanía a la infraestructura de fibra óptica y, en particular, a las estaciones de aterrizaje de cables submarinos (*cable landing stations*), que constituyen los puntos de entrada de la conectividad internacional (TeleGeography, 2024).

La latencia —el tiempo de propagación de los datos entre el usuario y la instalación— es especialmente crítica para servicios en tiempo real. Su minimización explica tanto la concentración de instalaciones cerca de los nodos de consumo como el desarrollo de los centros *edge*, que acercan el procesamiento al usuario final.

En el caso de Chile, la red de fibra óptica nacional y los cables submarinos que conectan al país con Sudamérica, Norteamérica y Asia-Pacífico constituyen una ventaja competitiva para el desarrollo de la industria, al posicionar al territorio como punto de enlace digital regional.

Desde la perspectiva de la localización, la conectividad constituye una tercera dimensión de análisis junto con la disponibilidad energética y los recursos hídricos. Factores como la densidad de la infraestructura de fibra, la diversidad de rutas y la presencia de múltiples proveedores con entradas independientes —que reducen los puntos únicos de falla—, la cercanía a los puntos de intercambio de tráfico de internet (Internet Exchange Points, IXP) y la distancia a las estaciones de aterrizaje de cables submarinos determinan tanto la latencia como la resiliencia de una instalación (TeleGeography, 2024). Estos factores pueden variar significativamente entre regiones de un mismo país: alejarse de los grandes centros urbanos, donde se concentran la fibra y los nodos de intercambio, suele implicar mayores costos de backhaul y una menor redundancia de red.

4.7 Marco normativo

4.7.1 Marco regulatorio internacional

La industria de los centros de datos operó durante años bajo esquemas de autorregulación técnica, como las certificaciones *Tier* del Uptime Institute. La presión climática ha impulsado

una transición hacia la regulación estatal, liderada a nivel global por la Unión Europea. En el marco del Pacto Verde Europeo, la Directiva de Eficiencia Energética (UE) 2023/1791 estableció objetivos vinculantes de reducción del consumo de energía final y de las emisiones de carbono hacia 2030.

Para su aplicación a la industria digital, el Reglamento Delegado (UE) 2024/1364 instauró un régimen común de evaluación y calificación para los centros de datos en territorio europeo. Entre sus exigencias destacan el reporte obligatorio y público de métricas —PUE, WUE y CUE—, que pasan de ser buenas prácticas a obligaciones legales, y la incorporación del factor de reutilización de calor residual (*Energy Reuse Factor*, ERF), que obliga a analizar la exportación del calor de los servidores hacia redes de calefacción distrital o industrias cercanas.

Estados Unidos opera con regulaciones fragmentadas a nivel estatal y municipal, marcadas por el nexo agua–energía. En regiones con alta densidad de servidores se han modificado los planes reguladores para limitar el ruido de los sistemas de enfriamiento en seco y las emisiones de los generadores, y en estados con sequías prolongadas se exige el uso de agua reciclada o de sistemas de circuito cerrado con cero consumo directo de agua.

4.7.2 Marco institucional y normativo en Chile

Chile no dispone de una ley sectorial única para los data centers. Su desarrollo se rige por normas ambientales, urbanísticas, eléctricas, sanitarias y de seguridad que se activan según la configuración técnica y el emplazamiento del proyecto (MinCiencia, 2025; Servicio de Evaluación Ambiental, 2026).

La compatibilidad territorial depende de la zonificación, de las condiciones de edificación y del tratamiento de las obras auxiliares. La Circular DDU 323 reconoce los edificios destinados a datos como infraestructura energética vinculada con telecomunicaciones, sin eximirlos del instrumento de planificación aplicable al predio.

Los data centers no constituyen una tipología autónoma de ingreso al SEIA. La obligación se determina por las partes, obras, actividades y efectos que configuran las causales del artículo 10 de la Ley N.º 19.300 y del artículo 3 del Reglamento. El criterio publicado por el SEA en 2026 ordena la descripción de la infraestructura eléctrica, el respaldo, los combustibles, el agua, el ruido, los residuos y las contingencias, sin crear una causal de ingreso adicional.

La ruta regulatoria se completa con la compatibilidad de uso de suelo, la conexión eléctrica, la seguridad de combustibles, las autorizaciones hídricas y sanitarias, y el control de emisiones, ruido y residuos. El Capítulo 5 aplica este marco al proyecto y desarrolla la comparación territorial entre macrozonas.

Tabla 4.3. Materias regulatorias y capítulo de aplicación.

Materia	Condición general	Desarrollo aplicado
Ingreso al SEIA	Depende de partes, obras, actividades y efectos; no existe tipología autónoma de data center.	Capítulo 5.2.1
Uso de suelo	Compatibilidad territorial, edificación y tratamiento de obras auxiliares.	Capítulo 5.2.2
Conexión eléctrica	Capacidad, obras, servidumbres e interconexión.	Capítulo 5.2.3
Respaldo y combustibles	Seguridad, estanques, emisiones, ruido y pruebas.	Capítulo 5.2.4
Agua y refrigeración	Fuente, habilitación, tratamiento, purgas y descargas.	Capítulo 5.2.5
Emisiones, residuos y contingencias	Fuentes, receptores, gestores y planes de respuesta.	Capítulo 5.2.6

Fuente: elaboración propia con base en la Ley N.º 19.300, el D.S. N.º 40/2012 y el Servicio de Evaluación Ambiental (2026).

4.7.3 Plan Nacional de Data Centers (PDATA 2024–2030)

El Plan Nacional de Data Centers 2024–2030 constituye el principal instrumento estratégico de la industria en Chile (MinCiencia, 2024). Su objetivo general es posicionar al país como hub digital regional, articulando la expansión de la infraestructura con las políticas de ciencia, tecnología, conectividad y transición energética.

La capacidad instalada de centros de datos en Chile pasó de menos de 35 MW en 2013 a aproximadamente 198 MW en 2023 (MinCiencia, 2024). El Plan reconoce que el crecimiento proyectado incrementará la demanda eléctrica estructural y exigirá una gestión más rigurosa del uso de agua y de la localización de proyectos en áreas urbanas densas o con estrés hídrico.

El Plan incorpora indicadores como el PUE y el WUE —con un valor de PUE mundial en torno a 1,55 y un WUE de 1,8 L/kWh en enfriamiento evaporativo continuo, que puede implicar consumos diarios del orden de 1 a 3 millones de litros— y propone el desarrollo de una herramienta geoespacial que integre disponibilidad de energía, infraestructura eléctrica, conectividad y variables socioambientales para orientar el emplazamiento de nuevas instalaciones (MinCiencia, 2024).

4.8 Participación en el mercado eléctrico chileno

4.8.1 Flexibilidad de la demanda y rol de los centros de datos

La transición energética chilena ha incrementado la penetración de energías renovables variables —solar fotovoltaica y eólica— en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), lo que hace crítica la necesidad de flexibilidad para equilibrar la oferta y la demanda en tiempo real. La visión del Coordinador Eléctrico Nacional sobre la evolución del mercado hacia 2035 plantea que el consumidor deja de ser un receptor pasivo para convertirse en un participante activo y proveedor de flexibilidad, e identifica a los centros de datos como una demanda inteligente y gestionable en tiempo real (Coordinador Eléctrico Nacional, 2026).

La capacidad de un centro de datos para aportar flexibilidad se fundamenta en la modulación de tres grupos de activos (Takci et al., 2025). El primero es la infraestructura de potencia: los sistemas de alimentación ininterrumpida basados en baterías y los generadores de respaldo, cuya electrónica de potencia permite gestionar carga en fracciones de segundo. El segundo es la infraestructura de TI: mediante técnicas como el escalado dinámico de voltaje y frecuencia (DVFS), es posible ajustar el consumo de los procesadores sin interrumpir el servicio. El tercero son los sistemas de refrigeración: su inercia térmica permite pre-enfriar las salas cuando la energía es abundante y reducir la marcha de los *chillers* en las horas de mayor precio, manteniendo las temperaturas dentro de los rangos admisibles.

La coordinación de estos activos habilita distintas formas de flexibilidad (Takci et al., 2025). La flexibilidad temporal consiste en desplazar tareas computacionales no críticas —como el entrenamiento de modelos— desde los períodos de alta demanda hacia las horas de valle. La flexibilidad de potencia corresponde a la capacidad de alterar la curva de demanda neta del recinto para recortar picos o nivelar la carga en respuesta a las señales del mercado. La

flexibilidad espacial consiste en migrar cargas de trabajo entre instalaciones ubicadas en distintos nodos eléctricos; esta última es aplicable principalmente a operadores con múltiples recintos interconectados, como los hyperscalers, y no a una instalación única.

4.8.2 Caracterización de la flexibilidad

La comunicación de estas capacidades al sistema eléctrico requiere un lenguaje común. Los operadores de centros de datos suelen describir sus recursos en términos de tecnologías, mientras que el operador del sistema requiere conocer prestaciones. El programa DCFlex del Electric Power Research Institute propone una caracterización tecnológicamente neutra, basada en el comportamiento observable de la carga (EPRI, 2026).

Dentro de este programa, el marco Flex MOSAIC caracteriza cada recurso de flexibilidad mediante seis atributos, resumidos en la Tabla 4.4 (EPRI, 2026).

Tabla 4.4. Atributos de caracterización de la flexibilidad según el marco Flex MOSAIC.

Atributo	Descripción
Tiempo de aviso	Antelación con que debe anunciarse la activación del recurso.
Duración	Tiempo durante el cual el recurso sostiene el ajuste.
Frecuencia de uso	Número de activaciones admisibles por período.
Profundidad del ajuste	Magnitud de la reducción o aumento de carga.
Comportamiento de rampa	Velocidad con que el recurso alcanza el ajuste.
Disponibilidad	Fracción del tiempo en que el recurso puede responder.

Fuente: elaboración propia a partir de EPRI (2026).

Estos atributos permiten definir clases de flexibilidad comparables y comunicar con precisión la prestación que una instalación puede entregar, con independencia de la tecnología empleada. El esquema resulta especialmente útil para caracterizar la flexibilidad de una instalación individual, ya que permite describir su prestación sin recurrir a la migración entre recintos, opción reservada a operadores con múltiples emplazamientos.

La investigación sobre respuesta de la demanda en centros de datos ha abordado tanto las oportunidades como sus restricciones. Ghatikar et al. (2010) identificaron oportunidades asociadas al control de temperatura, la consolidación de servidores y la automatización,

advirtiendo la necesidad de evaluar sus efectos sobre el desempeño y la vida útil de los equipos. Wierman et al. (2014) situaron la respuesta de la demanda en la intersección entre la operación de los centros de datos y las redes inteligentes, señalando que su desarrollo exige coordinar objetivos técnicos y económicos. Liu et al. (2013) mostraron que la programación de las cargas de trabajo puede reducir los picos de demanda, aunque el resultado depende de la estructura tarifaria, la predictibilidad y las restricciones del servicio.

4.8.3 Recursos de flexibilidad del centro de datos

La flexibilidad de un centro de datos se construye mediante la coordinación de recursos que pertenecen a dominios técnicos distintos: el sistema eléctrico interno aporta almacenamiento y electrónica de potencia; la plataforma digital administra las cargas informáticas; y la infraestructura térmica regula la refrigeración. Ninguno de estos dominios opera de forma aislada, ya que una acción en uno modifica el comportamiento de los demás. Su integración se realiza a través de los sistemas de gestión de energía (EMS), de infraestructura (DCIM) y de edificio (BMS), que permiten imponer límites de continuidad y evitar que una respuesta comercial utilice recursos reservados para contingencias.

El almacenamiento en baterías (BESS) dedicado ofrece la forma más directa de separar flexibilidad y continuidad: al contar con convertidor, energía y control propios, entrega respuesta sin intervenir la carga de TI, y su capacidad queda definida por la potencia, la energía utilizable y el estado de carga. Los sistemas UPS, en cambio, tienen como función primaria sostener la carga crítica: aunque su potencia nominal puede ser elevada, la capacidad ofertable es solo la fracción que permanece tras asegurar la autonomía, la redundancia y las contingencias (Microsoft, 2022).

La gestión de las cargas informáticas es el recurso más distintivo del centro de datos. Parte del consumo corresponde a tareas cuya ejecución puede programarse, por lo que las aplicaciones suelen clasificarse en críticas en tiempo real, tolerantes a retrasos breves y diferibles; esta clasificación se realiza por tarea (*workload*) y no por servidor. Las acciones posibles incluyen la reducción de frecuencia y potencia de los procesadores, la consolidación de máquinas virtuales, el pausado de tareas y la reprogramación o migración de cargas. La expansión de la inteligencia artificial matiza este análisis: los entrenamientos extensos pueden

ofrecer flexibilidad temporal cuando admiten *checkpointing* y reanudación, mientras que la inferencia en línea resulta menos desplazable por su latencia.

La gestión térmica aporta flexibilidad a partir de la inercia térmica del recinto. Durante períodos cortos puede ajustarse la potencia de *chillers*, bombas o ventiladores sin que la temperatura supere sus límites, y el pre-enfriamiento permite reducir anticipadamente la temperatura o cargar almacenamiento térmico antes de un período crítico. Esta respuesta desplaza el consumo hacia otro horario en lugar de eliminarlo, por lo que la recuperación térmica debe incorporarse en el análisis. Además, el clima del emplazamiento influye en el valor del recurso: en zonas frías el *free cooling* amplía el margen de modulación, mientras que en zonas cálidas la operación cercana a la capacidad máxima lo reduce.

La disponibilidad efectiva de estos recursos depende del tipo de operador. Un *hyperscaler* con múltiples regiones posee mayor capacidad para desplazar cargas, mientras que un operador de *colocation* aloja equipos de terceros y puede carecer de control sobre las cargas de trabajo; en ese caso, la flexibilidad proviene principalmente de la infraestructura compartida, de los acuerdos contractuales con los clientes o del almacenamiento dedicado.

Tabla 4.5. Recursos de flexibilidad de un centro de datos.

Recurso	Respuesta típica	Duración	Ventaja	Restricción dominante
BESS dedicado	Milisegundos a segundos	Minutos a horas	Respuesta precisa y separada de la carga IT	Energía, SOC, CAPEX y degradación
UPS segregado	Milisegundos	Segundos a minutos	Activo existente y alta velocidad	Autonomía y prioridad de continuidad
Workloads diferibles	Segundos a horas	Minutos a horas	No requiere nuevo hardware eléctrico	SLA, latencia y control de aplicaciones
Refrigeración	Minutos	Minutos a horas	Aprovecha inercia térmica y auxiliares	Temperatura, clima y rebote
Migración espacial	Minutos a horas	Horas	Redistribuye carga entre zonas	Conectividad, datos y capacidad alternativa

Fuente: elaboración propia con base en EPRI DCFlex, Microsoft (2022) y Google (2023).

La factibilidad técnica de estos recursos cuenta con respaldo empírico internacional: operadores como Microsoft han certificado y probado baterías de UPS para prestar servicios de red sin perder su función de respaldo, y otros han desarrollado esquemas basados en software para desplazar cargas no urgentes en respuesta a señales del sistema (Microsoft, 2022; Google, 2023). Estas experiencias muestran que la flexibilidad debe diseñarse explícitamente y que la continuidad se protege mediante segregación y jerarquías de prioridad; su transferencia a Chile requiere cautela, pues los mercados, las señales y las reglas de interconexión difieren.

Tabla 4.6. Respaldo empírico de los recursos de flexibilidad.

Recurso	Evidencia disponible	Aplicabilidad o limitación en el SEN
UPS y baterías	Certificación y prueba de baterías de UPS para servicios de red (Microsoft, 2022)	Uso dual con prioridad de continuidad; reglas de mercado distintas al SEN
Workloads diferibles	Desplazamiento de cargas no urgentes por software (Google, 2023)	Aplica sobre todo a operadores multirregión; en colocation depende del contrato
Coordinación y planificación	Marcos y demostraciones del programa DCFlex (EPRI, 2026)	Útil para caracterizar recursos; no constituye norma obligatoria

Fuente: elaboración propia con base en Microsoft (2022), Google (2023) y EPRI (2026).

4.8.4 Servicios complementarios en el Sistema Eléctrico Nacional

En el Sistema Eléctrico Nacional, la demanda puede participar en servicios complementarios cuando dispone de una reducción o aumento de consumo medible, controlable y separado de la carga crítica. El marco se sustenta en el artículo 72°-7 de la Ley General de Servicios Eléctricos, el D.S. N.º 113/2017, la Norma Técnica de Servicios Complementarios y las definiciones anuales del Coordinador Eléctrico Nacional.

La compatibilidad se determina por el tiempo de activación, la duración, la disponibilidad y el seguimiento de consignas. La Tabla 4.7 resume los productos relevantes para una carga gestionable; la cuantificación específica del caso de estudio se desarrolla en el Capítulo 7.

Tabla 4.7. Compatibilidad conceptual entre recursos del data center y servicios complementarios.

Producto	Prestación	Recursos potenciales	Restricción dominante
CPF	Respuesta primaria ante desviaciones de frecuencia.	BESS o electrónica de potencia habilitada.	Velocidad, reserva y certificación.
CSF	Seguimiento automático de consignas durante minutos.	UPS segregado, BESS y control centralizado.	Energía, telemetría y bloque comercial.
CTF	Reducción o aumento programable durante una ventana mayor.	Workloads, UPS, BESS y gestión térmica con TES.	Duración, recuperación y contrato.
Cargas interrumpibles	Reducción de demanda bajo instrucción.	Workloads diferibles y almacenamiento de mayor duración.	Activación y entrega sostenida.

Fuente: elaboración propia con base en el D.S. N.º 113/2017 y el Informe de Servicios Complementarios 2026.

La participación efectiva de un centro de datos en estos servicios está sujeta a varias condiciones: una técnica, que exige una capacidad neta separable de la carga crítica; una contractual, que requiere que los acuerdos de nivel de servicio permitan la acción; una operativa, que demanda respuestas repetibles y medibles; una económica, que exige que el valor esperado compense los costos y riesgos; y una institucional, que requiere reglas y productos que admitan el recurso. La jerarquía de operación es explícita: se protege primero la seguridad de personas y equipos, luego la continuidad digital, después las reservas internas y, solo al final, una orden comercial.

La potencia ofertable no coincide con la suma de las capacidades nominales, pues un mismo recurso puede ser apto para más de un servicio sin poder comprometerlos simultáneamente, y distintos recursos pueden depender de una misma condición. Por ello, la literatura recomienda declarar la disponibilidad de forma conservadora, iniciando con un bloque acotado y ampliando la oferta a medida que la instalación demuestre márgenes suficientes.

5. ANÁLISIS DEL MARCO REGULATORIO, AMBIENTAL Y TERRITORIAL APLICABLE A DATA CENTERS EN CHILE

5.1 Alcance del análisis regulatorio y ambiental

El desarrollo de un data center en Chile no está sujeto a una autorización única que concentre la totalidad de las exigencias ambientales, territoriales, sanitarias, eléctricas y de seguridad. La ruta de permisos depende de la configuración técnica del proyecto, de sus obras asociadas y de las condiciones del emplazamiento. Por ello, instalaciones de potencia o superficie similares pueden enfrentar exigencias distintas cuando cambian la tecnología de refrigeración, la fuente de agua, el sistema de respaldo, el almacenamiento de combustibles o la solución de conexión eléctrica.

El análisis debe abarcar el proyecto completo y no solo el edificio que contiene los equipos informáticos. Las subestaciones, líneas de conexión, grupos generadores, estanques, baterías, equipos térmicos, caminos, faenas temporales y sistemas de tratamiento pueden activar permisos propios o modificar la evaluación ambiental. Este enfoque integral coincide con el criterio publicado por el Servicio de Evaluación Ambiental para proyectos de data centers, que ordena la descripción de sus partes, obras, factores generadores de impacto y contingencias (Servicio de Evaluación Ambiental, 2026).

Las macrozonas Norte, Centro y Sur se utilizan como una estructura de comparación territorial, no como categorías determinantes de viabilidad. Una tendencia regional puede orientar la búsqueda de antecedentes, pero no permite concluir por sí sola que un proyecto sea favorable, desfavorable o socialmente conflictivo. La conclusión aplicable depende del instrumento territorial, de la cuenca, de los receptores y de las características del predio.

En coherencia con esta delimitación, el capítulo no compara PUE, costos operacionales, rentabilidad ni capacidad flexible. Esas variables dependen de la arquitectura del caso de estudio y se desarrollan posteriormente. El clima o la disponibilidad de recursos se consideran aquí solo cuando modifican una exigencia ambiental, un permiso o la sensibilidad territorial.

El propósito de este capítulo es sistematizar el marco nacional, identificar los permisos que pueden activarse según la configuración del proyecto y establecer las materias que requieren

una verificación más profunda en cada macrozona. El resultado corresponde a una evaluación de prefactibilidad y no reemplaza el análisis regulatorio de un proyecto y predio determinados.

5.2 Marco regulatorio común aplicable a los data centers

El marco común combina normas ambientales, urbanísticas, eléctricas, sanitarias y de seguridad. Su aplicación no sigue una secuencia completamente lineal: la definición técnica condiciona los permisos, mientras que los resultados de factibilidad territorial, hídrica y eléctrica pueden obligar a modificar la arquitectura. Por esta razón, la permisología debe integrarse desde la etapa de selección del sitio.

Las materias centrales son el eventual ingreso al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, la compatibilidad de uso de suelo, la conexión eléctrica, el respaldo energético, el agua, las emisiones, el ruido, los residuos y las contingencias. Las subsecciones siguientes exponen la regla aplicable y la condición que debe verificarse, evitando reproducir procedimientos administrativos completos.

5.2.1 Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

La Ley N.º 19.300 exige que los proyectos comprendidos en las tipologías de su artículo 10 se sometan al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental antes de su ejecución. El artículo 3 del Reglamento del SEIA desarrolla dichas tipologías y sus umbrales (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 1994, 2013). Los data centers no constituyen una tipología autónoma; el ingreso se determina por las obras, actividades y efectos que forman parte del proyecto.

Entre los elementos que pueden resultar relevantes se encuentran las líneas y subestaciones, determinadas obras hidráulicas, la generación de respaldo, el almacenamiento de sustancias inflamables y la localización próxima a componentes ambientales sensibles. La sola presencia de uno de estos sistemas no demuestra ingreso obligatorio: deben verificarse sus características, capacidad, ubicación y relación con los umbrales reglamentarios.

El documento Criterio de evaluación en el SEIA: Introducción a proyectos de data center, publicado por el Servicio de Evaluación Ambiental en 2026, estandariza la descripción de estas iniciativas y de sus principales impactos. El criterio incorpora infraestructura eléctrica, sistemas de enfriamiento, respaldo, combustible, agua, ruido, residuos y emergencias, pero no crea una

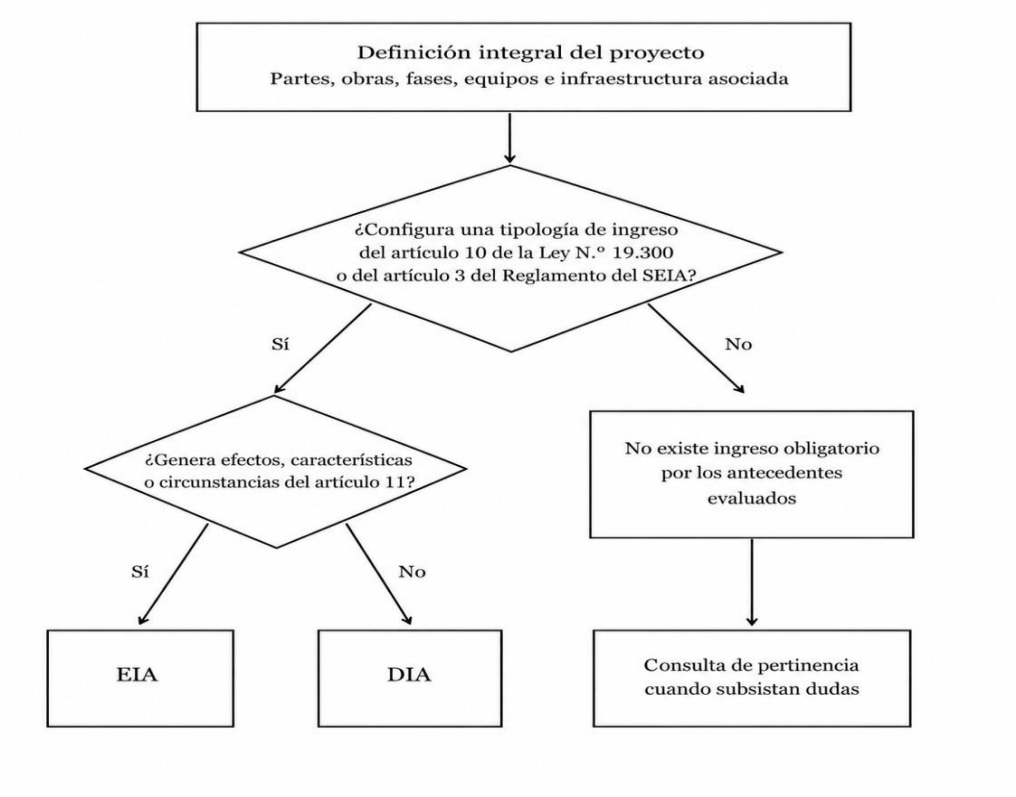
causal de ingreso distinta de las previstas por la ley y el reglamento (Servicio de Evaluación Ambiental, 2026).

Cuando se configura una tipología de ingreso, la vía corresponde a una Declaración de Impacto Ambiental, salvo que se generen los efectos, características o circunstancias del artículo 11 de la Ley N.º 19.300, caso en el cual procede un Estudio de Impacto Ambiental.

La decisión depende de la interacción con el entorno receptor y no únicamente de la potencia eléctrica o de la superficie construida.

La consulta de pertinencia puede utilizarse cuando subsisten dudas sobre el ingreso obligatorio. Su pronunciamiento se basa en los antecedentes presentados y no sustituye una Resolución de Calificación Ambiental ni limita las facultades posteriores de fiscalización. Por ello, la utilidad del mecanismo depende de que la configuración sometida a consulta represente el proyecto que efectivamente se pretende ejecutar.

Figura 5.1. Ruta general para determinar el ingreso de un proyecto de data center al SEIA



Fuente: elaboración propia a partir de la Ley N.º 19.300, el D.S. N.º 40/2012 y el Servicio de Evaluación Ambiental (2026).

5.2.2 Planificación territorial y compatibilidad de uso de suelo

La viabilidad territorial depende de la Ley General de Urbanismo y Construcciones, de su Ordenanza y de los instrumentos de planificación aplicables al predio. La disponibilidad física de terreno no implica que el uso, la superficie edificada y las instalaciones auxiliares sean admisibles.

La Circular DDU 323 interpretó los edificios destinados a recepción, almacenamiento y transmisión de datos como infraestructura energética vinculada con telecomunicaciones (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2016). Esta clasificación orienta el uso de suelo, pero no habilita el emplazamiento indiscriminado de edificaciones. Dentro del límite urbano, el edificio principal y sus instalaciones deben ajustarse a la zonificación y a las condiciones de edificación del instrumento territorial vigente.

El Certificado de Informaciones Previas constituye el antecedente inicial para identificar usos permitidos, afectaciones, líneas oficiales, normas de edificación y áreas de riesgo. Sin embargo, su revisión debe complementarse con el análisis de subestaciones, estanques, plantas de tratamiento, líneas, accesos y demás obras auxiliares, debido a que pueden recibir un tratamiento territorial o sectorial distinto.

En áreas rurales, el artículo 55 de la Ley General de Urbanismo y Construcciones puede exigir informes y autorizaciones adicionales. Una localización rural tampoco es automáticamente más simple: puede requerir soluciones particulares de acceso, servicios, urbanización y protección frente a riesgos naturales.

La conclusión territorial debe fundarse en el predio y en los instrumentos vigentes. Las afirmaciones generales sobre mayor disponibilidad de suelo en una macrozona solo sirven como antecedente exploratorio y no sustituyen la verificación municipal y sectorial.

5.2.3 Conexión eléctrica y obras energéticas asociadas

La conexión eléctrica es una condición habilitante, pero la proximidad a una subestación no garantiza capacidad, redundancia ni plazo de energización. La solución puede involucrar redes de distribución, transmisión zonal o instalaciones dedicadas, cada una con procesos técnicos y administrativos diferentes.

La factibilidad debe definir potencia máxima, perfil de carga, crecimiento, nivel de tensión y fecha requerida de suministro. Sobre esa base se evalúan capacidad de barras y transformadores, flujos de potencia, cortocircuito, protecciones, calidad de suministro y obras adicionales. Una ampliación de subestación, una nueva línea o un refuerzo de red puede transformarse en la ruta crítica del proyecto.

Cuando se interviene el sistema de transmisión, resultan aplicables las reglas de acceso abierto y los procedimientos del Coordinador Eléctrico Nacional. La autorización de conexión no equivale a suministro inmediato: posteriormente deben desarrollarse ingeniería, permisos, servidumbres, construcción, pruebas e interconexión (Ministerio de Energía, 2019; Coordinador Eléctrico Nacional, 2024).

Las instalaciones interiores deben cumplir el D.S. N.º 8/2019 y los pliegos técnicos de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles. Los sistemas UPS, baterías y generadores incorporan exigencias de transferencia, selectividad, puesta a tierra, prevención de energización no intencional y seguridad operacional (Superintendencia de Electricidad y Combustibles, 2020).

Las obras externas también pueden activar servidumbres, cruces, permisos territoriales y evaluación ambiental. En consecuencia, la comparación entre macrozonas debe basarse en la capacidad del punto de conexión y en las obras requeridas, no en la disponibilidad regional de generación.

5.2.4 Generación de respaldo, almacenamiento de combustibles y sustancias peligrosas

La generación de respaldo puede utilizar diésel, gas u otras soluciones, y su regulación depende del combustible, de la potencia, del almacenamiento y del régimen de operación. Los grupos electrógenos deben analizarse junto con los estanques, las tuberías, las áreas de carga, los sistemas contra incendios y los procedimientos de prueba.

El almacenamiento de combustibles líquidos se rige por el D.S. N.º 160/2008 y sus modificaciones, bajo fiscalización de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles. El diseño debe considerar distancias, contención, ventilación, protección contra incendios,

operación, inspección y mantenimiento. Los combustibles usados como recurso energético no se regulan de la misma forma que las demás sustancias peligrosas del D.S. N.º 43/2015.

Para efectos de ingreso al SEIA, la modificación reglamentaria de 2026 estableció un umbral de 1.000 toneladas para la capacidad de almacenamiento de sustancias inflamables en el literal ñ.3 del artículo 3 del Reglamento. El valor debe aplicarse a la capacidad de almacenamiento y no confundirse con el umbral diario previsto para producción, disposición o reutilización (Ministerio del Medio Ambiente, 2026).

La operación de los generadores puede estar sujeta a declaración de emisiones, reporte de horas, normas territoriales y condiciones de una eventual Resolución de Calificación Ambiental. Las pruebas periódicas forman parte de la operación previsible y deben incorporarse a la evaluación acústica y atmosférica.

El análisis regulatorio debe basarse en la autonomía requerida, el consumo esperado, la frecuencia de prueba y el escenario de emergencia. La sola cantidad de generadores no permite establecer una exigencia uniforme ni anticipar su impacto.

5.2.5 Abastecimiento de agua, refrigeración y permisos sanitarios

Las exigencias hídricas dependen de la tecnología de refrigeración y de la fuente de abastecimiento. Un sistema evaporativo, uno adiabático y uno de rechazo seco presentan consumos, purgas, tratamientos y riesgos distintos. Por ello, el análisis no puede atribuir a todos los data centers un mismo nivel de uso de agua.

El suministro puede provenir de una empresa sanitaria, de un proveedor industrial, de derechos de aprovechamiento, de agua reutilizada o de desalación. Cada alternativa requiere acreditar disponibilidad, capacidad, calidad y continuidad. Una fuente técnicamente accesible puede no estar jurídicamente habilitada o puede carecer de capacidad para la demanda del proyecto.

Las captaciones propias deben revisarse conforme al Código de Aguas y a las condiciones de la cuenca o acuífero. En sectores con prohibiciones o áreas de restricción, la existencia de infraestructura cercana no asegura nuevas extracciones. Cuando se utilicen aguas grises, efluentes tratados o agua de mar, se agregan exigencias sanitarias, ambientales y, en su caso, marítimas.

Las purgas o descargas deben caracterizarse y someterse a la norma correspondiente según su destino: alcantarillado, aguas superficiales, aguas marinas o infiltración. El balance hídrico debe incluir operación normal, máximos estacionales, tratamiento, pérdidas, purgas y contingencias.

La comparación territorial debe distinguir disponibilidad física, disponibilidad jurídica y capacidad de infraestructura. Las precipitaciones medias o la condición general de una macrozona no sustituyen el análisis de la fuente y del sistema de descarga.

5.2.6 Emisiones atmosféricas, ruido, residuos y gestión de contingencias

Las principales fuentes atmosféricas corresponden a los grupos de respaldo y, durante la construcción, al tránsito y al movimiento de tierra. La evaluación requiere combustible, potencia, horas de operación, factores de emisión y localización de receptores. La existencia de un plan de prevención o descontaminación debe verificarse según el polígono regulado y no extenderse automáticamente a una región completa.

El ruido puede provenir de generadores, chillers, dry coolers, bombas, transformadores y pruebas de respaldo. La modelación debe considerar simultaneidad, horario, potencia sonora y distancia a receptores. La regulación vigente y su transición normativa deben aplicarse según la fecha y condiciones del proyecto.

Los residuos incluyen aceites, filtros, absorbentes, baterías, refrigerantes, envases contaminados, residuos electrónicos y desechos de construcción. Su manejo depende de su clasificación y exige segregación, almacenamiento, transporte y disposición mediante gestores autorizados cuando corresponda.

La gestión de contingencias debe abarcar incendios, derrames, fallas de refrigeración, pérdida de suministro, incidentes con baterías y eventos naturales. Las medidas deben vincularse con escenarios concretos, responsables, comunicaciones, equipos y recuperación operacional. Un listado genérico de emergencias no reemplaza la evaluación de las sustancias y equipos presentes.

La sensibilidad territorial depende de receptores, calidad ambiental de base y amenazas locales. Por tanto, no corresponde atribuir mayor o menor impacto acústico, atmosférico o social a una macrozona sin información del emplazamiento.

Tabla 5.1. Síntesis del marco regulatorio y antecedentes mínimos de verificación

Materia	Condición regulatoria	Autoridad principal	Antecedente mínimo
Ingreso al SEIA	Tipologías u efectos de la Ley N.º 19.300 y del Reglamento	SEA	Descripción integral, umbrales, localización y estrategia de ingreso.
Uso de suelo	Compatibilidad urbanística o rural	DOM / SEREMI MINVU	CIP, IPT vigente, áreas de riesgo y tratamiento de obras auxiliares.
Conexión eléctrica	Capacidad, obras, acceso abierto e interconexión	Distribuidora / transmisora / Coordinador / SEC	Potencia, estudios, servidumbres, permisos y plazo de energización.
Respaldo y combustibles	Seguridad, almacenamiento, emisiones y ruido	SEC / SEREMI de Salud / SEA / SMA	Autonomía, estanques, horas de prueba y sistemas de control.
Agua y refrigeración	Fuente, derechos, tratamiento, purgas y descargas	DGA / autoridad sanitaria / SEA / prestador	Balance hídrico, capacidad, habilitación jurídica y destino de efluentes.
Ruido y emisiones	Fuentes fijas, construcción y receptores	SMA / SEREMI de Salud / SEA	Inventario, modelaciones, normativa territorial y medidas.
Residuos y sustancias	Clasificación, almacenamiento y disposición	SEREMI de Salud / SMA	Tipos, volúmenes, gestores, hojas de seguridad y contingencias.
Riesgos naturales y emergencias	Exposición y continuidad operacional	Municipalidad / SENAPRED / SEA	Cartografía oficial, estudios específicos, accesos y planes de respuesta.

Fuente: elaboración propia a partir de la normativa e instrumentos analizados en el capítulo.

5.3 Permisos y exigencias según la configuración del proyecto

La ruta regulatoria se activa por decisiones de diseño. La potencia del proyecto es relevante, pero no explica por sí sola la permisología: la fuente de agua, el tipo de refrigeración, la autonomía de respaldo, el emplazamiento y las obras de conexión pueden tener mayor incidencia.

Esta relación permite identificar tempranamente alternativas que reducen o trasladan impactos. El rechazo seco disminuye el consumo directo de agua, pero puede aumentar ruido y demanda eléctrica; el suministro mediante red evita una captación propia, pero exige

factibilidad y capacidad del prestador; una línea dedicada mejora la solución eléctrica, aunque incorpora servidumbres y obras territoriales.

La comparación debe considerar el ciclo completo de cada decisión y no interpretar la reducción de un impacto como eliminación del riesgo ambiental. En prefactibilidad, la finalidad es reconocer qué antecedentes deben obtenerse antes de fijar la arquitectura.

Tabla 5.2. Configuraciones de proyecto y principales implicancias regulatorias

Configuración	Materias activadas	Verificación de prefactibilidad
Refrigeración evaporativa o adiabática	Consumo, tratamiento y purgas	Fuente de agua, caudal máximo, descarga, control microbiológico y capacidad sanitaria.
Refrigeración seca o líquida en circuito cerrado	Ruido, electricidad y manejo de fluidos	Potencia sonora, demanda auxiliar, refrigerantes, reposición y residuos.
Generación diésel con gran autonomía	Combustible, emisiones, ruido e incendio	Capacidad de estanques, horas de prueba, contención, ventilación y emergencia.
Suministro de gas	Instalaciones de gas y seguridad	Red o almacenamiento, presión, ventilación, detección, puesta en servicio y emergencias.
Baterías de alta capacidad	Incendio, gases y residuos	Química, energía, compartimentación, detección, extinción y gestión al fin de vida.
Captación propia de agua	Derechos, obras y efectos sobre la fuente	Título, caudal, estado de cuenca, medición y permisos de obras.
Subestación o línea dedicada	Servidumbres, ruido e intervención territorial	Trazado, capacidad, predios, cruces, permisos y proceso de conexión.
Emplazamiento urbano	Uso de suelo, tránsito y receptores	CIP, vialidad, ruido, emisiones, distancias y participación cuando corresponda.
Emplazamiento rural	Artículo 55, servicios y accesos	Informes, urbanización, abastecimiento, evacuación y compatibilidad territorial.

Fuente: elaboración propia.

5.4 Diferenciación ambiental y territorial por macrozona

La escala macrozonal permite ordenar tendencias, pero no reemplaza la información regional, comunal y predial. Las conclusiones se formulan como prioridades de verificación y no como ventajas comparativas definitivas.

El mismo proyecto puede enfrentar condiciones distintas dentro de una macrozona debido a la disponibilidad de redes, la zonificación, la cuenca, los receptores y las amenazas naturales. Por esta razón, se evita extrapolar el comportamiento del PUE, la conflictividad social o la facilidad de permisos desde promedios territoriales.

Los riesgos sociales requieren evidencia de efectos concretos sobre grupos humanos, sistemas de vida, recursos o actividades. La presencia regional de población o pueblos indígenas no implica conflicto, afectación directa ni consulta automática. De igual modo, la existencia de infraestructura renovable o de mayor precipitación no prueba disponibilidad eléctrica o hídrica para un predio.

5.4.1 Macrozona Norte

La principal prioridad de verificación corresponde al abastecimiento de agua. La aridez y la existencia de sectores con restricciones o prohibiciones para nuevas extracciones obligan a diferenciar entre suministro sanitario, contratos industriales, derechos propios, reúso y desalación. La condición regional no implica indisponibilidad absoluta, pero eleva la importancia de demostrar una fuente habilitada y un balance coherente.

El territorio combina polos industriales, mineros, urbanos y costeros con áreas de alto valor ecológico y patrimonial. Vegas, salares, ecosistemas desérticos y sitios arqueológicos pueden ser relevantes en emplazamientos específicos. Su sola presencia en la macrozona no acredita afectación; la relación debe determinarse mediante cartografía y línea base del área de influencia.

En materia atmosférica, algunos sectores cuentan con planes o antecedentes de saturación asociados a actividades industriales. La exigencia aplicable a los grupos de respaldo depende del polígono, del combustible y de las horas de operación. La existencia de un polo industrial no permite anticipar aceptación ambiental ni capacidad de emisiones disponible.

La infraestructura eléctrica regional es extensa, pero las distancias, la configuración de subestaciones y las solicitudes concurrentes pueden requerir obras relevantes. La abundancia regional de generación renovable no equivale a capacidad firme en el punto de conexión.

Las amenazas varían entre sectores costeros e interiores e incluyen tsunami, aluviones, remoción en masa y sismicidad. La prefactibilidad debe incorporar continuidad de accesos y

servicios. La dimensión social e indígena se analiza solo cuando el área de influencia incluye usos de agua, tierras, actividades productivas o prácticas culturales potencialmente afectadas.

5.4.2 Macrozona Centro

La zona central concentra población, infraestructura digital y proyectos, pero esta concentración genera condiciones heterogéneas. La proximidad a servicios puede reducir distancias, aunque no asegura capacidad eléctrica, sanitaria ni vial. La disponibilidad debe acreditarse mediante factibilidades y estudios.

La compatibilidad territorial adquiere especial relevancia por la diversidad de usos urbanos, industriales y rurales. Un predio cercano a corredores de infraestructura puede presentar restricciones de edificación, afectaciones de utilidad pública, receptores sensibles o incompatibilidad de obras auxiliares. El Certificado de Informaciones Previas y el instrumento territorial son antecedentes esenciales.

En determinados sectores existen acuíferos restringidos y presión sobre redes sanitarias. Por ello, la existencia de cobertura no demuestra que el prestador disponga de capacidad para el caudal requerido. La estrategia hídrica debe considerar consumo, tratamiento, purgas y descargas.

La mayor densidad de receptores puede aumentar la relevancia del ruido, del tránsito y de las emisiones de respaldo, especialmente en comunas con instrumentos de calidad ambiental. Sin embargo, no permite afirmar mayor conflictividad social. Los riesgos sociales se fundan en impactos concretos y en la distribución de cargas y beneficios.

Las amenazas incluyen incendios de interfaz, inundaciones, remoción en masa, sismicidad y tsunami en sectores costeros. Su importancia depende de la exposición del predio y de la redundancia de accesos, energía y telecomunicaciones.

5.4.3 Macrozona Sur

Las mayores precipitaciones relativas no equivalen a disponibilidad jurídica de agua ni a capacidad de drenaje. Existen sectores con restricciones hidrogeológicas, redes de distinta capacidad y territorios donde humedales o cursos de agua requieren una evaluación específica.

La relación con humedales, ecosistemas acuáticos y áreas protegidas debe analizarse según la conectividad espacial e hidrológica del proyecto. La existencia regional de estos componentes

no significa afectación automática, pero exige una revisión temprana de inventarios, cauces, cotas y drenajes.

Las precipitaciones intensas, inundaciones, volcanismo, remoción en masa, incendios y tsunami pueden afectar emplazamientos determinados. El diseño debe considerar geotecnia, evacuación de aguas lluvias y continuidad de accesos y suministros.

Algunas ciudades y conurbaciones cuentan con planes de descontaminación atmosférica. Las obligaciones para los equipos de respaldo dependen de la localización dentro del polígono y de sus características operacionales; no corresponde extender esas restricciones a toda la macrozona.

La presencia de pueblos indígenas y usos culturales requiere identificar una eventual afectación directa dentro del área de influencia. No se presume consulta por la sola localización regional. La evaluación debe basarse en tierras, recursos, prácticas y grupos efectivamente vinculados con el territorio del proyecto.

5.5 Matriz comparativa de riesgos y permisos por macrozona

La matriz comparativa expresa prioridades de verificación, no niveles absolutos de riesgo. Una prioridad alta indica que la materia debe resolverse tempranamente, pero no implica inviabilidad. Del mismo modo, una condición regional aparentemente favorable no sustituye la evidencia comunal y predial.

La columna final establece la evidencia mínima para transformar una tendencia territorial en una conclusión aplicable. Este criterio limita afirmaciones sobre ventajas macrozonales, desempeño energético y riesgos sociales cuando la información disponible aún se encuentra a escala agregada.

Tabla 5.3. Matriz comparativa de materias regulatorias y ambientales por macrozona

Dimensión	Norte	Centro	Sur	Evidencia mínima
Agua	Fuente y restricciones hidrogeológicas	Capacidad sanitaria, derechos y descargas	Fuente, drenaje y relación con cuerpos de agua	Contrato o derecho, estado de cuenca, caudal y balance.

Dimensión	Norte	Centro	Sur	Evidencia mínima
Uso de suelo	Polos industriales, áreas rurales y costa	Alta diversidad urbana e industrial	Zonas urbanas, rurales y forestales	CIP, IPT vigente, áreas de riesgo y obras auxiliares.
Conexión eléctrica	Distancias y obras en corredores extensos	Capacidad local y solicitudes concurrentes	Capacidad, redundancia y refuerzos	Estudio de conexión, servidumbres, obras y plazo.
Emisiones y ruido	Polos industriales y receptores locales	Mayor densidad potencial de receptores	Planes locales en determinadas ciudades	Plan aplicable, inventario de fuentes y modelación.
Biodiversidad	Vegas, salares y ecosistemas desérticos	Humedales, áreas costeras y componentes urbanos	Humedales, cursos de agua y bosques	Cartografía, línea base y relación con el área de influencia.
Amenazas naturales	Tsunami, aluviones y remoción según sector	Incendios, inundación, remoción y tsunami	Inundación, volcanismo, incendios y tsunami	Visores oficiales, geotecnia, drenaje y accesos.
Dimensión social	Usos de agua y actividades productivas	Receptores, tránsito y diversidad de usos	Usos territoriales y actividades culturales	Caracterización de grupos humanos y efectos concretos.
Pueblos indígenas	Evaluación donde existan grupos o territorios vinculados	Evaluación solo si la localización y los efectos lo justifican	Evaluación según tierras, usos y grupos presentes	Área de influencia y análisis de afectación directa.

Fuente: elaboración propia a partir de la normativa y antecedentes institucionales analizados.

5.6 Implicancias para la prefactibilidad de proyectos de data centers

La prefactibilidad regulatoria debe desarrollarse en paralelo con la ingeniería y la selección territorial. Una revisión posterior a la adquisición del predio puede revelar incompatibilidades que obliguen a modificar la refrigeración, el respaldo, la conexión, la fuente de agua o la localización.

El análisis requiere una envolvente única del proyecto que incluya demanda eléctrica, obras externas, refrigeración, agua, respaldo, combustibles, baterías, accesos, construcción, residuos y efluentes. Sin esta definición, el resultado se limita a una lista genérica de permisos.

La decisión territorial debe integrar tres escalas: la macrozona prioriza materias, la escala comunal identifica instrumentos y amenazas, y la escala predial determina la compatibilidad y los componentes ambientales afectados. Las conclusiones deben mantener esa correspondencia entre escala de evidencia y alcance.

Finalmente, el cronograma de permisos debe integrarse con el proceso de conexión y con la ingeniería. Las dependencias entre estudios, autorizaciones y obras pueden determinar la fecha de entrada en operación. La debida diligencia propuesta en la Tabla 5.4 permite distinguir restricciones normativas, brechas de información y condiciones mitigables mediante diseño.

Tabla 5.4. Expediente mínimo de debida diligencia regulatoria y ambiental

Materia	Antecedente mínimo	Resultado esperado
Definición del proyecto	Fases, equipos, insumos, obras y capacidad de expansión	Envolvente común para permisos y evaluación ambiental.
SEIA	Contraste con Ley N.º 19.300, Reglamento y Criterio SEA 2026	Estratégia fundada de no ingreso, pertinencia, DIA o EIA.
Territorio	CIP, IPT, títulos y áreas de riesgo	Compatibilidad del edificio y de las obras auxiliares.
Electricidad	Alternativa, capacidad, obras, servidumbres y plazo	Ruta técnica y administrativa de energización.
Agua y efluentes	Fuente, volumen, habilitación y descargas	Balance hídrico y permisos asociados.
Respaldo y combustibles	Potencia, autonomía, estanques y emergencias	Cumplimiento SEC, sanitario, ambiental y de seguridad.
Emisiones, ruido y residuos	Inventario, receptores, volúmenes y escenarios	Modelaciones preliminares y medidas de control.
Biodiversidad y sociedad	Cartografía, terreno, grupos humanos y usos	Delimitación inicial del área de influencia y estudios.
Cronograma	Matriz de permisos, dependencias y responsables	Ruta crítica regulatoria integrada al proyecto.

Fuente: elaboración propia.

6. CASO DE ESTUDIO: DATA CENTER TIPO DE 30 MW

6.1 Definición y criterio de comparación del caso base

El caso de estudio se construye para comparar una misma instalación en las macrozonas Norte, Centro y Sur de Chile. La arquitectura, la carga informática y la superficie del proyecto se mantienen constantes; las diferencias se originan en las condiciones climáticas, eléctricas, hídricas, territoriales y económicas de cada emplazamiento. Este diseño permite atribuir las variaciones de desempeño a la localización y no a cambios simultáneos de escala o tecnología.

La instalación corresponde a un data center colocation de gran escala con 30 MW de potencia total del facility y 25 MW de carga TI. Se adopta un objetivo de diseño Tier III, asociado a mantenibilidad concurrente de los componentes y trayectorias críticas (Uptime Institute). La configuración mecánica combina refrigeración direct-to-chip (D2C) con refrigeración complementaria por aire y rechazo térmico seco. La densidad de 50 kW por rack se adopta como supuesto de prefactibilidad representativo de una solución híbrida de alta densidad.

La potencia se distribuye en 25 MW TI, 3,5 MW de refrigeración y 1,5 MW de servicios auxiliares. La generación de respaldo está compuesta por trece unidades diésel de 2,5 MW, mientras que los sistemas UPS mantienen la continuidad durante la transferencia entre fuentes. El caso no incorpora un BESS dedicado; la flexibilidad se analiza como una característica adicional de los activos del facility y no como el eje de la comparación territorial.

Tabla 6.1. Parámetros técnicos del caso base

Parámetro	Valor adoptado	Aplicación en la modelación
Modelo operacional	Colocation de gran escala	Caso común para las tres macrozonas.
Potencia total del facility	30 MW	Demanda máxima coincidente.
Carga TI	25 MW	Servidores, almacenamiento y comunicaciones.
Densidad por rack	50 kW/rack	Dimensionamiento de salas y refrigeración líquida.

Parámetro	Valor adoptado	Aplicación en la modelación
Refrigeración	3,5 MW	D2C híbrida, bombeo y rechazo térmico.
Servicios auxiliares	1,5 MW	Control, seguridad, iluminación y pérdidas.
Disponibilidad	Tier III	Mantenibilidad concurrente.
Generación de respaldo	13 × 2,5 MW	Configuración N+1 nominal.
BESS dedicado	No considerado	Escenario adicional fuera del caso base.

Fuente: elaboración propia a partir de Uptime Institute, ASHRAE y Vertiv.

La descomposición anterior entrega un PUE nominal de 1,20. La definición sigue la relación entre la energía total del facility y la energía de los equipos TI establecida en ISO/IEC 30134-2:2026 (ISO/IEC, 2026).

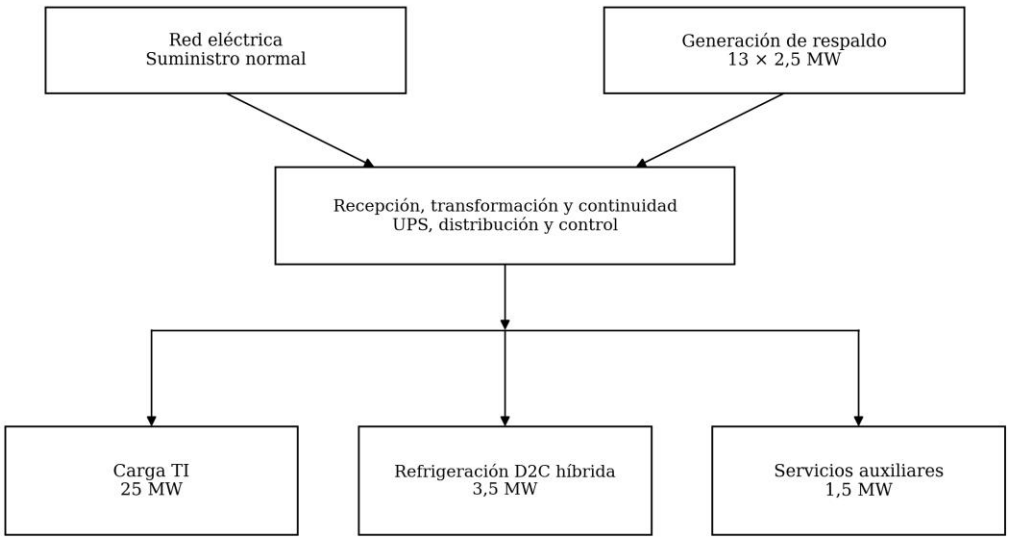
$$PUE = \frac{P_{facility}}{P_{IT}} = \frac{30}{25} = 1{,}20 \quad (8)$$

La carga TI representa el 83,3 % de la potencia total; refrigeración y auxiliares concentran el 16,7 % restante. Esta estructura se utiliza en todos los escenarios y constituye el punto de partida para calcular energía, costos, superficie y requerimientos de infraestructura.

6.2 Configuración funcional y balance energético nominal

La configuración funcional integra dos fuentes de suministro, la red eléctrica y la generación de respaldo, con una infraestructura común de transformación, continuidad y distribución. Desde esa barra se abastecen la carga TI, los sistemas de refrigeración y los servicios auxiliares. La Figura 6.1 resume la frontera energética utilizada en el modelo.

Figura 6.1. Configuración funcional del caso de estudio



Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.2. Balance de potencia y energía anual equivalente

Bloque	Potencia	Participación	Energía anual a plena carga
Carga TI	25,0 MW	83,3 %	219,00 GWh/año
Refrigeración	3,5 MW	11,7 %	30,66 GWh/año
Servicios auxiliares	1,5 MW	5,0 %	13,14 GWh/año
Carga no TI	5,0 MW	16,7 %	43,80 GWh/año
Total facility	30,0 MW	100,0 %	262,80 GWh/año

Fuente: elaboración propia, considerando 8.760 horas anuales.

El consumo anual equivalente se calcula a partir de la potencia de cada bloque y de las horas de operación. Para el caso base, el factor de carga es igual a 1,00.

$$E_i = P_i \cdot LF \cdot 8760 \quad (9)$$

La energía de soporte alcanza 43,80 GWh/año. Este valor no se interpreta como energía flexible; corresponde al consumo conjunto de sistemas que mantienen la disponibilidad, la seguridad y las condiciones térmicas de la carga TI. La cuantificación de la fracción efectivamente modulable se desarrolla de forma separada en el Capítulo 7.

6.3 Dimensionamiento físico del edificio y del emplazamiento

El dimensionamiento físico vincula la capacidad informática con la superficie utilizada posteriormente en la estimación del CAPEX y del costo de terreno. La densidad de 50 kW por rack determina 500 racks para los 25 MW TI. El diseño se organiza en cinco data halls de 100 racks y 5 MW TI cada uno, configuración modular que facilita la construcción por etapas y la separación de sistemas eléctricos y térmicos.

$$N_{racks} = \frac{P_{IT}}{P_{rack}} = \frac{25000}{50} = 500 racks \quad (10)$$

6.3.1 White space y edificio principal

El white space se calcula mediante un coeficiente de 3,5 m² por rack. Este factor incorpora el gabinete, los pasillos frío y caliente, la contención, las rutas de cableado y el espacio de operación. Los racks de referencia utilizan un ancho de 600 mm y una profundidad cercana a 1.200 mm, dimensiones adoptadas como supuesto de diseño para equipos de alta densidad.

$$A_{whitespace} = 500 \cdot 3{,}5 = 1750 m^2 \quad (11)$$

Cada data hall dispone de 350 m² de white space y una densidad media de 14,29 kW TI/m². La superficie cubierta total se obtiene al incorporar salas eléctricas, salas mecánicas, operación y circulación técnica.

Tabla 6.3. Dimensionamiento del edificio principal

Componente	Criterio de cálculo	Superficie
White space	500 racks × 3,5 m²/rack	1.750 m²
Salas eléctricas	30 % del white space	525 m²
Salas mecánicas internas	20 % del white space	350 m²
BMS, NOC, MMR, oficinas y apoyo	15 % del white space	265 m²
Pasillos, escaleras y ductos técnicos	10 % del white space	175 m²
Total edificio principal	Suma de componentes	3.065 m²

Fuente: elaboración propia.

La potencia TI por superficie construida alcanza 8,16 kW/m², mientras que la potencia total del facility equivale a 9,79 kW/m². Estos indicadores permiten trasladar el caso técnico a partidas de obra civil, shell, fit-out, instalaciones eléctricas y sistemas mecánicos.

Tabla 6.4. Modularización de los data halls

Módulo	Racks	Potencia TI	White space	Superficie cubierta asignada
Data hall 1	100	5 MW	350 m²	613 m²
Data hall 2	100	5 MW	350 m²	613 m²
Data hall 3	100	5 MW	350 m²	613 m²
Data hall 4	100	5 MW	350 m²	613 m²
Data hall 5	100	5 MW	350 m²	613 m²
Total	500	25 MW	1.750 m²	3.065 m²

Fuente: elaboración propia.

La modularización permite asociar cada incremento de 5 MW TI con una fracción definida de racks, white space y superficie técnica. Esta unidad facilita la estimación de costos por etapa y la evaluación de ampliaciones futuras.

6.3.2 Patios técnicos y superficie del predio

La infraestructura exterior se divide en patio mecánico, patio eléctrico, generación de respaldo, almacenamiento de combustible, circulación y seguridad. El patio mecánico considera el campo de rechazo térmico, bombas, galerías hidráulicas y accesos de mantenimiento. La subestación particular incorpora dos transformadores de 35 MVA, patio de 110 kV, distribución en 23 kV y servicios auxiliares. El área de respaldo agrupa generadores, paralelismo, estanques, pretiles y zona de abastecimiento.

Tabla 6.5. Áreas exteriores de la fase inicial

Componente	Contenido principal	Superficie
Patio mecánico	Rechazo térmico, bombeo y galerías hidráulicas	1.700 m²
Patio eléctrico y subestación	110/23 kV, 2 × 35 MVA, control y seguridad	2.055 m²
Generadores y combustible	13 unidades, paralelismo, estanques y descarga	3.534 m²
Circulación y servicios comunes	Vías, seguridad, incendio, estacionamientos y retiros	5.370 m²

Componente	Contenido principal	Superficie
Margen de implantación	10 % sobre componentes principales	1.576 m²

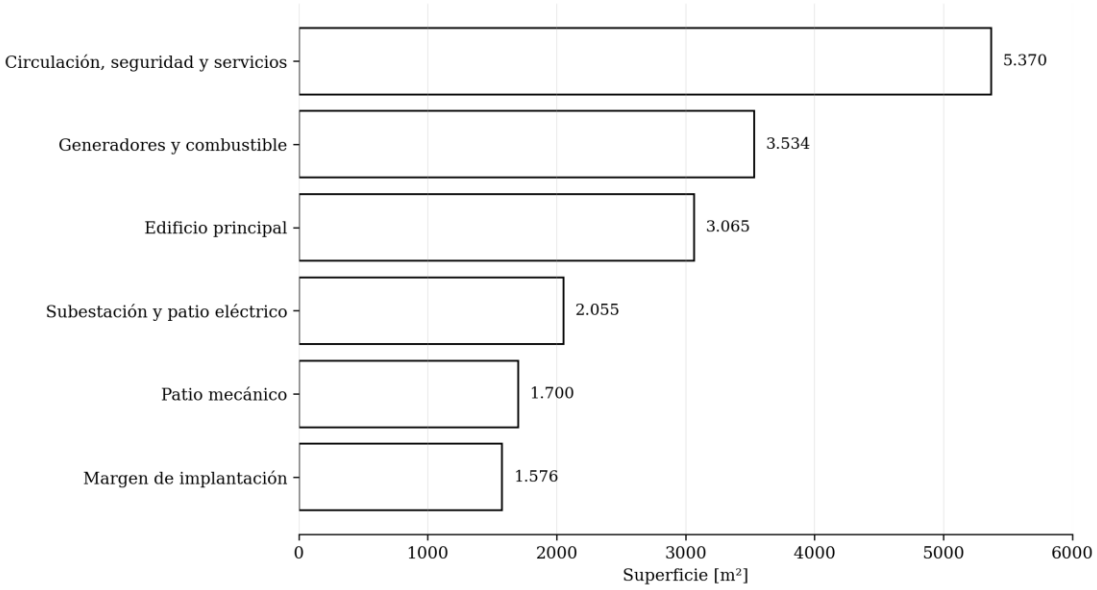
Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.6. Bases de dimensionamiento de los patios técnicos

Sistema	Componentes considerados	Superficie
Patio mecánico	Campo de rechazo, bombas, galerías hidráulicas y accesos	1.700 m²
Patio eléctrico	Patio 110 kV, 2 transformadores, 23 kV, control y franjas de seguridad	2.055 m²
Respaldo y combustible	Generadores, separación, escapes, paralelismo, estanques, pretiles y descarga	3.534 m²
Servicios comunes	Vías, estacionamientos, seguridad, incendio, áreas verdes y retiros	5.370 m²

Fuente: elaboración propia.

Figura 6.2. Composición de la huella territorial de la fase inicial



Fuente: elaboración propia.

La huella total de la fase inicial es 17.300 m², equivalente a 1,73 ha. El edificio ocupa el 17,7 % del predio, los patios técnicos el 42,1 %, las áreas comunes y de circulación el 31,0 %, y el

margen de implantación el 9,1 %. La densidad territorial resultante es 17,34 MW de potencia total por hectárea y 14,45 MW TI por hectárea.

Tabla 6.7. Escenarios de superficie para implantación y expansión

Escenario	Capacidad	Superficie	Uso en la evaluación
Fase inicial	30 MW facility	17.300 m² (1,73 ha)	Base de CAPEX y comparación macrozonal.
Campus con reserva	Hasta 90 MW facility	49.500 m² (4,95 ha)	Escenario de expansión; no integra el CAPEX base.

Fuente: elaboración propia.

La fase inicial se utiliza en la evaluación económica. La reserva de campus mantiene la posibilidad de replicar dos módulos adicionales de 30 MW y permite analizar, en forma separada, el efecto del precio y la disponibilidad de suelo sobre la escalabilidad de cada macrozona.

Tabla 6.8. Variables físicas utilizadas en la estimación del CAPEX

Partida económica	Variable física del modelo
Terreno y urbanización	1,73 ha de fase inicial y 4,95 ha en escenario de campus.
Obra civil y shell	3.065 m² de edificio principal.
Fit-out de salas TI	1.750 m² de white space y 500 racks.
Infraestructura eléctrica	2 × 35 MVA, distribución 23 kV y 25 MW de carga protegida.
Infraestructura mecánica	3,5 MW eléctricos de refrigeración y 1.700 m² de patio mecánico.
Respaldo	13 generadores de 2,5 MW y 440 m³ de almacenamiento bruto.

Fuente: elaboración propia.

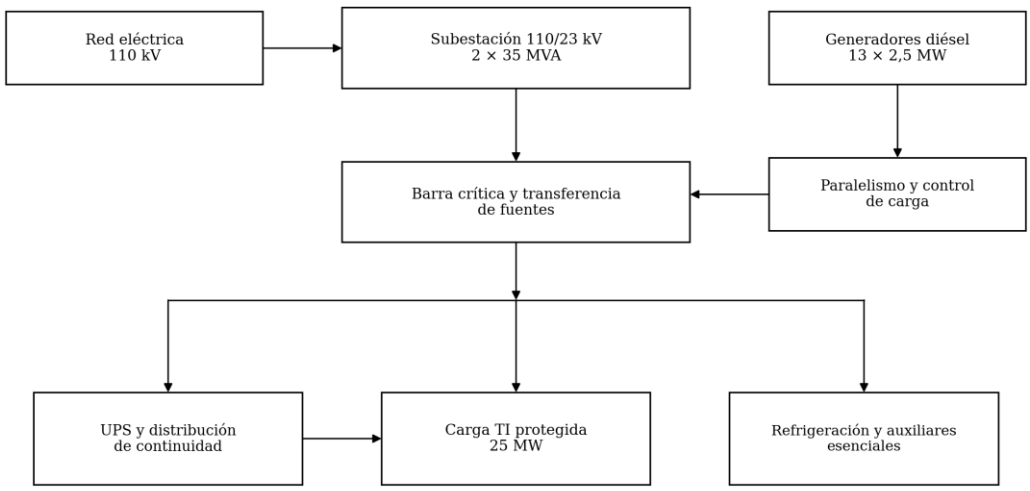
6.4 Arquitectura eléctrica y sistema de respaldo

La alimentación principal se modela mediante una conexión en 110 kV y transformación a 23 kV. Dos transformadores de 35 MVA forman una configuración 2N en el nivel principal. Para

una potencia activa de 30 MW y un factor de potencia de 0,95, la demanda aparente alcanza 31,58 MVA; cada transformador dispone de un margen nominal de 3,42 MVA.

$$S_{facility} = \frac{30}{0,95} = 31,58 MVA \quad (12)$$

Figura 6.3. Arquitectura eléctrica conceptual del caso de estudio



Fuente: elaboración propia.

La cadena UPS protege los 25 MW TI durante la transición hacia la fuente de respaldo. La autonomía del almacenamiento UPS se ajusta al tiempo de arranque y transferencia de los generadores; su dimensionamiento comercial se expresa sobre la potencia TI y la redundancia requerida. La distribución esencial recupera refrigeración y auxiliares de acuerdo con una secuencia de prioridad.

Tabla 6.9. Dimensionamiento eléctrico principal

Elemento	Configuración	Resultado de diseño
Conexión	110 kV	Punto de suministro de alta tensión.
Transformación principal	2 × 35 MVA; 110/23 kV	Cada unidad cubre 31,58 MVA del caso base.
Distribución interna	23 kV y niveles secundarios	Alimentación modular de halls y sistemas de soporte.

Elemento	Configuración	Resultado de diseño
UPS	Carga protegida de 25 MW TI	Continuidad durante transferencia de fuentes.
Generación diésel	13 × 2,5 MW	32,5 MW instalados; N+1 nominal.

Fuente: elaboración propia.

La capacidad instalada de generación es 32,5 MW. Doce unidades cubren los 30 MW del facility y la decimotercera constituye la redundancia. Con las trece unidades disponibles existe un margen de 2,5 MW; al retirar una unidad, la capacidad coincide con la demanda nominal.

$$P_{gen,inst}=13\cdot 2,5=32,5MW \quad (13)$$

$$P_{gen,N+1}=12\cdot 2,5=30MW \quad (14)$$

El margen N+1 igual a cero hace relevante el efecto de temperatura y altitud. Esta condición será distinta entre emplazamientos costeros, interiores y de mayor cota, por lo que el ajuste de potencia del fabricante se incorpora como una variable técnica de la comparación macrozonal.

6.4.1 Autonomía de combustible

Se adopta una autonomía de 48 horas a plena carga. La ficha técnica Caterpillar C175-16 de 2.500 ekW informa un consumo de 653,2 L/h al 100 % de carga (Caterpillar, 2020). Con doce unidades operando, el consumo horario del banco alcanza 7.838 L/h y el volumen útil para 48 horas es 376,2 m³. Al incorporar una reserva operativa de 15 %, el almacenamiento bruto se fija en 440 m³, distribuido en dos estanques de 220 m³.

$$V_{48h}=12\cdot 653,2\cdot 48=376,2m^3 \quad (15)$$

Tabla 6.10. Requerimiento de combustible del caso base

Parámetro	Resultado
Consumo por generador a plena carga	653,2 L/h
Generadores operativos durante contingencia	12 unidades
Consumo del banco	7.838,4 L/h
Volumen útil para 48 h	376,2 m³
Reserva operativa	15 %

Parámetro	Resultado
Volumen bruto adoptado	440 m³; 2 × 220 m³
Masa aproximada a 850 kg/m³	374 t

Fuente: elaboración propia a partir de Caterpillar (2020).

Tabla 6.11. Sensibilidad de almacenamiento según autonomía

Autonomía	Volumen útil	Volumen bruto con 15 % de reserva
24 h	188,1 m³	220 m³
48 h	376,2 m³	440 m³
72 h	564,4 m³	660 m³

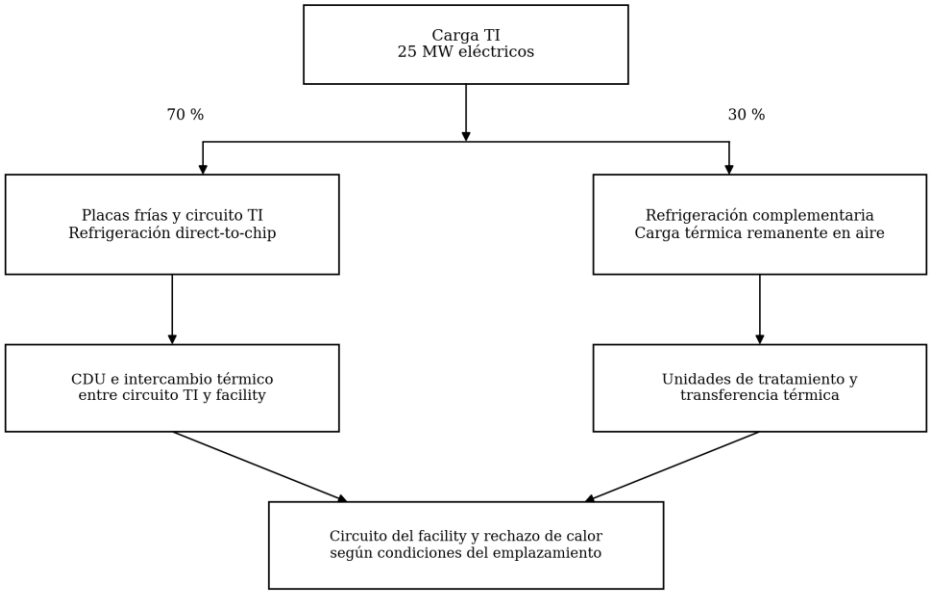
Fuente: elaboración propia.

La alternativa de 48 horas equilibra autonomía y superficie de almacenamiento. Los escenarios de 24 y 72 horas permiten medir el efecto de esta decisión sobre CAPEX, ocupación del predio y logística de abastecimiento.

6.5 Arquitectura térmica y perfil operacional

La carga TI de 25 MW se transforma prácticamente en igual magnitud de calor. El sistema D2C captura el 70 % mediante placas frías y circuitos líquidos, mientras que el 30 % restante se atiende mediante refrigeración complementaria. La distribución 70/30 se adopta como supuesto de prefactibilidad coherente con arquitecturas híbridas para servidores de alta densidad descritas por ASHRAE TC 9.9 (2021).

Figura 6.4. Arquitectura térmica conceptual del sistema D2C híbrido



Fuente: elaboración propia a partir de ASHRAE TC 9.9 (2021).

$$\dot{Q}_{D2C}=0{,}70\cdot 25=17{,}5\mathrm{MW}_{th} \quad (16)$$

$$\dot{Q}_{aire}=0{,}30\cdot 25=7{,}5\mathrm{MW}_{th} \quad (17)$$

Los 3,5 MW eléctricos asignados a refrigeración abastecen bombeo, CDU, unidades de tratamiento y rechazo de calor. La arquitectura se conserva en las tres macrozonas, pero su consumo efectivo cambia con la temperatura exterior, las horas de economización y la estrategia de rechazo térmico. Estas diferencias se representan mediante PUE y WUE en los capítulos de comparación.

Tabla 6.12. Balance térmico y variables de operación

Variable	Valor base	Relación con la comparación macrozonal
Carga térmica TI	25 MWth	Común a los tres emplazamientos.
Captura D2C	17,5 MWth; 70 %	Mantiene constante la arquitectura líquida.
Carga térmica remanente en aire	7,5 MWth; 30 %	Aumenta la dependencia del clima exterior.

Variable	Valor base	Relación con la comparación macrozonal
Potencia eléctrica de refrigeración	3,5 MW	Se modifica mediante PUE en cada escenario.
Rechazo térmico	Seco, con operación híbrida	Determina consumo eléctrico y uso de agua.

Fuente: elaboración propia.

6.5.1 Utilización anual y sensibilidad energética

El caso base utiliza un factor de carga igual a 1,00 para establecer una referencia común. La sensibilidad incorpora factores de 0,85 a 1,00 sin modificar la capacidad instalada. Esta separación evita confundir la ocupación comercial del data center con su eficiencia técnica.

Tabla 6.13. Energía anual según factor de carga

Factor de carga	Potencia media	Energía anual total
0,85	25,5 MW	223,38 GWh/año
0,90	27,0 MW	236,52 GWh/año
0,95	28,5 MW	249,66 GWh/año
1,00	30,0 MW	262,80 GWh/año

Fuente: elaboración propia.

Cada punto porcentual de variación del factor de carga modifica el consumo anual en 2,628 GWh. A carga TI constante, una variación de 0,01 en el PUE cambia la potencia total en 0,25 MW y la energía anual en 2,19 GWh.

$$\Delta E_{LF} = 30 \cdot 0{,}01 \cdot 8760 = 2{,}628 \text{GW h/a ñ} \quad (18)$$

$$\Delta E_{PUE} = 25 \cdot 0{,}01 \cdot 8760 = 2{,}19 \text{GW h/a ñ} \quad (19)$$

La sensibilidad al PUE es especialmente relevante para la comparación Norte-Centro-Sur: una diferencia de 0,05 equivale a 1,25 MW de demanda media y 10,95 GWh/año. Este resultado conecta las condiciones climáticas de cada macrozona con el OPEX energético del proyecto.

Tabla 6.14. Sensibilidad energética al PUE

PUE	Potencia del facility	Energía anual
1,15	28,75 MW	251,85 GWh/año
1,20	30,00 MW	262,80 GWh/año
1,25	31,25 MW	273,75 GWh/año

PUE	Potencia del facility	Energía anual
1,30	32,50 MW	284,70 GWh/año

Fuente: elaboración propia.

6.6 Base común y variables de comparación entre macrozonas

La comparación territorial utiliza una base técnica fija y un conjunto de variables dependientes del emplazamiento. La primera conserva la identidad del proyecto; las segundas explican las diferencias de desempeño y costo. La Tabla 6.15 define esta separación.

Tabla 6.15. Variables fijas y dependientes del emplazamiento

Dimensión	Variables fijas del caso	Variables dependientes de la macrozona
Escala	30 MW facility; 25 MW TI; 500 racks	Disponibilidad y plazo de conexión.
Edificio	3.065 m² construidos; 1,73 ha	Precio del terreno y exigencias de implantación.
Arquitectura térmica	D2C híbrida; 70 % de captura líquida	Temperatura, horas de economización, PUE y WUE.
Arquitectura eléctrica	2 × 35 MVA; 13 × 2,5 MW	Derating, obras de conexión y calidad de suministro.
Operación	Factor de carga base 1,00	Precio de energía, cargos y restricciones territoriales.
Evaluación ambiental	Mismos componentes del proyecto	Agua, receptores, riesgos y permisos específicos.

Fuente: elaboración propia.

El dimensionamiento entrega una instalación común de 500 racks, 3.065 m² de edificio, 1,73 ha de predio, 262,80 GWh/año de energía a plena carga y 440 m³ de almacenamiento bruto de combustible. Sobre esta plataforma se calculan los CAPEX territoriales, el OPEX, el PUE, el WUE y los indicadores económicos de cada macrozona.

Tabla 6.16. Resultados propios derivados del caso base

Indicador	Resultado
Número de racks	500
Data halls	5 módulos de 100 racks y 5 MW TI
White space	1.750 m²

Indicador	Resultado
Edificio principal	3.065 m²
Predio fase inicial	17.300 m²; 1,73 ha
Densidad territorial	17,34 MW facility/ha
Energía anual total	262,80 GWh/año
Captura térmica D2C	17,5 MWth
Transformación principal	2 × 35 MVA
Generación de respaldo	32,5 MW instalados
Combustible para 48 h	376,2 m³ útiles; 440 m³ brutos
Sensibilidad a 0,01 de PUE	2,19 GWh/año

Fuente: elaboración propia.

La flexibilidad se incorpora como un atributo complementario del mismo caso. Su cuantificación se presenta separadamente de la comparación central, orientada a determinar cómo cambian la viabilidad técnica, ambiental y económica del data center al localizar una arquitectura equivalente en las macrozonas Norte, Centro y Sur.

7. FLEXIBILIDAD DEL DATA CENTER TIPO

La flexibilidad se incorpora como un atributo complementario del caso de 30 MW definido en el Capítulo 6. El análisis cuantifica la potencia, la energía, la duración y las condiciones de operación de los recursos considerados, manteniendo la continuidad Tier III y el objetivo principal de comparación entre las macrozonas Norte, Centro y Sur.

Se analizan cuatro recursos: el sistema UPS, las cargas informáticas diferibles, el almacenamiento térmico mediante agua fría y un BESS dedicado como alternativa futura. Cada recurso se evalúa individualmente y posteriormente se integra en escenarios de potencia y duración.

7.1 Recursos de flexibilidad considerados

La flexibilidad del data center corresponde a la capacidad de modificar temporalmente su consumo eléctrico sin comprometer la continuidad del servicio ni las condiciones térmicas de operación. En el caso de estudio, esta capacidad se analiza para un data center de 30 MW de potencia total y 25 MW de carga TI.

Los recursos presentan distintas condiciones de disponibilidad y se agrupan en tres categorías. Los recursos existentes corresponden a equipos incluidos en la arquitectura base, como el UPS. Los recursos condicionados requieren acuerdos operativos o contractuales, como las cargas informáticas diferibles. Los recursos futuros requieren infraestructura adicional e incluyen el almacenamiento térmico y el BESS dedicado.

Cada recurso se caracteriza mediante su potencia flexible, energía utilizable, duración de la respuesta, tiempo de activación y principal restricción operativa. La duración se calcula como:

$$t = \frac{E_{utilizable}}{P_{flexible}} \tag{20}$$

Para los recursos cuya disponibilidad depende de las condiciones operativas, contractuales o de diseño, se consideran distintos escenarios de análisis. Estos permiten evaluar cómo varía la capacidad flexible ante cambios en los principales supuestos.

Tabla 7.1. Clasificación de los recursos de flexibilidad

Recurso	Condición	Principal restricción
UPS	Existente	Energía disponible y reserva de continuidad
Cargas informáticas diferibles	Condicionada	Contratos y tolerancia al retraso
Almacenamiento térmico	Futuro	Volumen, espacio y recuperación
BESS dedicado	Futuro	Potencia, energía y degradación

Fuente: elaboración propia.

7.2 Flexibilidad del sistema UPS

El sistema UPS mantiene la alimentación de la carga TI durante la transición entre la red y la generación de respaldo. Parte de la energía almacenada puede utilizarse temporalmente para reducir la demanda del data center, manteniendo una reserva destinada a continuidad operativa. El uso de UPS como recurso de respuesta rápida ha sido evaluado en configuraciones grid-interactive, en las que el sistema conserva su función de respaldo y puede contribuir a la estabilidad de la red (Microsoft, 2022).

Para el caso de estudio se considera una carga TI de 25 MW, una autonomía de ocho minutos y una reserva operativa de cinco minutos. La energía disponible se corrige mediante una eficiencia de descarga de 96 %, un estado de salud de las baterías de 90 % y un margen operativo de estado de carga de 90 %.

$$E_{nominal} = 25 \times \frac{8}{60}$$
$$E_{nominal} = 3{,}333\,MWh \tag{21}$$

$$E_{disponible} = E_{nominal}\eta_{desc}SOHSOC$$
$$\eta_{desc} = 0{,}96, SOH = 0{,}90, SOC = 0{,}90$$
$$E_{disponible} = 2{,}592\,MWh \tag{22}$$

$$E_{reserva} = 25 \times \frac{5}{60}$$
$$E_{reserva} = 2{,}083\,MWh \tag{23}$$

$$E_{flexible}=2{,}592-2{,}083$$
$$E_{flexible}=0{,}509MWh \quad (24)$$

La duración de la respuesta depende de la potencia ofrecida.

Tabla 7.2. Potencia y duración de la respuesta del UPS

Potencia flexible [MW]	Duración [min]
0,5	61,0
0,8	38,2
1,0	30,5
1,5	20,3
2,0	15,3

Fuente: elaboración propia.

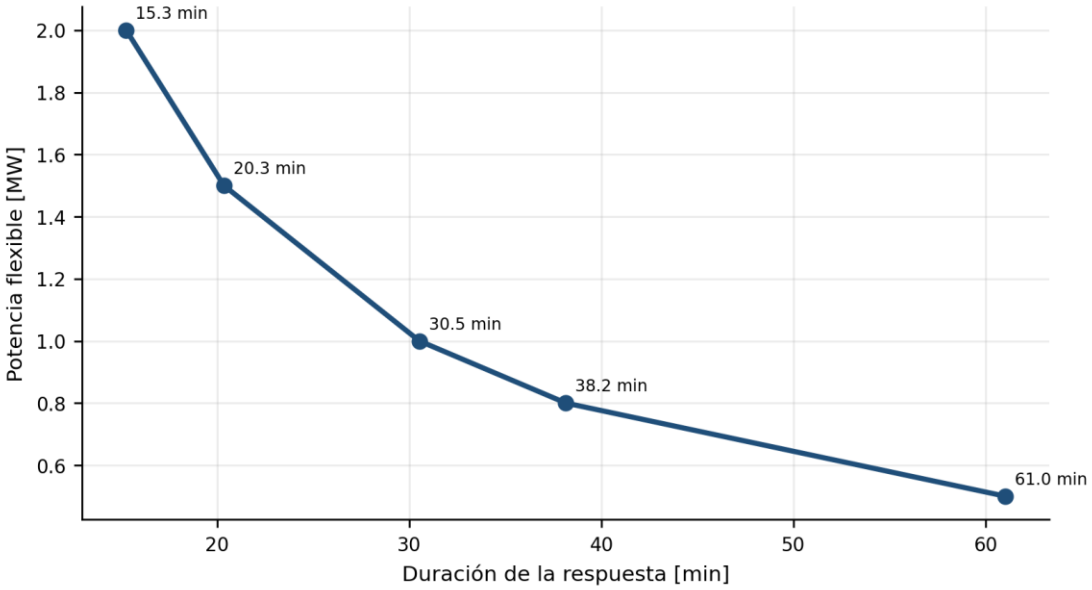


Figura 7.1. Relación potencia-duración del sistema UPS.

Fuente: elaboración propia.

Para los análisis posteriores se considera un bloque máximo de 2 MW. Bajo esta condición, el UPS puede sostener la reducción durante aproximadamente quince minutos. Su utilización requiere sistemas de control, telemetría y una configuración que mantenga disponible la reserva asociada a continuidad operativa.

7.3 Flexibilidad de las cargas informáticas

Parte de la demanda eléctrica del data center se encuentra asociada a tareas informáticas que no requieren ejecución inmediata. Procesos por lotes, respaldos, análisis de datos y determinadas cargas de entrenamiento pueden desplazarse dentro de una ventana temporal sin afectar los servicios críticos. La reprogramación de tareas no urgentes ha sido utilizada para reducir temporalmente el consumo de data centers durante períodos de mayor exigencia del sistema (Google, 2023).

En un modelo de colocation, la disponibilidad de este recurso depende de los acuerdos establecidos con los clientes, debido a que el operador no controla directamente todas las aplicaciones alojadas. La potencia flexible se estima a partir de la carga TI, la fracción de tareas diferibles y la proporción efectivamente habilitada mediante contratos:

$$P_{workload}=P_{TI}f_{diferible}f_{contractual} \tag{25}$$

Para el caso de estudio se consideran tres escenarios. La fracción diferible representa la proporción de carga TI que puede reprogramarse, mientras que el factor contractual refleja la parte de esa carga disponible para una reducción cuando se solicita.

Tabla 7.3. Escenarios de flexibilidad de las cargas informáticas

Escenario	Fracción TI diferible	Factor contractual	Potencia flexible	Duración
Conservador	2 %	80 %	0,40 MW	2 h
Intermedio	5 %	80 %	1,00 MW	4 h
Alto	10 %	80 %	2,00 MW	6 h

Fuente: elaboración propia.

$$P_{workload}=25\times0,05\times0,80$$
$$P_{workload}=1,00MW \tag{26}$$

El escenario intermedio corresponde a una reducción equivalente al 4 % de la carga TI total y puede mantenerse durante una ventana de cuatro horas. A diferencia del UPS, cuya respuesta está limitada por la energía almacenada, las cargas informáticas pueden sostener la reducción durante períodos mayores, siempre que las tareas desplazadas se ejecuten posteriormente y se mantengan los niveles de servicio comprometidos.

Para los análisis siguientes se utiliza el escenario intermedio de 1 MW durante cuatro horas. Los escenarios conservador y alto representan distintos niveles de habilitación contractual. La gestión de cargas y los programas de respuesta de demanda forman parte de los mecanismos analizados por EPRI para integrar data centers flexibles al sistema eléctrico (EPRI, 2026).

7.4 Flexibilidad térmica mediante almacenamiento de agua fría

La arquitectura D2C híbrida del caso de estudio evacua 17,5 MWt mediante el circuito líquido y 7,5 MWt mediante refrigeración complementaria por aire. La demanda eléctrica de refrigeración puede reducirse temporalmente si parte de la carga térmica es cubierta por un sistema de almacenamiento de agua fría.

Durante la carga, el sistema enfría el agua del estanque. Durante la descarga, el agua almacenada absorbe parte del calor mientras disminuye el consumo eléctrico de los equipos de refrigeración. Posteriormente, el estanque recupera su condición inicial mediante un nuevo ciclo de enfriamiento. El agua permanece en un circuito cerrado y se reutiliza en cada evento; por tanto, el volumen corresponde a inventario térmico y no a consumo de agua por activación. Este principio ha sido aplicado en instalaciones de data center para mantener la refrigeración y desplazar temporalmente la operación de los equipos mecánicos (Intel, 2007).

Para el caso de estudio se considera una reducción de 0,75 MW en la demanda eléctrica de refrigeración. Con un coeficiente de desempeño marginal igual a 6, la potencia térmica que debe ser cubierta por el almacenamiento es:

$$\dot{Q}_{TES} = P_{reducción} COP$$
$$\dot{Q}_{TES} = 0{,}75 \times 6 = 4{,}5 MW_t \quad (27)$$

La energía térmica utilizable del estanque se calcula como:

$$E_{TES} = \frac{\rho c_p V \Delta T \eta_{util}}{3600000} \quad (28)$$

Se utilizan una densidad del agua de 1.000 kg/m³, un calor específico de 4,18 kJ/kg·K, una diferencia de temperatura utilizable de 6 K y un factor de utilización de 85 %. La duración de la reducción se obtiene mediante:

$$t_{TES} = \frac{E_{TES}}{\dot{Q}_{TES}} \tag{29}$$

$$E_{TES,250} = \frac{1000 \times 4{,}18 \times 250 \times 6 \times 0{,}85}{3600000} \tag{30}$$

$$E_{TES,250} = 1{,}480 MWh_t$$

$$t_{TES,250} = \frac{1{,}480}{4{,}5} = 0{,}329h \tag{31}$$

$$t_{TES,250} = 19{,}7min$$

Tabla 7.4. Capacidad de almacenamiento térmico y duración de la respuesta

Volumen [m³]	Energía térmica utilizable [MWh_t]	Reducción eléctrica [MW]	Duración [min]
100	0,592	0,75	7,9
250	1,480	0,75	19,7
500	2,961	0,75	39,5

Fuente: elaboración propia.

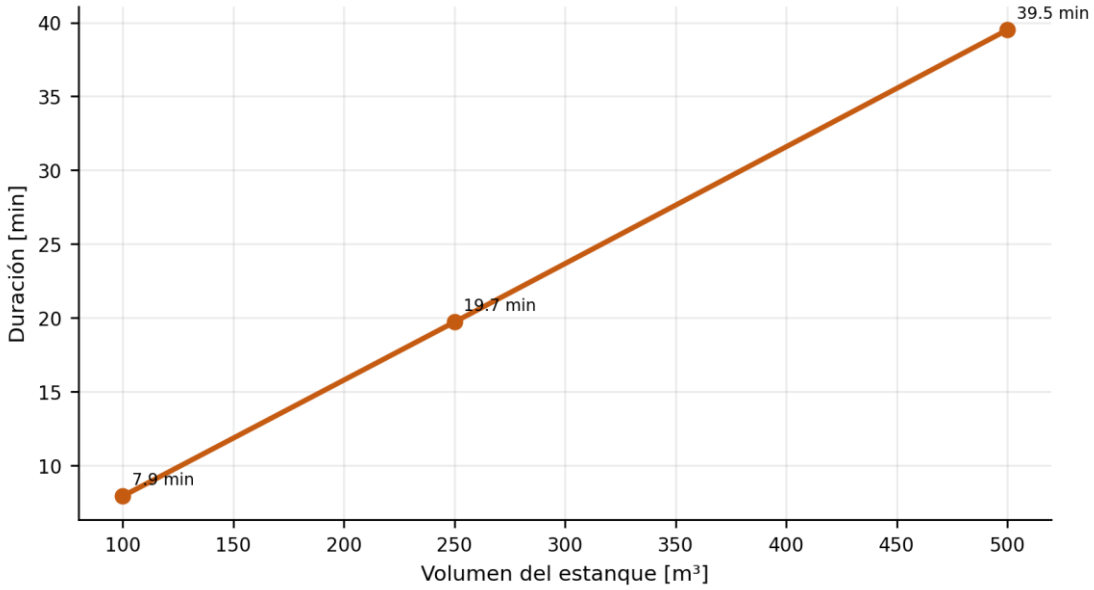


Figura 7.2. Duración de la respuesta según volumen de almacenamiento térmico.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran que la duración aumenta de manera proporcional al volumen almacenado. Un estanque de 250 m³ permite sostener una reducción de 0,75 MW durante

aproximadamente veinte minutos, mientras que uno de 500 m³ extiende la respuesta a cerca de cuarenta minutos.

Como referencia física, un volumen de 250 m³ puede representarse mediante un estanque de aproximadamente 10 m de largo, 5 m de ancho y 5 m de altura. Para los análisis posteriores se utiliza el escenario de 250 m³ como referencia y el de 500 m³ como sensibilidad superior.

7.5 Portafolio de flexibilidad del caso de estudio

La capacidad flexible del data center depende de la combinación de recursos con distintas características de potencia y duración. El UPS entrega una respuesta rápida, pero se encuentra limitado por la energía almacenada. Las cargas informáticas permiten sostener una reducción durante períodos mayores, aunque su disponibilidad depende de la habilitación contractual.

Para estimar la potencia sostenible del portafolio se combina la energía disponible del UPS, igual a 0,509 MWh, con el escenario intermedio de cargas informáticas, correspondiente a 1 MW durante cuatro horas. La potencia aportada por el UPS para cada período se calcula como:

$$P_{UPS,t}=\min\left(2,\frac{E_{flexible,UPS}}{t}\right) \tag{32}$$

$$P_{portafolio,t}=P_{UPS,t}+P_{workload} \tag{33}$$

$$P_{UPS,30}=\frac{0,509}{0,5} \tag{34}$$

$$P_{UPS,30}=1,017MW$$

$$P_{portafolio,30}=1,017+1,00 \tag{35}$$

$$P_{portafolio,30}=2,017MW$$

Tabla 7.5. Potencia sostenible del portafolio UPS-cargas informáticas

Duración	Aporte UPS [MW]	Cargas informáticas [MW]	Potencia total [MW]
15 min	2,000	1,000	3,000
30 min	1,017	1,000	2,017
60 min	0,509	1,000	1,509
120 min	0,254	1,000	1,254
240 min	0,127	1,000	1,127

Fuente: elaboración propia.

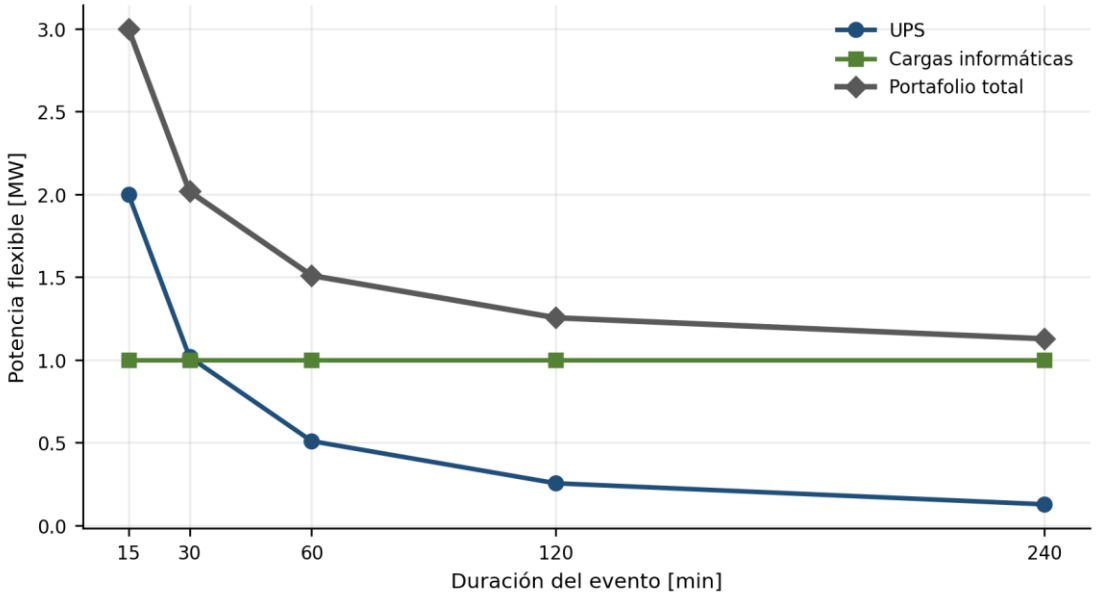


Figura 7.3. Potencia sostenible del portafolio UPS-cargas informáticas.

Fuente: elaboración propia.

La composición del portafolio cambia con la duración del evento. Para una respuesta de treinta minutos, la potencia sostenible alcanza aproximadamente 2,02 MW; para una hora disminuye a 1,51 MW; y para dos horas se mantiene en aproximadamente 1,25 MW.

El almacenamiento térmico y el BESS se incorporan como escenarios futuros separados. Un TES de 250 m³ agregaría 0,75 MW durante cerca de veinte minutos, mientras que un TES de 500 m³ mantendría la misma reducción durante aproximadamente cuarenta minutos. Por su parte, un BESS de 5 MW/5 MWh permitiría entregar 5 MW durante una hora sin utilizar la energía reservada en el UPS.

Tabla 7.6. Recursos futuros considerados en el portafolio

Recurso futuro	Potencia flexible	Duración	Condición
TES 250 m³	0,75 MW	19,7 min	Almacenamiento térmico de referencia
TES 500 m³	0,75 MW	39,5 min	Sensibilidad de mayor volumen
BESS 5 MW/5 MWh	5,00 MW	1 h	Almacenamiento eléctrico dedicado

Fuente: elaboración propia.

7.6 Escenarios de flexibilidad del data center

A partir de los resultados obtenidos para el UPS, las cargas informáticas y el almacenamiento térmico, se construyen escenarios de respuesta de corta, media y larga duración. En los eventos breves predomina el aporte del UPS, mientras que las cargas informáticas sostienen la reducción a medida que aumenta la duración.

Tabla 7.7. Escenarios de flexibilidad del data center de 30 MW

Escenario	Recursos	Potencia flexible	Duración	Condición principal
Respuesta rápida	UPS	2,00 MW	15 min	Energía disponible en baterías
Media hora	UPS + cargas TI	2,02 MW	30 min	Coordinación operativa y contractual
Una hora	UPS + cargas TI	1,51 MW	1 h	Predominio de cargas informáticas
Dos horas	UPS + cargas TI	1,25 MW	2 h	Disponibilidad contractual
Respuesta prolongada	Cargas TI	1,00 MW	4 h	Reprogramación de tareas
Escenario térmico	TES 250 m³	0,75 MW	20 min	Almacenamiento de agua fría
Térmico ampliado	TES 500 m³	0,75 MW	40 min	Mayor volumen de almacenamiento
Eléctrico futuro	BESS 5 MW/5 MWh	5,00 MW	1 h	Sistema dedicado

Fuente: elaboración propia.

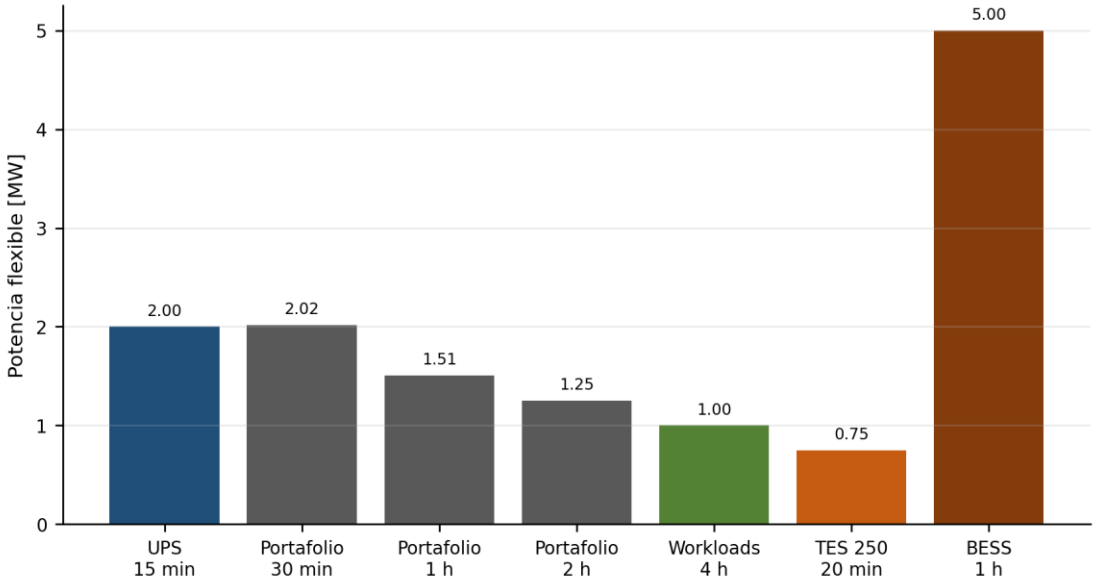


Figura 7.4. Escenarios de potencia y duración de los recursos flexibles.

Fuente: elaboración propia.

La potencia disponible depende de la duración solicitada y del recurso utilizado. En términos relativos, los 2 MW del escenario rápido representan un 6,7 % de la potencia total del data center y un 8 % de la carga TI. En el escenario de una hora, la reducción de 1,51 MW equivale a aproximadamente un 5 % de la potencia total. Estas relaciones constituyen la base para proyectar el potencial agregado de flexibilidad hacia 2030.

La compatibilidad de cada escenario con servicios complementarios debe verificarse según los requerimientos vigentes de activación, duración, telemetría, medición y tamaño mínimo de oferta definidos por el Coordinador Eléctrico Nacional.

7.7 Valorización económica referencial de los recursos flexibles

La valorización económica se utiliza para estimar el orden de magnitud de los ingresos potenciales asociados a la prestación de flexibilidad. Los parámetros de precio, disponibilidad y desempeño se adoptan como supuestos referenciales de prefactibilidad y no representan una oferta comercial. En esta etapa se consideran únicamente los recursos para los cuales es posible construir un escenario monetario directo: el UPS existente y un BESS dedicado como alternativa futura.

$$V_{neto}=I_{bruto}-A_{operativo} \tag{36}$$

$$VPN=V_{neto}\frac{1-(1+r)^{-n}}{r} \tag{37}$$

Para una tasa real de descuento de 10 % y un horizonte de veinte años, el factor de valor presente es 8,5136.

Para el UPS se considera un bloque de 2 MW, una ventana anual de disponibilidad de 2.920 horas, un factor efectivo de 85 % y activaciones de quince minutos. Bajo estas condiciones, el valor neto anual corresponde a 6.881 USD/año y su valor presente alcanza 58.586 USD.

$$\begin{gathered} VPN_{UPS}=6881\times 8,5136 \\ VPN_{UPS}=58586 \end{gathered} \tag{38}$$

Para el escenario futuro se considera un BESS de 5 MW y 5 MWh, capaz de entregar su potencia nominal durante una hora. El ingreso bruto anual se estima mediante:

$$\begin{gathered} I_{BESS}=5\times 4380\times 3,4355 \\ I_{BESS}=75237 \end{gathered} \tag{39}$$

Aplicando un factor de desempeño de 95 % y un ajuste operativo agregado, el valor neto anual se estima en 54.500 USD/año.

$$\begin{gathered} VPN_{BESS}=54500\times 8,5136 \\ VPN_{BESS}=463989 \end{gathered} \tag{40}$$

Las cargas informáticas diferibles no se valorizan de manera independiente, debido a que su remuneración dependería de los contratos establecidos con los clientes y de la distribución del beneficio económico entre el operador y los usuarios del data center. El almacenamiento térmico tampoco se monetiza en esta etapa. Su capacidad técnica se encuentra cuantificada en potencia y duración, pero su valorización depende del producto de flexibilidad utilizado, de la frecuencia de activación y de la estrategia de recuperación térmica posterior.

Tabla 7.8. Valorización referencial de los recursos flexibles

Recurso	Condición	Potencia y duración	Valor neto anual	VPN 20 años
UPS	Existente	2 MW durante 15 min	6.881 USD/año	58.586 USD

Recurso	Condición	Potencia y duración	Valor neto anual	VPN 20 años
Cargas informáticas	Contractual	1 MW durante 4 h	No valorizado	No valorizado
TES	Futuro	0,75 MW durante 20-40 min	No valorizado	No valorizado
BESS	Futuro	5 MW durante 1 h	54.500 USD/año	463.989 USD

Fuente: elaboración propia. Los valores corresponden a escenarios de prestación del servicio y no incluyen inversión, reposiciones ni financiamiento.

El BESS presenta el mayor potencial de valorización debido a su mayor potencia y duración. El UPS entrega un ingreso menor, pero utiliza infraestructura existente y permite incorporar flexibilidad sin modificar de manera sustantiva la arquitectura del data center.

7.8 Proyección del potencial de flexibilidad al año 2030

El potencial agregado de flexibilidad se proyecta a partir de la relación obtenida en el caso de estudio entre la potencia flexible y la potencia total del data center. Esta proporción se aplica a una capacidad nacional proyectada de 1.207 MW para 2030, adoptada como supuesto sectorial de referencia a partir de antecedentes del Coordinador Eléctrico Nacional (German-Chilean Energy Partnership, 2026).

$$P_{2030}=P_{parque,2030}\frac{P_{flex,caso}}{P_{caso}} \tag{41}$$

La proyección se realiza mediante dos escenarios operativos. El primero representa un parque predominantemente colocation, manteniendo el escenario intermedio de cargas informáticas diferibles definido en la Sección 7.3, equivalente a 1 MW por cada 30 MW de potencia total. El segundo representa una mayor participación de hyperscalers, donde el operador dispone de mayor control sobre las cargas informáticas. Para este escenario se considera una potencia flexible de workloads de 2,5 MW por cada instalación de 30 MW.

$$P_{col,1h}=0,509+1,00$$
$$P_{col,1h}=1,509MW \tag{42}$$

$$P_{col,2030}=1207*\frac{1,509}{30} \tag{43}$$
$$P_{col,2030}=60,7MW$$

$$P_{hyp,1h}=0,509+2,50$$
$$P_{hyp,1h}=3,009MW \quad (44)$$

$$P_{hyp,2030}=1207*\frac{3,009}{30}$$
$$P_{hyp,2030}=121,1MW \quad (45)$$

Tabla 7.9. Potencial agregado de flexibilidad proyectado al año 2030

Duración de la respuesta	Escenario colocation	Escenario hyperscaler
30 min	81,2 MW	141,5 MW
1 h	60,7 MW	121,1 MW
2 h	50,4 MW	110,8 MW
4 h	40,2 MW	100,6 MW

Fuente: elaboración propia a partir de la capacidad proyectada del parque y de los resultados del caso de estudio.

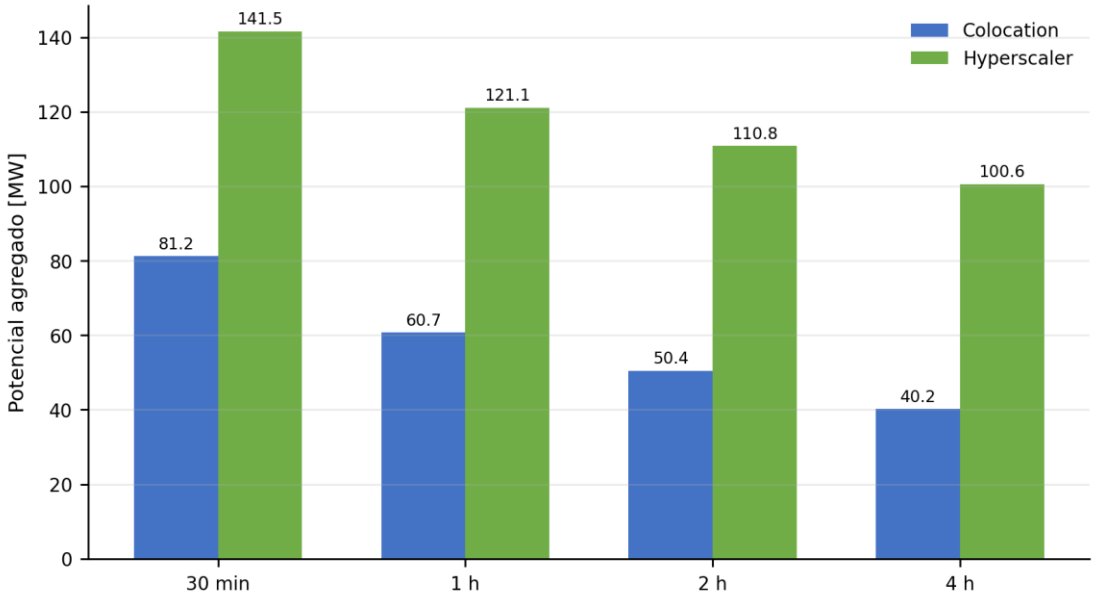


Figura 7.5. Proyección del potencial de flexibilidad al año 2030.

Fuente: elaboración propia a partir de la capacidad proyectada del parque y de los resultados del caso de estudio.

La proyección muestra que el potencial de flexibilidad depende principalmente del nivel de control sobre las cargas informáticas. En un parque predominantemente colocation, la capacidad estimada alcanza aproximadamente 61 MW durante una hora y 40 MW durante cuatro horas. En un escenario con mayor participación de hyperscalers, estos valores aumentan a cerca de 121 MW y 101 MW, respectivamente.

El tamaño individual de las instalaciones no modifica el resultado agregado mientras se mantengan las mismas proporciones entre potencia total, carga TI y recursos flexibles. Un data center de 100 MW aportaría una mayor potencia por instalación que uno de 30 MW, pero la fracción flexible aplicada al parque nacional sería equivalente. Por tanto, la diferencia entre ambos escenarios se explica por el modelo de operación y por la proporción de carga informática que puede gestionarse temporalmente.

8. ANÁLISIS ECONÓMICO COMPARATIVO DEL DATA CENTER TIPO

8.1 Alcance y base de cálculo

El análisis económico compara la materialización del mismo data center de 30 MW en las macrozonas Norte, Centro y Sur. La arquitectura, la carga informática y el horizonte de evaluación se mantienen constantes; las diferencias provienen del clima, la conexión eléctrica, la energía, la transmisión, la fibra, el terreno y las obras territoriales asociadas a cada emplazamiento.

La base común corresponde a 25 MW de carga TI y 219.000 MWh-IT anuales. La evaluación se desarrolla a veinte años con una tasa real de descuento de 10 %, adoptada como escenario conservador de prefactibilidad para infraestructura privada. La tasa no constituye un parámetro regulatorio y debe someterse a sensibilidad en el capítulo siguiente.

$$E_{TI}=P_{TI}\times 8{,}760$$
$$25\times 8{,}760=219{,}000 \tag{46}$$

El factor de valor presente de una anualidad constante para veinte años y una tasa real de 10 % es 8,5136.

$$FVP=\frac{1-(1+r)^{-n}}{r}$$
$$\frac{1-(1+0{,}10)^{-20}}{0{,}10}$$
$$FVP=8{,}5136 \tag{47}$$

La variable de decisión es el costo total de propiedad comparable, definido como la inversión del facility más el valor presente de los costos diferenciables de energía y transmisión. El equipamiento TI activo se excluye porque pertenece al cliente en el modelo colocation y no explica las diferencias territoriales.

$$TCO_c=CAPEX+V_E+V_T \tag{48}$$

Tabla 8.1. Parámetros generales del análisis económico

Parámetro	Valor adoptado
Potencia total del facility	30 MW
Potencia TI	25 MW

Parámetro	Valor adoptado
Energía TI anual	219.000 MWh-IT
Horizonte de evaluación	20 años
Tasa real de descuento	10 %
Factor de valor presente	8,5136

Fuente: elaboración propia.

8.2 Eficiencia energética y consumo por emplazamiento

La arquitectura D2C híbrida evacua 70 % de la carga térmica mediante el circuito líquido y 30 % mediante la rama de aire. El consumo de refrigeración cambia con la temperatura exterior y con las horas disponibles de economización. Para representar esta relación se utilizan cuatro regímenes térmicos.

Tabla 8.2. Modelo de PUE por régimen térmico

Régimen	Condición de temperatura	PUE representativo	Mecanismo dominante
R1	Ts < 12 °C	1,12-1,13	Free cooling total
R2	12 ≤ Ts < 18 °C	1,13-1,17	Free cooling parcial
R3	18 ≤ Ts < 28 °C	1,17-1,28	Operación híbrida mecánica
R4	Ts ≥ 28 °C	> 1,28	Refrigeración mecánica plena

Fuente: elaboración propia.

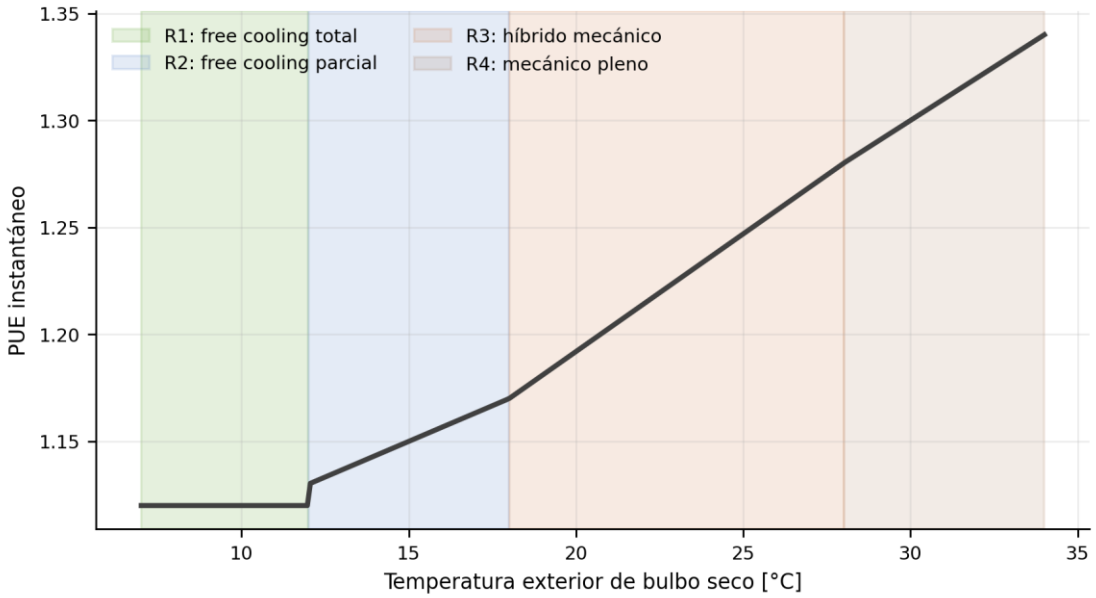


Figura 8.1. Curva de PUE instantáneo en función de la temperatura exterior.

Fuente: elaboración propia a partir del modelo por régimen térmico.

La distribución horaria del caso base se construyó a partir de años meteorológicos típicos representativos para clasificar las 8.760 horas de cada sitio. Los resultados se contrastaron con registros climáticos horarios de años pasados correspondientes a los tres emplazamientos analizados.

Tabla 8.3. Distribución horaria anual por régimen térmico

Sitio	Ts media	R1 < 12	R2 12-18	R3 18-28	R4 > 28
Antofagasta	16,4 °C	2.400 h	4.300 h	1.800 h	260 h
Calama	13,6 °C	2.400 h	3.500 h	2.400 h	460 h
Santiago	15,1 °C	1.800 h	4.400 h	2.200 h	360 h
Valparaíso	14,1 °C	4.600 h	3.380 h	720 h	60 h
Concepción	12,4 °C	5.300 h	3.060 h	400 h	0 h
Puerto Montt	10,1 °C	7.000 h	1.760 h	0 h	0 h

Fuente: elaboración propia a partir de los perfiles TMY utilizados en el modelo.

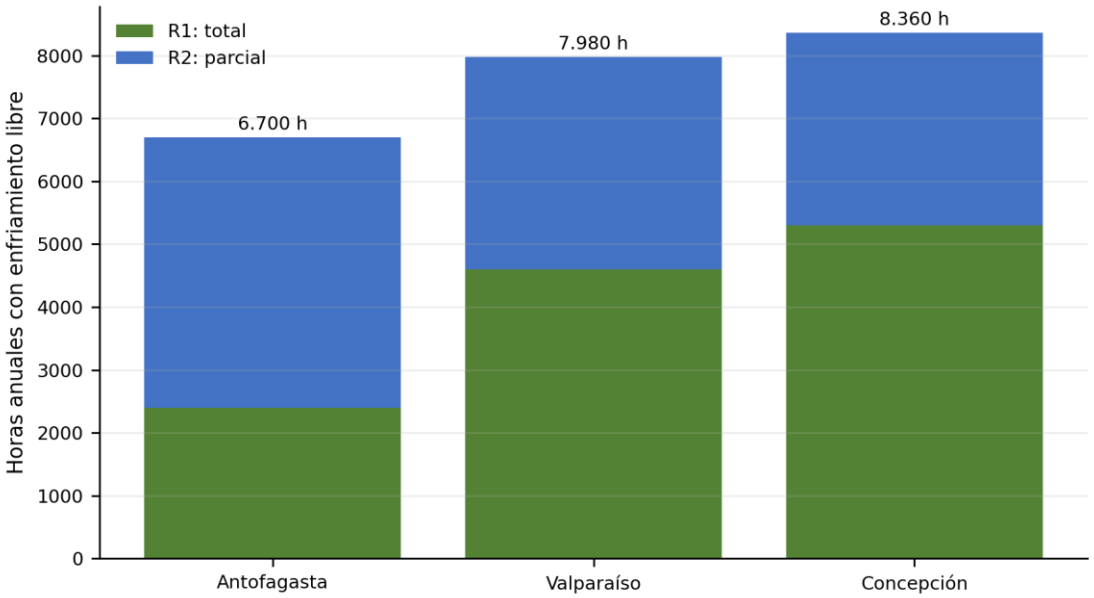


Figura 8.2. Horas anuales de enfriamiento libre en los emplazamientos representativos.

Fuente: elaboración propia a partir de la distribución horaria de la Tabla 8.3.

El PUE anual se obtiene ponderando el PUE de cada régimen por las horas de ocurrencia.

$$PUE_{anual} = \frac{\sum_{i=1}^{4} h_i \, PUE_i}{8{,}760} \tag{49}$$

Para Concepción, el cálculo ilustrativo es:

$$\mathrm{PUE}_{\text{Concepción}} = \frac{5{,}300(1{,}13)+3{,}060(1{,}16)+400(1{,}27)}{8{,}760}$$

$$\mathrm{PUE}_{\text{Concepción}} = 1{,}147 \tag{50}$$

Tabla 8.4. PUE anual y energía del facility con 25 MW TI

Sitio	Macrozona	PUE anual	Energía facility
Antofagasta	Norte costero	1,176	257,54 GWh/año
Calama	Norte interior	1,184	259,30 GWh/año
Santiago	Centro interior	1,181	258,64 GWh/año
Valparaíso	Centro costero	1,154	252,73 GWh/año
Concepción	Sur	1,147	251,19 GWh/año
Puerto Montt	Sur extremo	1,138	249,22 GWh/año

Fuente: elaboración propia.

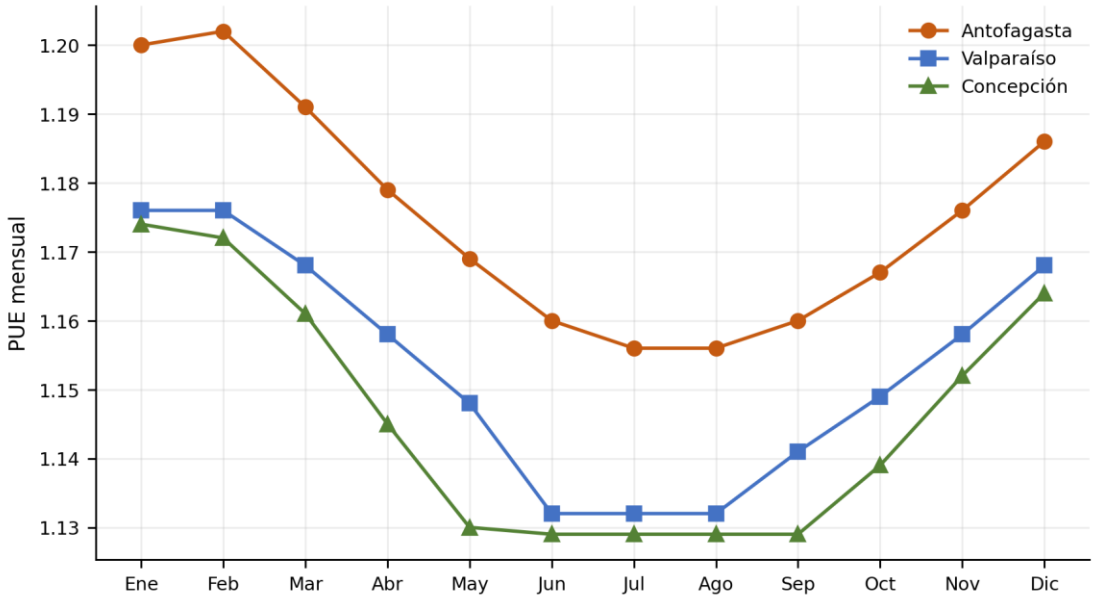


Figura 8.3. Perfil mensual de PUE para los emplazamientos representativos.

Fuente: elaboración propia; perfiles mensuales anclados a los promedios anuales del modelo.

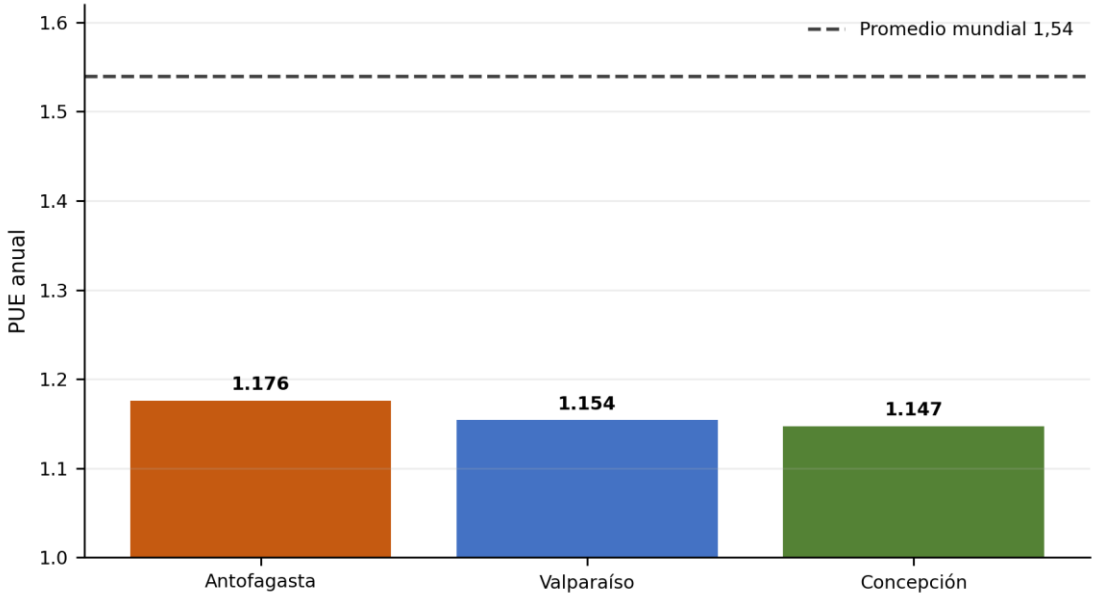


Figura 8.4. PUE anual frente al promedio mundial de referencia.

Fuente: elaboración propia; referencia sectorial de Uptime Institute (2025).

El PUE de 1,20 definido en el Capítulo 6 corresponde a la condición nominal de diseño y dimensionamiento. Los valores anuales del modelo representan promedios operacionales asociados a cada emplazamiento. La contrastación con registros climáticos horarios entregó

PUE de 1,166 en Antofagasta, 1,148 en Valparaíso y 1,144 en Concepción. La arquitectura D2C híbrida y el rechazo seco reducen la magnitud de las diferencias climáticas entre los sitios.

$$\Delta E = 257{,}544 - 251{,}193 = 6{,}351\,\text{MW h/año} \tag{51}$$

En el caso base, la diferencia de 6,35 GWh/año equivale aproximadamente al 2,5 % del consumo de Concepción y representa la ventaja energética asociada al clima del emplazamiento sur.

8.3 WUE directo y huella hídrica indirecta

La arquitectura seca reduce el consumo directo de agua del recinto a valores asociados principalmente a humidificación residual, limpieza y servicios sanitarios. Para no confundir este consumo físico con el agua utilizada en la generación eléctrica, el análisis distingue el WUE directo del facility y la huella hídrica indirecta de la electricidad.

$$\text{WUE}_{\text{directo}} = \frac{V_{\text{agua,sitio}}}{E_{TI}} \tag{52}$$

$$\text{WUE}_{\text{indirecto}} = \text{EWIF} \times \text{PUE} \tag{53}$$

La huella hídrica indirecta es un indicador de cadena de suministro y no representa agua extraída en el emplazamiento del data center. El resultado depende del mix zonal adoptado y de los factores hídricos por tecnología, especialmente del tratamiento de la evaporación atribuida a embalses. El mix zonal se utiliza como supuesto atribucional de prefactibilidad y se somete posteriormente a sensibilidad.

Tabla 8.5. Factores hídricos utilizados por tecnología

Tecnología	Factor de consumo
Solar fotovoltaica	0,050 L/kWh
Eólica	0,002 L/kWh
Hidroeléctrica de embalse	10,000 L/kWh
Hidroeléctrica de pasada	0,015 L/kWh
Gas ciclo combinado húmedo	0,700 L/kWh
Carbón húmedo	2,000 L/kWh
Biomasa	1,800 L/kWh

Tecnología	Factor de consumo
Diésel	0,500 L/kWh

Fuente: adaptado de Torcellini et al. (2003) y Mekonnen et al. (2015).

El EWIF zonal se calcula como el promedio ponderado de los factores de cada tecnología según su participación en el escenario eléctrico.

$$EWIF_z = \sum_j x_{j,z}\, f_j \tag{54}$$

Tabla 8.6. EWIF utilizado por zona

Zona	EWIF adoptado	Factor dominante
Norte	0,336 L/kWh	Matriz solar dominante
Centro	0,975 L/kWh	Embalse y generación térmica
Sur	1,432 L/kWh	Sensibilidad al factor de embalses

Fuente: elaboración propia.

El WUE total y el volumen anual asociado se calculan mediante:

$$WUE_{total} = WUE_{directo} + WUE_{indirecto} \tag{55}$$

$$V_{asociado} = WUE_{total} \times E_{TI} \tag{56}$$

Tabla 8.7. WUE y volumen anual asociado con 25 MW TI

Sitio	WUE directo	WUE indirecto	WUE total	Volumen asociado
Antofagasta	0,007	0,395	0,402	88.038 m³/año
Valparaíso	0,006	1,125	1,131	247.689 m³/año
Concepción	0,005	1,643	1,648	360.912 m³/año

Fuente: elaboración propia. WUE en L/kWh-IT; el volumen combina consumo directo y huella indirecta del escenario.

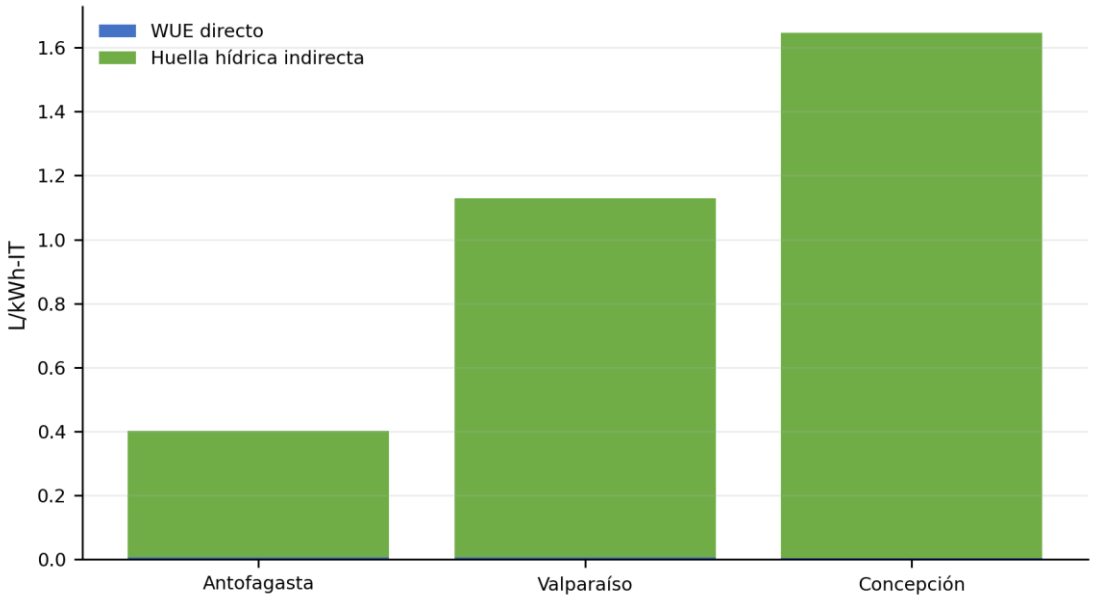


Figura 8.5. WUE directo y huella hídrica indirecta por emplazamiento.

Fuente: elaboración propia.

Bajo los supuestos adoptados, la huella indirecta del escenario Sur supera la del Norte. El resultado no significa que el data center de Concepción extraiga físicamente más agua en el sitio; refleja el agua asignada a la electricidad consumida. El componente indirecto representa más del 98 % del indicador total en los tres emplazamientos, por lo que debe utilizarse como sensibilidad ambiental y no como criterio único de localización.

8.4 CAPEX por emplazamiento

El CAPEX del facility alcanza 302,9 MUSD en Valparaíso, 312,9 MUSD en Concepción y 337,6 MUSD en Antofagasta. Las partidas corresponden a costos paramétricos de prefactibilidad aplicados de forma consistente y no constituyen cotizaciones de ingeniería. La mayor parte de la arquitectura es común; las diferencias se concentran en conexión, fibra, terreno, logística y adecuaciones mecánicas. En Antofagasta, la solución de conexión externa en 220 kV se mantiene como escenario de prefactibilidad, mientras la distribución interna del Capítulo 6 permanece en 110/23 kV.

Tabla 8.8. CAPEX por partida y emplazamiento [MUSD]

Partida	Valparaíso	Concepción	Antofagasta	Driver del diferencial
Sistema eléctrico interno	127,2	127,2	127,2	Arquitectura Tier III común
Sistema mecánico	66,6	66,6	67,8	Condiciones ambientales del Norte
Obra civil y edificio	48,5	49,5	49,5	Suelo y fundaciones
Fit-out interno	15,1	15,1	15,1	Sin diferencial
Conexión externa al SEN	12,1	16,5	39,7	Distancia, tensión y obras dedicadas
Fibra y comunicaciones	3,0	4,5	6,8	Extensión y redundancia de rutas
Seguridad y supresión	6,1	6,1	6,1	Sin diferencial
Diseño y permisos	12,1	12,1	12,1	Base común
Terreno, contingencia y logística	12,1	15,4	13,3	Condiciones territoriales
Ajuste de redondeo	+0,1	-0,1	0,0	Conciliación de partidas
Total	302,9	312,9	337,6	Facility

Fuente: elaboración propia.

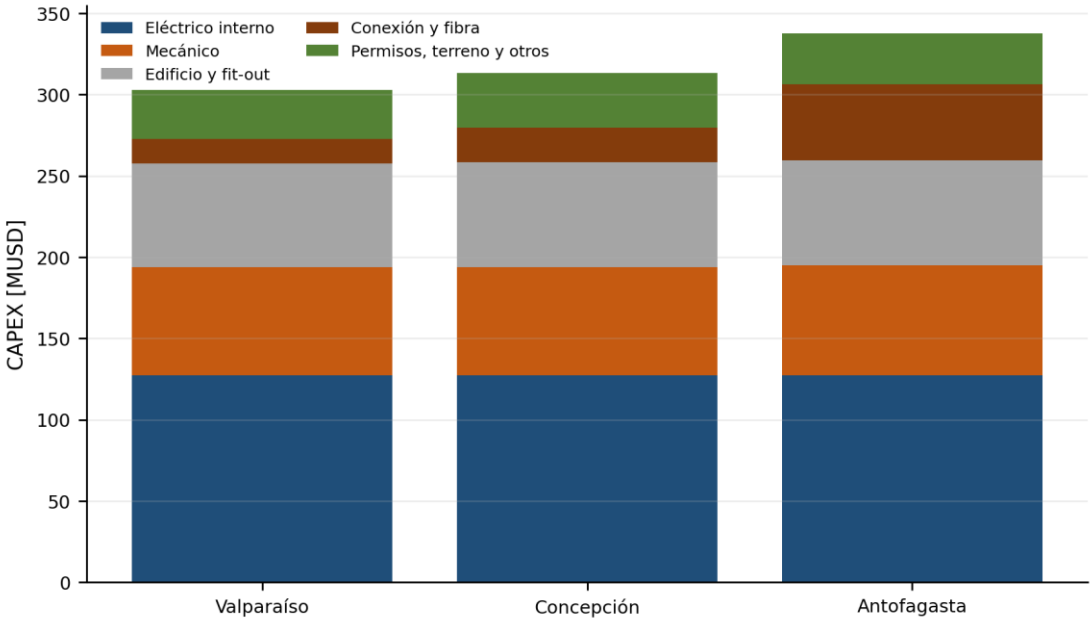


Figura 8.6. Composición agrupada del CAPEX por emplazamiento.

Fuente: elaboración propia.

La diferencia entre Antofagasta y Valparaíso es 34,7 MUSD. De esta brecha, 27,6 MUSD provienen de la conexión externa al SEN.

$$\Delta CAPEX_{conexión} = 39{,}7 - 12{,}1 = 27{,}6 \text{ MUSD}$$
$$\frac{27{,}6}{34{,}7} \times 100 = 79{,}5\% \quad (57)$$

Cerca del 80 % de la diferencia se explica por la conexión, lo que muestra que la proximidad a infraestructura eléctrica y de telecomunicaciones es más determinante que las pequeñas variaciones del núcleo técnico del facility.

Tabla 8.9. CAPEX por unidad de carga TI [USD/W-IT]

Sitio	CAPEX técnico comparable	CAPEX completo	Diferencial territorial
Valparaíso	10,54	12,12	1,58
Concepción	10,58	12,52	1,94
Antofagasta	10,63	13,50	2,88

Fuente: elaboración propia.

8.5 OPEX energético y cargos de transmisión

8.5.1 Energía

El OPEX energético se calcula con el Precio Básico de Energía nodal utilizado en el modelo de prefactibilidad. La energía anual del facility resulta de la energía TI y el PUE de cada emplazamiento.

$$E_{facility} = E_{TI} \times PU_E \quad (58)$$

$$C_{energía} = E_{facility} \times PBE \quad (59)$$

Tabla 8.10. Precio Básico de Energía utilizado

Nodo	Emplazamiento	PBE
Crucero 220 kV	Antofagasta	32,05 USD/MWh
Quillota 220 kV	Valparaíso	28,39 USD/MWh
Charrúa 220 kV	Concepción	23,48 USD/MWh

Fuente: CNE, Resolución Exenta N.º 57/2025, ITD PNCP enero de 2025.

Tabla 8.11. OPEX energético corregido a 25 MW TI

Sitio	PUE	Energía facility	PBE	OPEX anual	VPN 20 años
Antofagasta	1,176	257.544 MWh	32,05	8,25 MUSD	70,27 MUSD
Valparaíso	1,154	252.726 MWh	28,39	7,17 MUSD	61,08 MUSD
Concepción	1,147	251.193 MWh	23,48	5,90 MUSD	50,21 MUSD

Fuente: elaboración propia.

El ranking energético favorece a Concepción, seguido de Valparaíso y Antofagasta. La diferencia responde simultáneamente al PUE y al precio nodal. La interpretación causal de los precios se mantiene como lectura del escenario oficial y no como descomposición econométrica de los factores de planificación.

8.5.2 Transmisión

Los cargos de transmisión se aplican a la energía total del facility y se tratan como una partida diferenciable por sitio. Los valores utilizados combinan el cargo nacional y el cargo zonal del escenario.

$$C_{transmisión} = E_{facility} \times P_{transmisió} \quad (60)$$

Tabla 8.12. Cargos de transmisión por emplazamiento

Sitio	Sistema zonal	Cargo zonal	Cargo nacional	Cargo total	Costo anual	VPN 20 años
Antofagasta	STZ Norte Grande	3,8	5,2	9,0 USD/MWh	2,32 MUSD	19,73 MUSD
Valparaíso	STZ A	5,1	5,2	10,3 USD/MWh	2,60 MUSD	22,16 MUSD
Concepción	STZ B	4,5	5,2	9,7 USD/MWh	2,44 MUSD	20,74 MUSD

Fuente: elaboración propia a partir de los cargos utilizados en el modelo.

Los costos no energéticos comunes —personal, mantenimiento, seguros y operación básica— se excluyen del TCO comparable porque no modifican el ranking territorial. Deben incorporarse en el flujo financiero completo del proyecto.

8.6 Costo total de propiedad comparable

El TCO comparable integra el CAPEX y el valor presente de los costos de energía y transmisión diferenciables por emplazamiento.

$$TCO_b = CAPEX + V_E + V_T \tag{61}$$

Tabla 8.13. TCO base corregido por emplazamiento [MUSD]

Sitio	CAPEX	VPN energía	VPN transmisión	TCO base	Diferencia
Concepción	312,9	50,21	20,74	383,86	0,0 %
Valparaíso	302,9	61,08	22,16	386,15	+0,6 %
Antofagasta	337,6	70,27	19,73	427,61	+11,4 %

Fuente: elaboración propia.

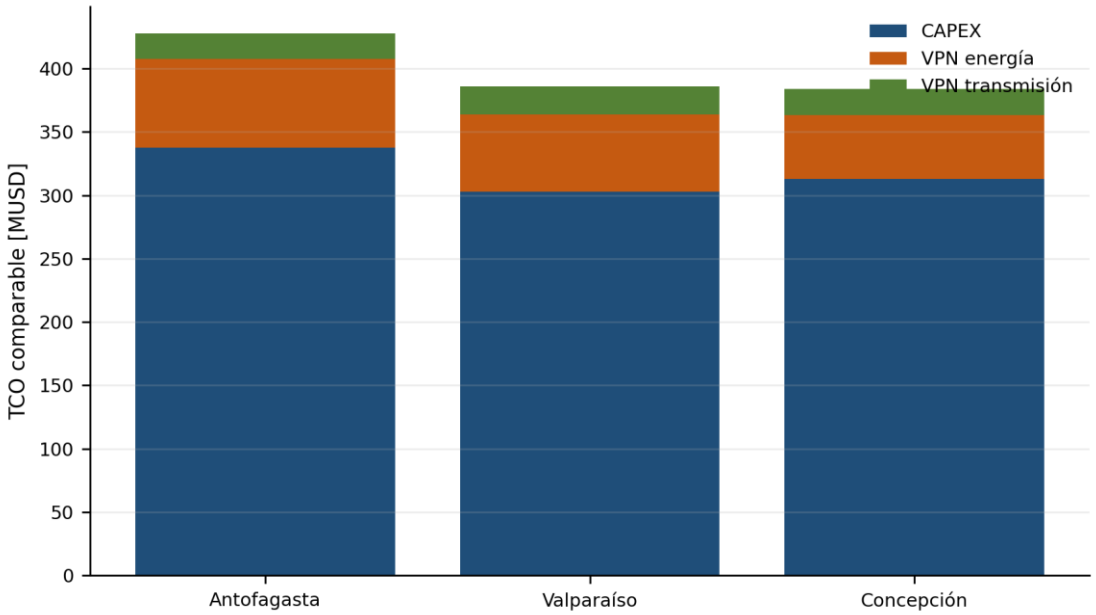


Figura 8.7. Composición del costo total de propiedad comparable.

Fuente: elaboración propia.

Concepción obtiene el menor TCO comparable. Valparaíso se ubica 2,29 MUSD por encima, equivalente a aproximadamente 0,6 %. Esta diferencia es inferior a la incertidumbre normal de una prefactibilidad, por lo que ambas alternativas permanecen económicamente próximas. Antofagasta presenta una brecha de 43,75 MUSD respecto del mínimo, concentrada en conexión, energía y fibra.

$$\Delta TCO = 2{,}29\,\text{MUSD} \qquad \frac{2{,}29}{383{,}86} \times 100 = 0{,}60\% \tag{62}$$

8.6.1 Incorporación de la flexibilidad

El Capítulo 7 estima un ingreso neto anual de 6.881 USD para el portafolio central y un valor presente de 58.586 USD, equivalente a 0,0586 MUSD. El ingreso se aplica uniformemente porque el modelo no dispone de una remuneración diferenciada por macrozona.

$$TCO_a = TCO_b - V_f \tag{63}$$

Tabla 8.14. Efecto de la flexibilidad sobre el TCO [MUSD]

Sitio	TCO base	VPN flexibilidad	TCO ajustado	Reducción
Concepción	383,86	0,0586	383,80	0,015 %

Sitio	TCO base	VPN flexibilidad	TCO ajustado	Reducción
Valparaíso	386,15	0,0586	386,09	0,015 %
Antofagasta	427,61	0,0586	427,55	0,014 %

Fuente: elaboración propia.

La valorización de la flexibilidad representa una fracción reducida del TCO en los tres emplazamientos. Su aporte individual es marginal frente al CAPEX y al OPEX, aunque conserva valor operacional y puede adquirir relevancia agregada a escala de parque. El escenario BESS se mantiene separado del TCO porque requiere inversión adicional y considera efectos de degradación.

8.7 Síntesis comparativa

Tabla 8.15. Síntesis económica y ambiental de los emplazamientos

Indicador	Antofagasta	Valparaíso	Concepción
PUE anual	1,176	1,154	1,147
Energía anual	257,54 GWh	252,73 GWh	251,19 GWh
WUE total	0,402 L/kWh-IT	1,131 L/kWh-IT	1,648 L/kWh-IT
CAPEX	337,6 MUSD	302,9 MUSD	312,9 MUSD
TCO base	427,61 MUSD	386,15 MUSD	383,86 MUSD
Diferencia frente al mínimo	11,4 %	0,6 %	0,0 %

Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran que el clima mejora el PUE hacia el Sur, pero la diferencia energética se mantiene moderada debido a la arquitectura D2C híbrida. El CAPEX mínimo corresponde a Valparaíso, mientras Concepción compensa su mayor inversión con un menor costo de energía y obtiene el TCO comparable más bajo. La cercanía entre ambos obliga a incorporar disponibilidad de potencia, conectividad, plazo de conexión, riesgos ambientales y sensibilidades antes de formular la recomendación final.

Antofagasta conserva la menor huella hídrica indirecta bajo el escenario adoptado, pero presenta el mayor TCO por las obras externas y el precio de energía. La huella hídrica no debe

interpretarse como consumo directo del recinto ni reemplazar el análisis de disponibilidad jurídica y física de agua desarrollado en el Capítulo 5.

La comparación confirma que la localización no depende de una única variable. El capítulo siguiente debe probar la estabilidad del ordenamiento frente a variaciones de CAPEX de conexión, PBE, tasa de descuento, PUE, utilización y supuestos de huella hídrica.

9. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD, ESCENARIOS Y GUÍA DE LOCALIZACIÓN

El Capítulo 8 mostró que Concepción presenta el menor costo total comparable, con 383,86 MUSD, seguida por Valparaíso con 386,15 MUSD y Antofagasta con 427,61 MUSD. La diferencia entre Concepción y Valparaíso es de 2,29 MUSD, equivalente a 0,6 %, por lo que la recomendación debe probarse frente a variaciones razonables de conexión, energía, utilización, eficiencia y tasa de descuento.

El capítulo determina qué variables pueden cambiar el ordenamiento y transforma los resultados en una guía reproducible para seleccionar emplazamientos de data centers en Chile.

9.1 Metodología y rangos de análisis

El análisis combina sensibilidad univariada, puntos de quiebre y escenarios integrados. En la sensibilidad se modifica una variable y se mantienen constantes las demás.

$$TCO_s = CAPEX_s + \frac{219.000 \times PUE_s \times (PBE_s + CT_s) \times FVP}{10^6} - VPN_{flex,s} \quad (64)$$

Tabla 9.1. Variables y rangos de sensibilidad

Variable	Rango	Propósito
CAPEX total	−10 % a +10 %	Incertidumbre global de inversión.
Conexión	−30 % a +50 %	Obras, refuerzos y servidumbres.
Precio de energía	−20 % a +20 %	Exposición contractual.
Tasa real	8 % a 12 %	Peso entre CAPEX y OPEX.
Transmisión	−20 % a +20 %	Sensibilidad regulatoria.
Terreno y logística	−20 % a +30 %	Condiciones prediales.
Fibra	−30 % a +30 %	Rutas y redundancia.
PUE	−0,02 a +0,02	Desempeño térmico.
Utilización	0,80 a 1,00	Ocupación comercial.
Flexibilidad	0 a 2 veces	Ingreso adicional.

Fuente: elaboración propia.

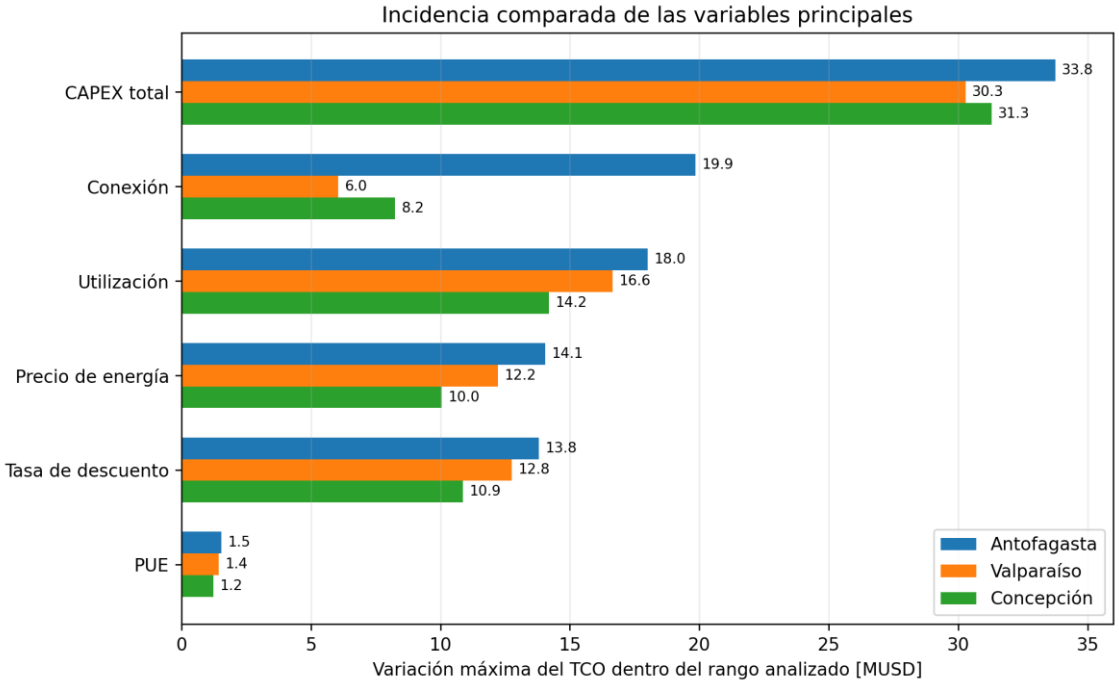
La tabla debe leerse como el marco de prueba del modelo. El rango no indica que todas las variables tengan la misma probabilidad de ocurrir, sino el intervalo dentro del cual se examina la

estabilidad del resultado. Las variables territoriales —conexión, fibra, terreno y logística— se modifican de forma independiente porque dependen directamente del sitio. Las variables operativas —precio de energía, transmisión, PUE y utilización— afectan los costos acumulados durante la vida útil.

Para interpretar los resultados posteriores, una variación común a las tres macrozonas puede aumentar o reducir el TCO sin cambiar el ranking. En cambio, una desviación específica de un emplazamiento sí puede modificar la recomendación. Esta distinción es central: el objetivo no es identificar la variable con mayor valor absoluto, sino aquella capaz de cambiar la decisión territorial.

9.2 Sensibilidad univariada del TCO

Figura 9.1. Incidencia comparada de las variables principales sobre el TCO.



Fuente: elaboración propia.

La Figura 9.1 compara el cambio máximo del TCO dentro de los rangos definidos. El CAPEX total presenta la mayor magnitud absoluta, mientras que conexión, precio de energía y utilización concentran la mayor relevancia para la localización porque pueden deteriorarse de manera distinta en cada emplazamiento.

La interpretación debe separar variaciones comunes y específicas. Un aumento general de 10 % en el CAPEX eleva el costo de las tres alternativas, pero puede mantener el orden relativo; en cambio, una desviación localizada en conexión, energía o utilización puede invertir la preferencia entre sitios.

La conexión domina la sensibilidad de Antofagasta por su mayor costo base. En la comparación entre Concepción y Valparaíso, la brecha de 2,29 MUSD hace que cambios moderados en energía o conexión sean suficientes para alcanzar el punto de equilibrio.

Por tanto, la figura no identifica una causa única de localización: prioriza las variables que deben sustituirse primero por estudios, ofertas o contratos específicos del sitio antes de adoptar una decisión de inversión.

9.2.1 Energía, transmisión y tasa de descuento

Tabla 9.2. TCO frente a variaciones del precio de energía [MUSD]

Variación	Antofagasta	Valparaíso	Concepción	Menor TCO
-20 %	413,56	373,93	373,82	Concepción
-10 %	420,58	380,04	378,84	Concepción
+10 %	434,64	392,26	388,88	Concepción
+20 %	441,66	398,37	393,90	Concepción

Fuente: elaboración propia.

La tabla muestra una sensibilidad uniforme: el mismo porcentaje se aplica al PBE de los tres emplazamientos. En ese caso, Concepción conserva la primera posición porque parte de un menor costo de energía y un menor PUE. No obstante, el TCO cambia de manera material: una variación de 20 % desplaza el resultado entre aproximadamente 10 y 14 MUSD según la macrozona.

La conclusión relevante no es que el ranking sea inmune al precio, sino que una variación general no basta para cambiarlo. La decisión cambia cuando el deterioro es específico. En Concepción, un aumento desde 23,48 hasta aproximadamente 24,55 USD/MWh elimina su ventaja frente a Valparaíso. Por tanto, el precio contractual debe verificarse antes de seleccionar definitivamente el sitio.

9.2.2 Conexión, fibra, terreno y logística

$$TCO_{nuevo,s} = TCO_{base,s} - C_{base,s} + C_{sensibilidad,s} \quad (65)$$

Tabla 9.3. Efecto de la conexión eléctrica sobre el TCO [MUSD]

Escenario	Antofagasta	Valparaíso	Concepción	Menor TCO
−30 %	415,70	382,52	378,91	Concepción
Base	427,61	386,15	383,86	Concepción
+50 %	447,46	392,20	392,11	Concepción

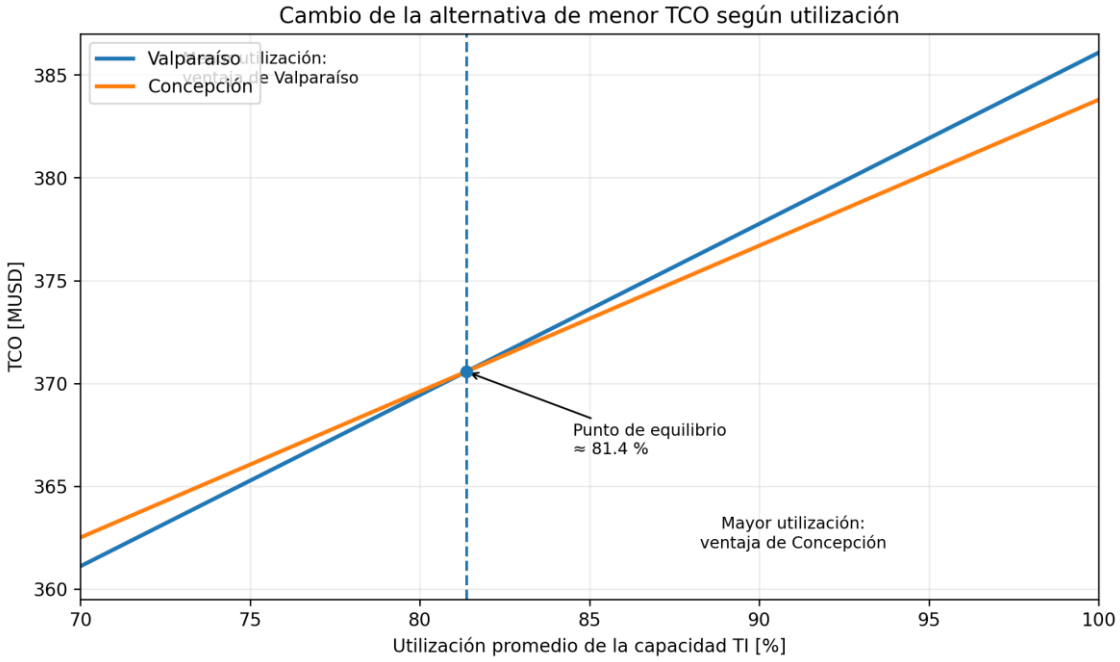
Fuente: elaboración propia.

La tabla aplica la misma variación porcentual a la conexión de cada emplazamiento y permite comparar la sensibilidad territorial. Antofagasta presenta el mayor cambio absoluto porque su conexión base es 39,70 MUSD. Aun con una reducción de 30 %, su TCO permanece por encima de las alternativas Centro-Sur, lo que confirma que la brecha no puede cerrarse mediante una sola partida.

En la comparación Centro-Sur debe utilizarse el punto de quiebre específico. Concepción parte con una conexión de 16,50 MUSD y pierde su ventaja cuando esta alcanza aproximadamente 18,79 MUSD. El aumento requerido es de 13,9 %, magnitud suficientemente moderada como para justificar estudios detallados de refuerzos, servidumbres y plazos antes de decidir.

9.2.3 PUE, utilización y flexibilidad

Figura 9.2. Cambio de la alternativa de menor TCO según el nivel de utilización.



Fuente: elaboración propia.

El gráfico concentra la comparación en Valparaíso y Concepción, donde existe un cruce económico. A baja utilización, el menor CAPEX de Valparaíso domina; a mayor utilización, el menor costo operativo de Concepción compensa su mayor inversión. El umbral cercano a 81 % corresponde exclusivamente al caso tipo evaluado y debe recalcularse para otros tamaños, contratos o curvas de ocupación.

$$ETI = 25 \times 8.760 \times FU \tag{66}$$

Tabla 9.4. TCO según factor de utilización [MUSD]

Utilización	Antofagasta	Valparaíso	Concepción	Menor TCO
80 %	409,54	369,43	369,60	Valparaíso
85 %	414,04	373,60	373,15	Concepción
90 %	418,54	377,76	376,70	Concepción
100 %	427,54	386,08	383,79	Concepción

Fuente: elaboración propia.

La tabla supone que la capacidad instalada se mantiene y que solo cambia la fracción media de carga TI ocupada. Por esa razón, el CAPEX permanece fijo mientras disminuyen la energía y

la transmisión. A 80 % de utilización, Valparaíso pasa al primer lugar porque su menor inversión inicial pesa más que el ahorro operativo de Concepción.

El cruce cercano a 81 % tiene una interpretación comercial directa. Un proyecto con ocupación gradual, contratos aún no consolidados o expansión por etapas favorece a Valparaíso. En cambio, una instalación con alta ocupación desde los primeros años favorece a Concepción. Este resultado vincula la localización con la estrategia de comercialización y no solo con el desempeño técnico.

La contrastación con registros climáticos horarios entregó valores de PUE ligeramente inferiores a los del caso base. La comparación entre Centro y Sur permanece estrecha, mientras la utilización, el contrato de energía y el costo de conexión concentran la mayor incidencia sobre el ordenamiento económico. La flexibilidad se mantiene como un atributo complementario dentro de la evaluación.

9.3 Puntos de quiebre

Tabla 9.5. Puntos de quiebre Centro-Sur

Variable	Base	Equilibrio	Cambio	Resultado
PBE Concepción	23,48 USD/MWh	24,55 USD/MWh	+4,6 %	Valparaíso pasa al primer lugar.
PBE Valparaíso	28,39 USD/MWh	27,33 USD/MWh	-3,7 %	Valparaíso iguala a Concepción.
Conexión Concepción	16,50 MUSD	18,79 MUSD	+13,9 %	Valparaíso pasa al primer lugar.
PUE Concepción	1,147	1,184	+0,037	Valparaíso pasa al primer lugar.
Utilización	100 %	81,4 %	-18,6 puntos	Bajo el umbral, Valparaíso pasa al primer lugar.
Tasa real	10,0 %	13,2 %	+3,2 puntos	Sobre el umbral, Valparaíso pasa al primer lugar.

Fuente: elaboración propia.

Cada fila indica el valor que una variable debe alcanzar para que Concepción y Valparaíso tengan el mismo TCO. El cambio requerido se mide respecto del caso base. Una vez superado el umbral, la alternativa indicada en la última columna pasa a ser económicamente preferente.

Los umbrales son estrechos: 4,6 % en el PBE de Concepción, 13,9 % en su conexión, 0,037 puntos de PUE o una utilización inferior a aproximadamente 81 %. En consecuencia, el menor TCO de Concepción debe interpretarse como una ventaja condicionada y no como una superioridad estructural. Ambos sitios deben permanecer en la lista corta hasta obtener información contractual y predial.

Tabla 9.6. Condiciones de equilibrio de Antofagasta

Condición	Resultado requerido	Evaluación
PBE para igualar Valparaíso	13,14 USD/MWh	Poco plausible como cambio aislado.
CAPEX total para igualar Valparaíso	296,14 MUSD	Exige reducir varias partidas.
PUE para igualar Valparaíso	0,634	Inferior a 1,0; no alcanzable.
PBE con infraestructura al nivel de Valparaíso	27,46 USD/MWh	Escenario combinado potencialmente alcanzable.
PBE para igualar Concepción con infraestructura favorable	26,42 USD/MWh	Condición más exigente.

Fuente: elaboración propia.

La tabla evalúa cuánto debería mejorar Antofagasta para igualar a Valparaíso o Concepción. Los primeros tres resultados muestran que una sola mejora no es suficiente: el PBE tendría que caer a un nivel muy exigente, el CAPEX tendría que reducirse en varias partidas y el PUE requerido sería inferior a 1,0, lo que no es físicamente posible.

El escenario combinado es más informativo. Cuando conexión y fibra se aproximan a los valores de Valparaíso, el PBE necesario se sitúa cerca de 27,5 USD/MWh. Esto no convierte al Norte en la opción general, pero identifica una condición plausible para proyectos con infraestructura existente, demanda ancla minera o industrial y valor por proximidad.

9.4 Escenarios integrados

Tabla 9.7. Resultados de escenarios integrados [MUSD]

Escenario	Antofagasta	Valparaíso	Concepción	Menor TCO
Base	427,61	386,15	383,86	Concepción
Infraestructura disponible	396,21	386,15	377,96	Concepción

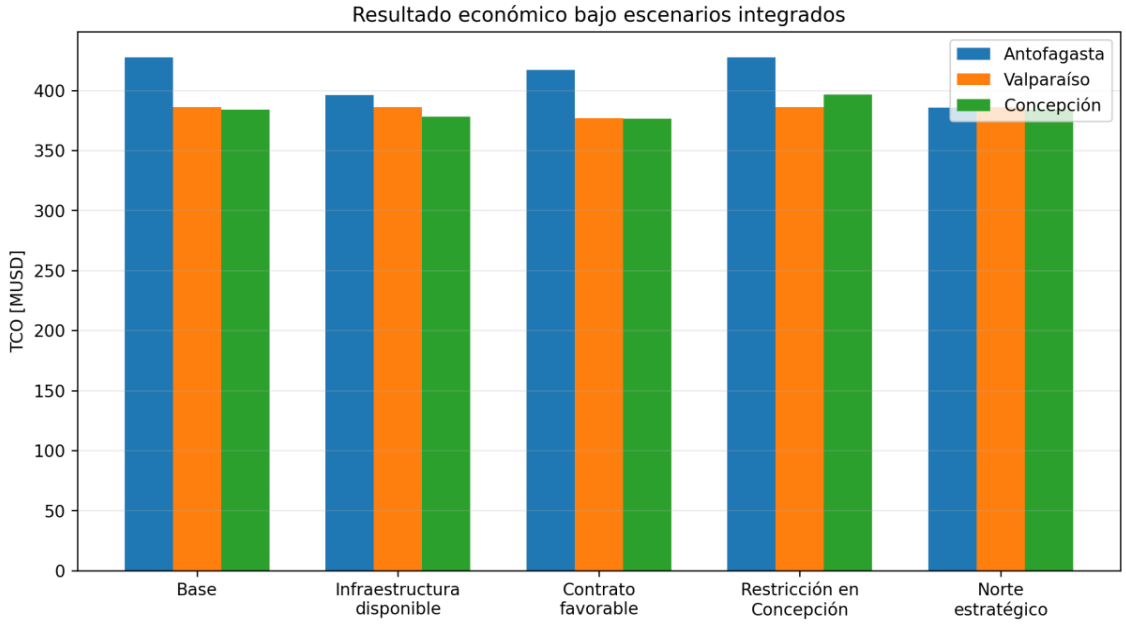
Escenario	Antofagasta	Valparaíso	Concepción	Menor TCO
Contrato favorable	417,07	376,99	376,33	Concepción
Restricción en Concepción	427,61	386,15	396,54	Valparaíso
Restricción en Valparaíso	427,61	395,52	383,86	Concepción
Norte estratégico	385,67	386,15	383,86	Concepción
Estrés de precio Sur	427,61	386,15	388,88	Valparaíso

Fuente: elaboración propia.

Los escenarios integrados deben leerse como configuraciones coherentes y no como sensibilidades aisladas. El escenario base confirma la ventaja inicial de Concepción. El escenario de infraestructura disponible reduce costos externos, mientras que el contrato favorable disminuye el componente energético. Las restricciones específicas muestran qué ocurre cuando un emplazamiento concentra sobrecostos de conexión, fibra y logística.

La principal lectura es que el ranking Centro-Sur cambia cuando la restricción se concentra en uno de los sitios. El escenario Norte estratégico reduce de forma importante la brecha de Antofagasta, aunque no la elimina. Por tanto, la competitividad del Norte depende de una combinación de infraestructura, contrato y demanda regional específica.

Figura 9.3. Resultado económico bajo escenarios integrados.



Fuente: elaboración propia.

La comparación muestra que Concepción mantiene la ventaja en el caso base, mientras Valparaíso pasa al primer lugar cuando el deterioro se concentra en la conexión y las condiciones territoriales del Sur. Antofagasta reduce su brecha en el escenario estratégico, pero requiere simultáneamente infraestructura habilitante y un mejor contrato de energía.

La figura facilita la comparación visual de los escenarios. Las barras de Concepción y Valparaíso permanecen próximas, lo que confirma la fragilidad del orden entre ambas. Antofagasta parte desde un nivel superior, pero su barra se aproxima cuando se combinan infraestructura favorable y menor precio de energía.

La figura no debe interpretarse como una probabilidad de ocurrencia. Su utilidad es mostrar la dirección y magnitud del cambio cuando varias condiciones se presentan simultáneamente.

9.5 Sensibilidad ambiental

Tabla 9.8. Sensibilidad del WUE al factor de embalse [L/kWh-IT]

Factor	Antofagasta	Valparaíso	Concepción
0	0,419	0,479	0,487
5	0,419	0,796	1,060

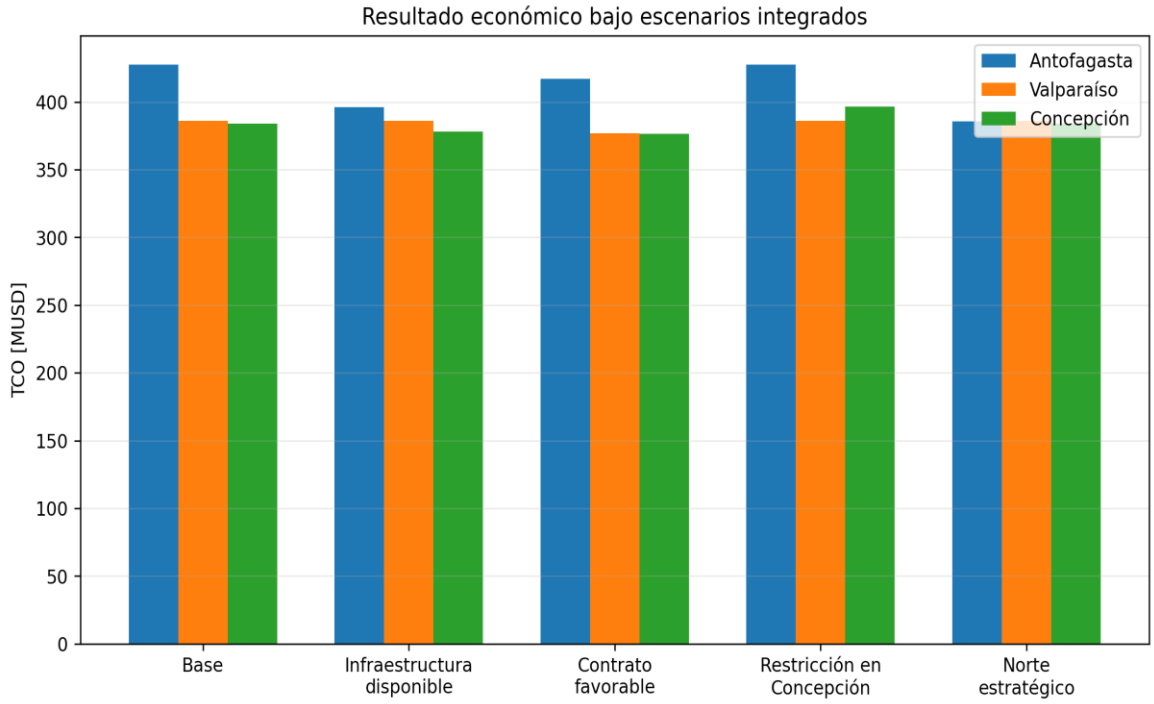
Factor	Antofagasta	Valparaíso	Concepción
10	0,419	1,114	1,634
15	0,419	1,431	2,207

Fuente: elaboración propia.

La primera columna representa el factor hídrico atribuido a la evaporación de embalses. Al aumentar ese factor, crece el WUE indirecto de las macrozonas con mayor participación hidroeléctrica. Antofagasta permanece prácticamente estable porque el escenario adoptado no le asigna generación de embalse.

La tabla demuestra que la posición hídrica de Valparaíso y Concepción depende de una decisión metodológica de atribución. Por ello, el WUE indirecto sirve para explorar la huella de la cadena eléctrica, pero no reemplaza el balance físico del predio ni permite concluir por sí solo que un sitio dispone de más agua.

Figura 9.4. Sensibilidad de la huella hídrica indirecta.



Fuente: elaboración propia.

La pendiente de cada línea muestra cuánto cambia la huella indirecta frente al factor de embalse. La línea de Antofagasta permanece casi horizontal; las de Valparaíso y Concepción aumentan, especialmente la del Sur. La separación entre líneas debe interpretarse como

sensibilidad ambiental del suministro eléctrico y no como consumo directo del sistema de refrigeración.

9.6 Recomendación de localización por emplazamiento

Tabla 9.9. Recomendación comparativa final

Emplazamiento	Recomendación	Condiciones mínimas	Riesgo
Concepción	Primera opción económica condicionada.	Conexión ≤ 18,79 MUSD, PBE ≤ 24,55 USD/MWh, utilización > 81 % y fibra confirmada.	Sobrecosto o retraso de conexión.
Valparaíso	Alternativa equivalente y robusta.	Menor CAPEX, conexión y carriers disponibles, mayor OPEX aceptable.	Costo energético acumulado.
Antofagasta	Alternativa estratégica de nicho.	Infraestructura externa, PBE cercano a 27,5 USD/MWh y demanda ancla.	Mayor TCO y conexión.

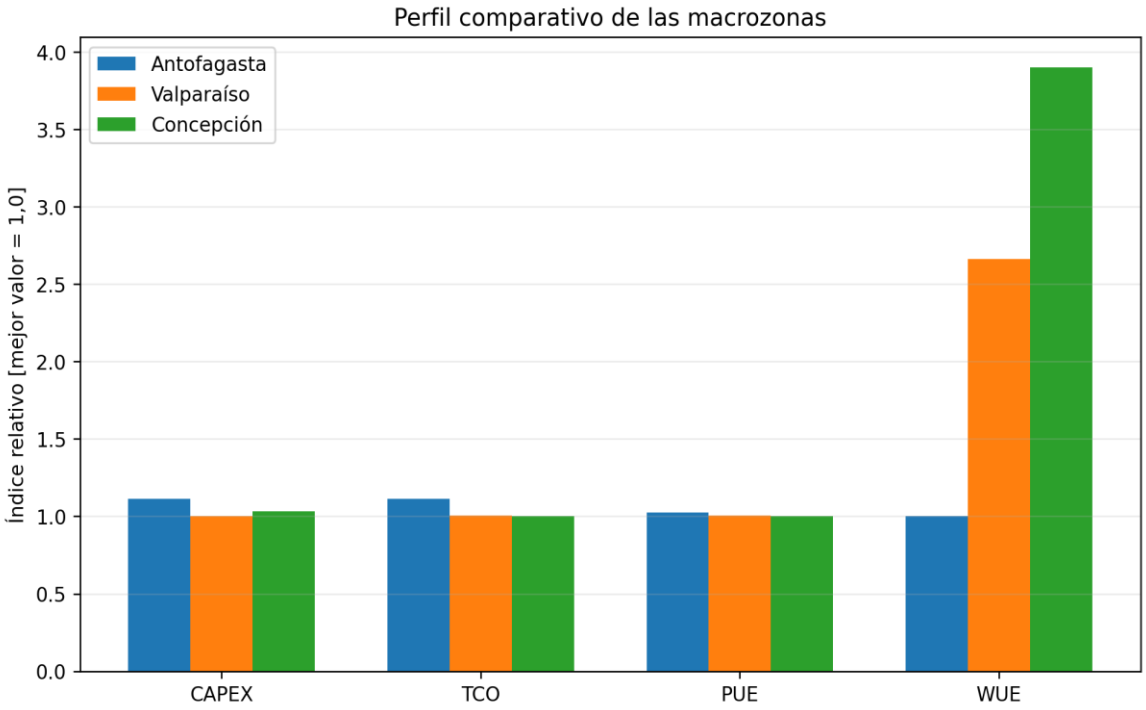
Fuente: elaboración propia.

La tabla sintetiza la recomendación condicionada. Concepción no se define como ganadora absoluta, sino como primera opción cuando se mantienen los umbrales de conexión, energía y utilización. Valparaíso se clasifica como alternativa equivalente porque su menor CAPEX le entrega robustez frente a ocupación gradual y mayor costo de capital.

Antofagasta se presenta como alternativa estratégica de nicho. Su selección requiere justificar el mayor TCO mediante demanda regional, infraestructura disponible, menor latencia o compatibilidad con edge minero y procesos batch. La columna de riesgo dominante indica el antecedente que debe verificarse primero en cada macrozona.

9.7 Jerarquía de decisión

Figura 9.5. Jerarquía propuesta para la selección del emplazamiento.



Fuente: elaboración propia.

La figura ordena la decisión desde los requisitos no compensables hacia los atributos adicionales. Un sitio sin potencia firme, plazo compatible o conectividad redundante debe descartarse antes de calcular un puntaje económico. Solo los sitios técnicamente habilitados avanzan a la comparación de TCO, ambiente y expansión.

Esta jerarquía evita que una buena puntuación en costo compense una falla crítica de continuidad. La flexibilidad aparece al final porque agrega valor, pero no sustituye energía, fibra, permisos ni viabilidad territorial.

Tabla 9.10. Jerarquía definitiva de selección

Prioridad	Criterio	Decisión	Evidencia
1	Capacidad eléctrica y plazo	Descartar sitios sin potencia firme o fecha compatible.	Estudio de conexión.
2	Conectividad digital	Descartar sitios sin rutas independientes.	Ofertas y trazados.

Prioridad	Criterio	Decisión	Evidencia
3	Compatibilidad territorial y ambiental	Verificar uso de suelo, agua y riesgos.	CIP, permisos y estudios.
4	TCO específico	Comparar alternativas viables.	Presupuesto y contrato eléctrico.
5	Escalabilidad y servicio	Confirmar expansión y demanda.	Plan maestro.
6	Flexibilidad	Agregar valor sin comprometer continuidad.	Telemetría y contratos.

Fuente: elaboración propia.

La tabla transforma la figura en una secuencia verificable. Las prioridades 1 a 3 corresponden a filtros habilitantes; la prioridad 4 compara el TCO de los sitios que superaron esos filtros; y las prioridades 5 y 6 diferencian alternativas ya viables mediante escalabilidad, perfil de servicio y flexibilidad.

La evidencia indicada en la última columna debe existir antes de avanzar. Por ejemplo, la capacidad eléctrica requiere un estudio u oferta y no una estimación por proximidad. La conectividad requiere trazados físicos y no solo la identificación de carriers presentes en la región.

9.8 Guía detallada para la localización de data centers en Chile

La guía de localización constituye el resultado aplicado principal de la tesina. Su función es traducir los resultados de PUE, WUE, CAPEX, TCO, flexibilidad y sensibilidad en un procedimiento que pueda utilizarse para comparar predios concretos. La guía no reemplaza la ingeniería de detalle ni los permisos, pero determina qué antecedentes deben obtenerse, en qué orden deben revisarse y qué condiciones justifican mantener o descartar una alternativa.

La aplicación debe comenzar con una arquitectura común. De lo contrario, una diferencia de costo podría provenir de cambios de potencia, Tier, refrigeración o autonomía y no de la localización. Una vez fijado el proyecto, la decisión se organiza en tres niveles: condiciones habilitantes, comparación técnico-económica y validación estratégica del uso previsto.

9.8.1 Definición del proyecto y antecedentes mínimos

La primera etapa fija el proyecto de referencia que será replicado en todos los sitios. Deben quedar definidos la potencia TI, la potencia total del facility, la curva de utilización, la densidad por rack, la arquitectura térmica, el nivel de redundancia, la autonomía, la superficie inicial y la expansión. Estos parámetros condicionan la conexión, el consumo, el espacio, los permisos y la disponibilidad de flexibilidad.

La ficha debe incluir también el perfil de servicio digital. Un data center orientado a cloud y colocation no enfrenta exactamente las mismas exigencias que uno destinado a HPC, inferencia de inteligencia artificial, edge industrial o procesamiento batch. Esta definición es necesaria para evaluar latencia, densidad, control de workloads y proximidad al usuario.

Tabla 9.11. Antecedentes mínimos del proyecto y del sitio

Dimensión	Antecedente requerido	Uso en la decisión
Arquitectura	Potencia TI y facility, Tier, densidad, refrigeración y respaldo.	Mantener una base comparable entre predios.
Demanda	Curva de ocupación, perfil horario y expansión.	Estimar energía, utilización y fases de inversión.
Electricidad	Capacidad firme, tensión, obras, redundancia y plazo.	Verificar factibilidad técnica y costo de conexión.
Conectividad	Carriers, rutas físicas, capacidad y latencia.	Validar continuidad y compatibilidad con el servicio.
Territorio	CIP, uso de suelo, accesos, servidumbres y riesgos.	Confirmar constructibilidad y permisos.
Agua y ambiente	Fuente, balance, descargas, ruido, emisiones y residuos.	Determinar viabilidad ambiental y operacional.
Economía	CAPEX, PBE o contrato, transmisión, OPEX, TCO y tasa.	Comparar alternativas sobre la misma base.
Estrategia	Cliente objetivo, demanda ancla y tipo de workload.	Vincular la localización con el servicio digital.

Fuente: elaboración propia.

9.8.2 Filtros habilitantes y descarte temprano

La segunda etapa es eliminatoria. Un sitio no debe mantenerse en la comparación económica si no demuestra capacidad eléctrica, conectividad redundante, compatibilidad territorial y una solución viable de agua y descargas. El resultado condicionado solo es aceptable

cuando la obra, permiso o contrato pendiente está identificado, tiene responsable, costo y plazo.

La potencia disponible debe evaluarse junto con la fecha de energización. Una conexión técnicamente posible pero incompatible con el cronograma comercial puede ser equivalente a una conexión no disponible. La fibra también debe analizarse por diversidad física, no solo por número de proveedores: dos carriers que utilizan el mismo trazado no eliminan el punto único de falla.

Tabla 9.12. Matriz de descarte temprano

Condición	Cumple	Condicionado	No cumple
Potencia y energización	Capacidad y fecha formalmente confirmadas.	Refuerzo definido con costo y plazo compatibles.	Sin capacidad o fecha compatible.
Redundancia eléctrica	Topología compatible con Tier y expansión.	Segunda alimentación sujeta a obra identificada.	Punto único de falla no mitigable.
Fibra	Dos rutas físicas independientes y carriers alternativos.	Segunda ruta comprometida y calendarizada.	Una sola ruta sin solución verificable.
Uso de suelo	Proyecto y obras auxiliares admisibles.	Ajuste de diseño o autorización pendiente.	Incompatibilidad normativa.
Agua y descarga	Fuente, caudal y destino demostrados.	Factibilidad en tramitación con solución técnica.	Sin fuente o descarga viable.
Riesgos y accesos	Riesgos mitigables y accesos suficientes.	Obras de mitigación definidas.	Riesgo o acceso incompatible.
Expansión	Reserva predial, eléctrica y digital disponible.	Expansión limitada pero factible.	Sin capacidad de crecimiento.

Fuente: elaboración propia.

9.8.3 Evaluación técnica, económica y temporal del sitio

Los sitios que superan los filtros habilitantes deben evaluarse con antecedentes específicos. En electricidad, la distancia a una subestación es solo una referencia inicial; la evaluación debe incluir capacidad real, refuerzos, líneas, transformación, servidumbres, cruces, calidad y expansión. El costo debe construirse por partidas y asociarse a un cronograma.

En conectividad digital deben revisarse rutas, carriers, latencia, capacidad y puntos de entrada al edificio. Para servicios de baja latencia o edge, la proximidad al usuario puede justificar un costo mayor. Para cargas batch o entrenamiento de modelos, la latencia puede ser menos restrictiva y el precio de energía adquiere mayor importancia.

La evaluación económica debe reemplazar progresivamente los parámetros de referencia por ofertas reales. El PBE utilizado en el modelo es una señal prospectiva; en factibilidad debe sustituirse por un PPA u oferta de suministro con precio, indexación, perfil horario, garantías, transmisión y riesgos. La curva de utilización también debe modelarse por fases, porque una entrada gradual favorece a alternativas con menor CAPEX.

El plazo debe mantenerse como criterio independiente. Esta tesina no monetiza el retraso por falta de un modelo detallado de ingresos, pero un sitio con menor TCO puede ser descartado si su energización, fibra o permisos no están disponibles dentro de la fecha comercial. La guía exige, por tanto, un cronograma integrado de conexión, permisos, construcción, fibra, agua y ocupación.

9.8.4 Umbrales de referencia derivados del caso de estudio

Los valores siguientes son umbrales internos del caso de estudio y no reglas regulatorias ni límites universales. Su función es mostrar cuánto puede variar una condición antes de modificar la comparación económica. Deben emplearse como señales para profundizar la información del sitio, no como criterios automáticos de descarte o selección.

Tabla 9.13. Reglas cuantitativas de decisión

Condición observada	Interpretación del resultado	Uso recomendado
Utilización de Concepción superior a aproximadamente 81 %	El ahorro operativo acumulado compensa el mayor CAPEX frente a Valparaíso.	Mantener a Concepción como alternativa de menor TCO, sujeto a validar conexión y contrato.
Utilización inferior a aproximadamente 81 %	El menor CAPEX de Valparaíso adquiere mayor peso.	Recalcular el TCO con la curva real de ocupación antes de seleccionar.
Conexión de Concepción cercana o superior a 18,79 MUSD	La ventaja base de 2,29 MUSD frente a Valparaíso se reduce o desaparece.	Solicitar presupuesto y plazo de conexión antes de cerrar la decisión.
PBE de Concepción cercano o superior a 24,55 USD/MWh	El costo operativo se aproxima al de Valparaíso.	Comparar ofertas contractuales, indexadores y perfil horario.
Antofagasta con conexión y fibra	La brecha económica disminuye,	Evaluar demanda ancla, latencia,

Condición observada	Interpretación del resultado	Uso recomendado
comparables a Valparaíso y PBE cercano a 27,5 USD/MWh	pero la conveniencia sigue dependiendo del valor regional del proyecto.	continuidad, infraestructura y contrato en conjunto.
Mayor valorización de flexibilidad	La reducción del TCO sigue siendo marginal frente a la inversión total.	Tratar la flexibilidad como atributo complementario.
Menor WUE indirecto sin fuente local confirmada	El indicador no demuestra disponibilidad física ni jurídica de agua.	Mantener separadas la evaluación hídrica predial y la huella indirecta.

Fuente: elaboración propia.

9.8.5 Compatibilidad estratégica por macrozona

La guía no asigna de forma rígida un tipo de workload a cada macrozona. Sin embargo, los resultados técnicos y económicos permiten identificar compatibilidades potenciales que deben contrastarse con demanda, latencia, infraestructura y contratos.

Tabla 9.14. Compatibilidad estratégica potencial por macrozona

Macrozona	Fortaleza principal	Aplicaciones potencialmente compatibles	Condiciones críticas
Norte - Antofagasta	Proximidad a minería, infraestructura industrial y menor WUE indirecto del escenario.	Edge computing minero, analítica operacional, visión computacional, gemelos digitales, mantenimiento predictivo y procesos batch flexibles.	Demanda ancla, conexión y fibra disponibles, contrato energético favorable y justificación por latencia o proximidad.
Centro - Valparaíso	Menor CAPEX, acceso a clientes y conectividad hacia el mercado central.	Cloud, colocation, servicios empresariales, recuperación ante desastres y expansión gradual.	Rutas redundantes, oferta de conexión competitiva y aceptación del mayor OPEX acumulado.
Sur - Concepción	Menor TCO base, menor PUE y menor costo energético del escenario.	IA, HPC, inferencia, entrenamiento, procesamiento continuo y cargas de alta utilización.	Utilización elevada, conexión dentro de umbral, fibra suficiente y plazo de energización confirmado.

Fuente: elaboración propia.

En la macrozona Norte, el valor estratégico no proviene de superar el TCO de propósito general, sino de acercar el procesamiento a faenas y sistemas industriales. Las aplicaciones edge pueden reducir dependencia de enlaces de larga distancia, mejorar tiempos de respuesta y

mantener funciones críticas ante degradación de comunicaciones. Los procesos batch, por su parte, pueden programarse en ventanas de menor precio o mayor disponibilidad renovable, siempre que exista control sobre el workload.

Valparaíso ofrece una posición equilibrada para cloud y colocation porque combina menor CAPEX con acceso al mercado central y potencial conectividad nacional e internacional. Su ventaja aumenta durante fases de ocupación gradual, cuando el ahorro operativo de Concepción aún no compensa la diferencia de inversión.

Concepción presenta mayor coherencia con cargas de alta utilización y densidad, debido a su menor PUE y costo energético. Esta compatibilidad es especialmente relevante para IA y HPC, pero requiere validar capacidad eléctrica, rutas de fibra y demanda. La recomendación no implica que esas cargas deban localizarse necesariamente en el Sur, sino que el perfil económico del caso favorece operaciones intensivas y continuas.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES

La tesina evaluó un data center colocation de 30 MW en tres emplazamientos representativos de las macrozonas Norte, Centro y Sur de Chile. La arquitectura técnica se mantuvo constante para aislar el efecto de la localización sobre eficiencia, agua, inversión, energía, transmisión y costo total. Además, se cuantificó un portafolio de flexibilidad operacional como aporte complementario.

El resultado general muestra que no existe una macrozona que domine simultáneamente en todas las variables. Concepción obtiene el menor TCO y PUE; Valparaíso registra el menor CAPEX y una posición económica cercana; Antofagasta presenta la menor huella hídrica indirecta del escenario y una posible especialización vinculada a minería e industria. La selección debe formularse como una recomendación condicionada al tipo de carga, infraestructura y contrato.

10.1 Resultado económico y robustez de la comparación

El TCO base alcanza 383,86 MUSD en Concepción, 386,15 MUSD en Valparaíso y 427,61 MUSD en Antofagasta. La diferencia entre Concepción y Valparaíso es de 2,29 MUSD, equivalente a 0,6 %, mientras que Antofagasta se ubica 43,75 MUSD por sobre el mínimo.

La cercanía entre Concepción y Valparaíso es metodológicamente relevante. La diferencia es menor que la incertidumbre habitual de una evaluación conceptual, por lo que no corresponde declarar una superioridad absoluta del Sur. Los puntos de quiebre muestran que modificaciones moderadas en precio de energía, conexión, utilización o tasa pueden cambiar el orden.

Concepción mantiene la ventaja cuando la utilización supera aproximadamente 81 %, su conexión no excede 18,79 MUSD y el PBE permanece bajo 24,55 USD/MWh. Valparaíso mejora cuando el proyecto entra en operación gradualmente, cuando aumenta el costo de capital o cuando la conexión del Sur se deteriora.

10.2 Conclusiones técnicas

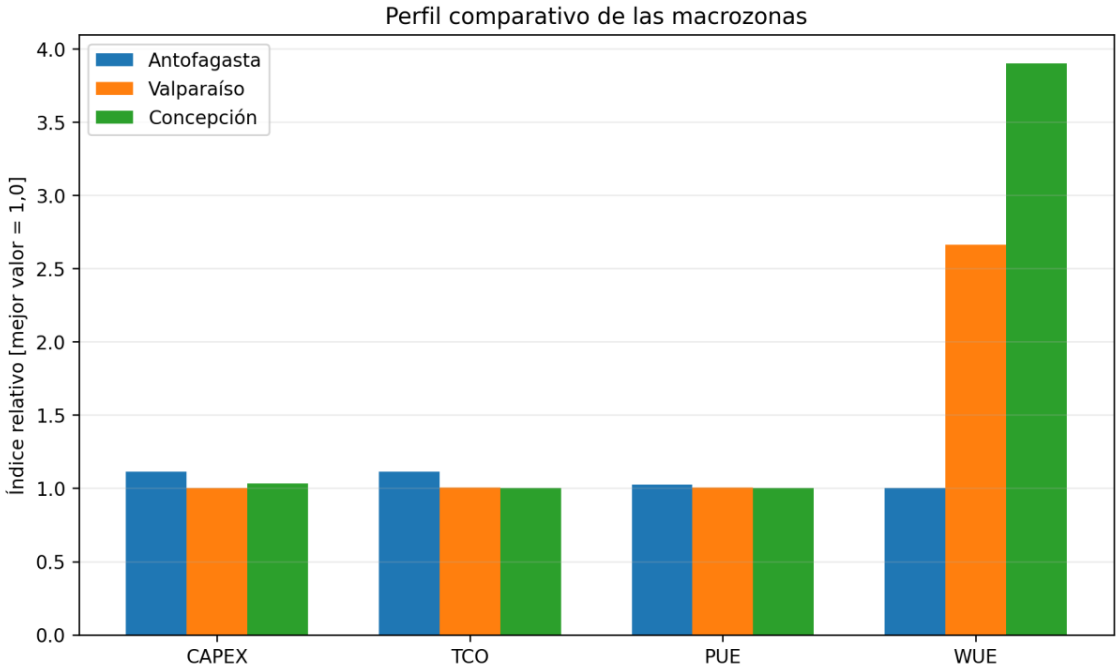
Los PUE anuales del escenario base son 1,176 para Antofagasta, 1,154 para Valparaíso y 1,147 para Concepción. La contrastación con registros climáticos horarios entrega valores de 1,166, 1,148 y 1,144, respectivamente. La diferencia climática entre los emplazamientos es moderada debido a la arquitectura D2C híbrida, por lo que su efecto se integra con las condiciones eléctricas, económicas y territoriales de cada sitio.

El consumo anual del facility alcanza aproximadamente 257,54 GWh en Antofagasta, 252,73 GWh en Valparaíso y 251,19 GWh en Concepción. La diferencia entre Norte y Sur es relevante en energía acumulada, pero menor que la incidencia del CAPEX de conexión y del precio contractual.

El WUE del escenario es menor en Antofagasta y mayor en Concepción. Sin embargo, el indicador indirecto depende del mix eléctrico y de la atribución de evaporación de embalses. Por ello, no debe confundirse con consumo físico en el sitio. La disponibilidad local de agua, purgas y descargas deben evaluarse de forma independiente.

10.3 Conclusiones por macrozona

Figura 10.1. Perfil comparativo de las macrozonas.



Fuente: elaboración propia.

La comparación normalizada confirma que ninguna macrozona domina simultáneamente todas las dimensiones. Valparaíso presenta el menor CAPEX; Concepción, el menor TCO y PUE; y Antofagasta, el menor WUE indirecto del escenario. La localización debe vincularse con la prioridad del proyecto y con la factibilidad específica del sitio.

10.3.1 Macrozona Norte: Antofagasta

Antofagasta presenta el mayor TCO del caso base. La principal penalización proviene del CAPEX de conexión y del mayor costo energético. En consecuencia, no se recomienda como emplazamiento genérico para un data center de propósito general que compita únicamente por costo.

Esta conclusión económica no elimina su valor estratégico. La macrozona concentra actividad minera, plantas industriales, sistemas autónomos, sensores, video, control avanzado y necesidades de procesamiento local. Un data center regional puede operar como plataforma de edge computing para reducir latencia, mantener funciones críticas y disminuir la dependencia de enlaces hacia la zona central.

Las aplicaciones potenciales incluyen analítica operacional, mantenimiento predictivo, visión computacional, gemelos digitales, integración de sistemas de control y almacenamiento temporal de información de faenas. También existe compatibilidad con procesos batch que puedan programarse en ventanas definidas, especialmente cuando el usuario controla el workload y el contrato eléctrico permite capturar variaciones horarias.

Para que esta estrategia sea económicamente defendible se requieren tres condiciones: demanda ancla regional, infraestructura eléctrica y digital existente o de bajo costo, y un contrato energético favorable. Bajo conexión y fibra comparables a Valparaíso, un PBE cercano a 27,5 USD/MWh aproxima Antofagasta al rango competitivo. La recomendación es, por tanto, de nicho industrial y minero, no de aplicación general.

10.3.2 Macrozona Centro: Valparaíso

Valparaíso presenta el menor CAPEX, con 302,90 MUSD, y un TCO solo 0,6 % superior al de Concepción. Esta combinación le entrega una posición robusta frente a incertidumbre de demanda, aumento de tasa y ocupación gradual.

La macrozona Centro es potencialmente compatible con cloud, colocation y servicios empresariales que valoren conectividad, cercanía a clientes, acceso a carriers y menor exposición de inversión inicial. La menor inversión permite modular el crecimiento y reduce el costo hundido durante los primeros años de ocupación.

Su principal desventaja es el mayor costo operativo acumulado respecto de Concepción. Por ello, su competitividad depende de mantener una oferta de conexión favorable y de capturar ventajas de mercado o conectividad que no se monetizaron completamente en el TCO.

La recomendación es mantener Valparaíso en la misma lista corta que Concepción. En proyectos con entrada gradual, alta valoración de conectividad o incertidumbre de demanda, puede ser la alternativa preferente.

10.3.3 Macrozona Sur: Concepción

Concepción obtiene el menor TCO, el menor PUE y el menor costo de energía del escenario. Su posición mejora a medida que aumenta la utilización, porque el ahorro operativo acumulado compensa el mayor CAPEX frente a Valparaíso.

Este perfil es compatible con cargas intensivas y continuas, como HPC, inferencia, entrenamiento de modelos de inteligencia artificial y procesamiento científico o industrial. Estas aplicaciones suelen elevar densidad por rack y consumo sostenido, por lo que el menor PUE y precio energético adquieren mayor relevancia.

La recomendación está condicionada a confirmar conexión, fibra y plazo. La ventaja desaparece si la conexión supera 18,79 MUSD, si el PBE aumenta sobre 24,55 USD/MWh o si la utilización cae por debajo de aproximadamente 81 %. Concepción es la primera opción económica del caso base, pero no una ganadora incondicional.

Tabla 10.1. Síntesis estratégica por macrozona

Macrozona	Fortaleza principal	Perfil potencial	Restricción dominante	Recomendación
Norte	Proximidad a minería, infraestructura industrial y menor WUE indirecto.	Edge minero, analítica industrial, gemelos digitales y batch flexible.	Mayor TCO, conexión y necesidad de demanda ancla.	Alternativa estratégica de nicho.
Centro	Menor CAPEX, proximidad a mercado y conectividad.	Cloud, colocation, servicios empresariales y expansión gradual.	Mayor costo operativo acumulado.	Alternativa equivalente y robusta.
Sur	Menor TCO, PUE y costo energético.	IA, HPC y cargas continuas de alta utilización.	Conexión, fibra y plazo de energización.	Primera opción económica condicionada.

Fuente: elaboración propia.

10.4 Conclusiones sobre flexibilidad

La flexibilidad técnicamente disponible proviene de UPS, workloads diferibles y almacenamiento térmico. El UPS entrega una capacidad acotada por la reserva de continuidad; las cargas diferibles dependen del modelo contractual y del control sobre el workload; el TES permite reducir temporalmente la demanda de refrigeración.

La valorización económica del caso base es pequeña frente al TCO. La flexibilidad se presenta como un aporte complementario que permite caracterizar al data center como una demanda parcialmente gestionable y considerar opciones futuras de participación en servicios, agregación o contratos bilaterales.

Un BESS dedicado podría aumentar potencia y duración, pero requiere incorporar CAPEX, degradación, reposición, eficiencia y financiamiento. No corresponde descontar sus ingresos sin una evaluación de inversión completa.

10.5 Limitaciones

El modelo cumple su objetivo académico de comparar las tres macrozonas bajo una arquitectura común y supuestos transparentes. Su alcance es de prefactibilidad: identifica diferencias, variables críticas y puntos de quiebre, pero no reemplaza la evaluación de un predio específico.

Las principales limitaciones corresponden al uso de costos paramétricos de conexión, un PBE prospectivo en lugar de una oferta contractual y perfiles climáticos representativos. Los perfiles se contrastaron con registros horarios de años pasados. La precisión del análisis depende de la información disponible para cada predio, especialmente en conexión eléctrica, contratos de suministro, rutas de fibra, disponibilidad de agua, permisos y plazos de construcción.

El estudio tampoco monetiza el retraso de entrada en operación ni estima demanda comercial por tipo de workload. Por ello, las compatibilidades regionales deben validarse con antecedentes de mercado, latencia, infraestructura y contratos.

10.6 Recomendaciones para factibilidad

La recomendación prioritaria es desarrollar una fase de factibilidad sobre una lista corta de predios en Concepción y Valparaíso. Para cada sitio deben solicitarse estudios formales de conexión, presupuesto de obras, fecha de energización, ofertas de suministro, rutas de fibra físicamente independientes, antecedentes territoriales y solución hídrica. La decisión de inversión debe adoptarse solo después de actualizar el modelo con esa información.

El TCO debe recalcularse con una curva de ocupación por fases, precios contractuales, indexación, cronograma de energización y contingencias diferenciadas para las partidas territoriales. También se recomienda incorporar el costo económico del retraso, porque un sitio

con menor TCO puede dejar de ser preferente si su conexión o permisos desplazan la entrada en operación.

Para la macrozona Norte se recomienda estructurar un caso específico de edge minero y procesamiento industrial, en lugar de replicar el caso general. El análisis debe identificar una demanda ancla, requerimientos de latencia y continuidad, proporción de cargas batch, infraestructura existente y precio contractual alcanzable. Esto permitirá cuantificar el valor estratégico que el TCO general no captura completamente.

En el ámbito técnico, se recomienda ampliar la validación horaria del PUE a más años y estaciones, incorporar el comportamiento a carga parcial y profundizar la interacción entre refrigeración D2C, almacenamiento térmico y clima. El balance hídrico debe separar consumo directo, disponibilidad local, tratamiento, descarga y huella indirecta de la electricidad.

La flexibilidad debe mantenerse como línea complementaria. El UPS debe reservarse primero para continuidad; las cargas diferibles requieren acuerdos con clientes; y cualquier BESS dedicado debe incorporar CAPEX, degradación, reposición y remuneración esperada antes de atribuirle valor económico.

10.7 Cierre

El estudio demuestra que la localización óptima de un data center no depende de una única ventaja regional. El clima modifica el PUE, pero la arquitectura térmica reduce esa diferencia; el precio de energía afecta el OPEX, pero debe capturarse mediante contratos; y la proximidad a infraestructura solo genera valor cuando existe capacidad, redundancia y plazo de conexión.

Para el caso de propósito general, Concepción y Valparaíso conforman la lista corta. Concepción presenta la mejor posición a alta utilización por su menor TCO, PUE y costo energético; Valparaíso ofrece menor CAPEX y mayor robustez frente a ocupación gradual, tasa de descuento y riesgo de conexión. La diferencia entre ambas es suficientemente pequeña para que la decisión final dependa del predio y del contrato, no solo de la macrozona.

Antofagasta no lidera el TCO general, pero conserva una función estratégica diferente. Su proximidad a minería y procesos industriales permite justificar edge computing, analítica operacional, gemelos digitales, visión computacional y cargas batch flexibles cuando existe

demanda ancla e infraestructura habilitante. En ese contexto, la localización se explica también por continuidad, latencia y valor para el proceso productivo.

En síntesis, la tesina no entrega un ganador territorial universal, sino una regla de decisión: primero deben cumplirse las condiciones eléctricas, digitales, hídricas y regulatorias; luego debe compararse el TCO con antecedentes específicos; y finalmente debe verificarse la compatibilidad entre la macrozona y el servicio digital. La principal contribución del estudio es integrar estas dimensiones en una metodología trazable que permite defender la selección de un sitio, reconocer cuándo cambia el resultado y orientar la transición desde prefactibilidad hacia una decisión de inversión.

11. REFERENCIAS

ASHRAE. (2021). Thermal guidelines for data processing environments (5th ed.). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

ASHRAE Technical Committee 9.9. (2021). Emergence and expansion of liquid cooling in mainstream data centers. ASHRAE.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (1994). Ley N.° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2013). Decreto Supremo N.° 40 de 2012: Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

Caterpillar. (2020). C175-16 generator set, 2,500 ekW, 60 Hz [Ficha técnica].

CBRE. (2024). Global data center trends 2024.

Comisión Nacional de Energía. (2025a). Informe Técnico Definitivo para la fijación de Precios de Nudo de Corto Plazo.

Comisión Nacional de Energía. (2025b). Informe y resoluciones aplicables a Servicios Complementarios y almacenamiento.

Coordinador Eléctrico Nacional. (2024). Informe de Servicios Complementarios 2024.

Coordinador Eléctrico Nacional. (2025). Informe de Monitoreo de la Competencia en el Mercado Eléctrico 2024.

Coordinador Eléctrico Nacional. (2026). Proyección de demanda y flexibilidad de grandes consumos eléctricos hacia 2035 [Presentación institucional].

Cushman & Wakefield. (2025). Chile data center market update, segundo semestre de 2025.

Electric Power Research Institute. (2024). Powering intelligence: Analyzing artificial intelligence and data center energy consumption (Report 3002028905).

Electric Power Research Institute. (2026). DCFlex Initiative: Demonstrations, workstreams and Flex MOSAIC.

German-Chilean Energy Partnership. (2026). Data centres in Chile.

Ghatikar, G., Piette, M. A., Fujita, S., McKane, A. T., Han, J. Q., Radspieler, A., Mares, K. C., & Shroyer, D. (2010). Demand response and open automated demand response opportunities for data centers. California Energy Commission, PIER Program, and Pacific Gas and Electric Company.

Google. (2023). Using demand response to reduce data center power consumption.

Intel Corporation. (2007). Thermal storage system provides emergency data center cooling.

International Organization for Standardization. (2021). ISO/IEC 22237-1:2021, Information technology—Data centre facilities and infrastructures—Part 1: General concepts.

ISO/IEC. (2022). ISO/IEC 30134-9: Information technology—Data centres key performance indicators—Part 9: Water usage effectiveness (WUE).

ISO/IEC. (2026). ISO/IEC 30134-2: Information technology—Data centres key performance indicators—Part 2: Power usage effectiveness (PUE).

Kahil, H., Sharma, S., Välisuo, P., & Elmusrati, M. (2025). Reinforcement learning for data center energy efficiency optimization: A systematic literature review and research roadmap. Applied Energy, 384, 125734.

Knittel, C. R., Senga, J. R. L., & Wang, S. (2025). Flexible data centers and the grid: Lower costs, higher emissions? NBER Working Paper 34065.

Lei, N., Lu, J., Shehabi, A., & Masanet, E. R. (2025). The water use of data center workloads: A review and assessment of key determinants. Resources, Conservation and Recycling, 219, 108310.

Liu, Z., Chen, Y., Bash, C., Wierman, A., Gmach, D., Wang, Z., Marwah, M., & Hyser, C. (2013). Data center demand response: Avoiding the coincident peak via workload shifting and local generation. Performance Evaluation, 70(10), 770–791.

Mekonnen, M. M., Gerbens-Leenes, P. W., & Hoekstra, A. Y. (2015). The consumptive water footprint of electricity and heat: A global assessment. Environmental Science: Water Research & Technology, 1, 285–297.

Microsoft. (2022). Microsoft datacenter batteries to support growth of renewables on the power grid.

Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. (2024). Plan Nacional de Data Centers 2024–2030.

Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. (2025). ¿Cómo instalar un data center en Chile? Guía referencial.

Ministerio de Energía. (2019). Decreto Supremo N.° 37/2019: Reglamento de los sistemas de transmisión y de la planificación de la transmisión.

Ministerio del Medio Ambiente. (2026). Decreto Supremo N.º 17: Aprueba modificación al Decreto Supremo N.º 40, de 2012, que establece el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2016). Circular DDU 323: Data center, uso de suelo infraestructura energética.

Mordor Intelligence. (2026). Chile data center market size and share analysis—Growth trends and forecasts (2026–2031).

Paananen, J. (2023). Grid-interactive UPS and data centre potential to provide Fast Frequency Response services [Tesis de magíster, Tampere University of Applied Sciences].

Rojas Otárola, D. A. (2021). Uso de un sistema de refrigeración por absorción de calor para data centers bajo distintas zonas climáticas [Tesis de magíster, Universidad Diego Portales].

Servicio de Evaluación Ambiental. (2026). Criterio de evaluación en el SEIA: Introducción a proyectos de data center.

Superintendencia de Electricidad y Combustibles. (2020). Pliegos técnicos normativos RIC del D.S. N.° 8/2019.

Takci, M. T., Qadrdan, M., Summers, J., & Gustafsson, J. (2025). Data centres as a source of flexibility for power systems. Energy Reports, 13, 3661–3671.

TeleGeography. (2024). Submarine Cable Map.

Tironi, M., & Albornoz, C. (2025). Divergent futures in a damaged territory: The rise of data centers and water conflicts in Santiago de Chile. Journal of Urban Technology.

Torcellini, P., Long, N., & Judkoff, R. (2003). Consumptive water use for U.S. power production (NREL/TP-550-33905). National Renewable Energy Laboratory.

Turner & Townsend. (2024). Data Centre Cost Index 2024.

Turner & Townsend. (2025). Data Centre Construction Cost Index 2025.

U.S. Environmental Protection Agency. (s. f.). ENERGY STAR guidance for data center cooling.

Uptime Institute. (2025). Uptime Institute Global Data Center Survey 2025.

Vertiv. (2023). How to maximize revenues from your data center energy storage: Grid-interactive UPS (White Paper 329440).

Wierman, A., Liu, Z., Liu, I., & Mohsenian-Rad, H. (2014). Opportunities and challenges for data center demand response. International Green Computing Conference.

Zhou, F., Gu, W., & Ma, G. (2024). Advancements in data center cooling systems: From refrigeration to high performance cooling. Energy and Buildings, 320, 114634.

Zúñiga Barroso, Y. (2024). Impacto ambiental de la industria digital data center: Estudio de un caso en la Región Metropolitana [Artículo académico de magíster, Universidad Finis Terrae].

12. ANEXOS DE CÁLCULO

Este capítulo reúne los desarrollos numéricos que respaldan el dimensionamiento del caso base, la estimación de flexibilidad, el procesamiento climático y la evaluación económica. Se incorporan únicamente operaciones intermedias y resultados que no se presentan en detalle en el cuerpo principal.

12.1 Desarrollo del caso base de 30 MW

El caso base considera 30 MW de potencia total, 25 MW de carga TI, 3,5 MW de enfriamiento y 1,5 MW de servicios auxiliares. El PUE nominal y los consumos anuales se obtienen directamente del balance de potencia.

$$\begin{gathered} PUE = \frac{P_{\text{total}}}{P_{\text{TI}}} = \frac{30}{25} = 1{,}20 \\ E_{\text{TI}} = 25 \times 8.760 = 219{,}00\text{GWh} \\ E_{\text{total}} = 30 \times 8.760 = 262{,}80\text{GWh} \end{gathered} \tag{67}$$

La densidad adoptada de 50 kW por rack permite determinar el número de racks y la superficie de sala blanca. La superficie construida incorpora las áreas auxiliares definidas para BMS/NOC/MMR, oficinas y servicios técnicos.

$$\begin{gathered} N_{\text{racks}} = \frac{25.000\text{kW}}{50\text{kW/rack}} = 500\text{racks} \\ A_{\text{white}} = 500 \times 3{,}5 = 1.750\text{m}^2 \\ A_{\text{edificio}} = 1.750 + 265 + 350 + 700 = 3.065\text{m}^2 \end{gathered} \tag{68}$$

La potencia aparente requerida se calcula con un factor de potencia de 0,95. El respaldo N+1 se configura con grupos de 2,5 MW.

$$\begin{gathered} S = \frac{30\text{MW}}{0{,}95} = 31{,}58\text{MVA} \\ N_{\text{gen}} = \lceil \frac{30}{2{,}5} \rceil + 1 = 13\text{unidades} \\ P_{\text{disponible,N-1}} = 12 \times 2{,}5 = 30{,}0\text{MW} \end{gathered} \tag{69}$$

Para la autonomía de 48 horas se consideran doce grupos en operación y un consumo unitario de 653,2 L/h. El volumen bruto incorpora un margen de 15 %.

$$\begin{gathered} V_{48\text{h}} = \frac{12 \times 653{,}2 \times 48}{1.000} = 376{,}24\text{m}^3 \\ V_{\text{bruto}} = 376{,}24 \times 1{,}15 = 432{,}68\text{m}^3 \approx 440\text{m}^3 \end{gathered} \tag{70}$$

12.2 Desarrollo del potencial de flexibilidad

El sistema UPS se evalúa a partir de una autonomía nominal de ocho minutos. La energía utilizable incorpora eficiencia de descarga, estado de salud, margen de estado de carga y una reserva de cinco minutos destinada a continuidad.

$$E_{\text{UPS,nom}} = \frac{25\times 8}{60} = 3{,}333\text{MWh}$$
$$E_{\text{UPS,aj}} = 3{,}333 \times 0{,}96 \times 0{,}90 \times 0{,}90 = 2{,}592\text{MWh}$$
$$E_{\text{reserva}} = \frac{25\times 5}{60} = 2{,}083\text{MWh} \tag{71}$$
$$E_{\text{UPS,flex}} = 2{,}592 - 2{,}083 = 0{,}5087\text{MWh}$$

La relación potencia–duración se determina con la energía flexible neta. La potencia ofertable queda limitada a 2 MW.

$$t(P) = \frac{0{,}5087}{P} \times 60\text{min}$$
$$t(0{,}8) = 38{,}2\text{min}; t(1{,}5) = 20{,}3\text{min}; t(2{,}0) = 15{,}3\text{min} \tag{72}$$

La potencia asociada a cargas TI diferibles se obtiene mediante la fracción técnicamente desplazable y un factor contractual de 0,80.

$$P_{\text{TI,flex}} = 25 \times f_{\text{dif}} \times 0{,}80$$
$$f = 2\% \rightarrow 0{,}40\text{MW}; f = 5\% \rightarrow 1{,}00\text{MW}; f = 10\% \rightarrow 2{,}00\text{MW} \tag{73}$$

Para el almacenamiento térmico se utiliza un volumen base de 250 m³, un salto térmico de 6 K y una fracción utilizable de 0,85. La reducción eléctrica de 0,75 MW equivale a 4,5 MW térmicos para un COP marginal de 6.

$$P_{\text{TES,th}} = 0{,}75 \times 6 = 4{,}50\text{MW}_\text{t}$$
$$E_{\text{TES}} = \frac{1.000\times 4{,}18\times 6\times 0{,}85\times 250}{3{,}6\times 10^6} = 1{,}480\text{MWh}_\text{t} \tag{74}$$
$$t_{\text{TES}} = \frac{1{,}480}{4{,}50} \times 60 = 19{,}7\text{min}$$

El portafolio base combina 1 MW de cargas diferibles con el aporte del UPS, limitado por potencia y energía. Esta formulación evita contabilizar como simultáneos recursos que no forman parte del bloque contractual base.

$$P_{\text{port}}(\tau) = 1{,}00 + min(2{,}00; \frac{0{,}5087}{\tau})$$
$$P_{\text{port}}(0{,}25) = 3{,}00\text{MW}; P_{\text{port}}(1) = 1{,}509\text{MW} \tag{75}$$
$$P_{\text{port}}(4) = 1{,}127\text{MW}$$

La proyección agregada se obtiene escalando la potencia flexible del caso de 30 MW por la capacidad nacional considerada para el año 2030.

$$P_{2030,1h} = 1.207 \times \frac{1,5087}{30} = 60,7\text{MW}$$
$$P_{2030,4h} = 1.207 \times \frac{1,00}{30} = 40,2\text{MW} \quad (76)$$

La valorización referencial del UPS se expresa como el valor neto anual multiplicado por el factor de valor presente utilizado en el modelo económico.

$$VPN_{\text{UPS}} = 6.881 \times 8,5136 \approx 58,6 \times 10^3\text{USD} \quad (77)$$

12.3 Procesamiento climático y cálculo del PUE

El cálculo climático utiliza registros horarios históricos de temperatura de bulbo seco para Antofagasta, Valparaíso y Concepción. A cada hora se asigna un PUE mediante la función por tramos utilizada en el modelo.

$$PUE(T) = \begin{cases} 1,12, T < 12°C \\ 1,13 + (T - 12) \times 0,04/6\,, 12 \leq T < 18°C \\ 1,17 + (T - 18) \times 0,11/10\,, 18 \leq T < 28°C \\ min[1,34; 1,28 + (T - 28) \times 0,06/6], T \geq 28°C \end{cases} \quad (78)$$

El PUE representativo de cada emplazamiento corresponde al promedio de los valores horarios. La energía anual se obtiene manteniendo la carga TI de 25 MW.

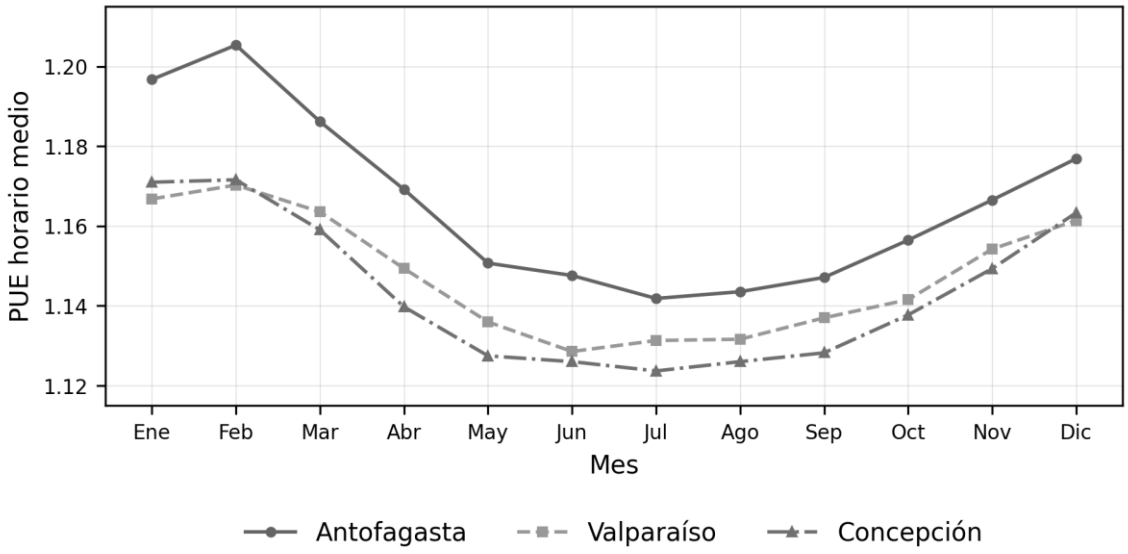
$$PUE_{\text{medio}} = \frac{PUE(T_1) + \cdots + PUE(T_n)}{n}$$
$$E_{\text{anual}} = 25 \times 8.760 \times PUE_{\text{medio}} \quad (79)$$

Tabla 12.1. Síntesis del procesamiento horario de registros climáticos históricos

Emplazamiento	Horas	T media [°C]	Rango [°C]	R1/R2/R3/R4 [h]	PUE medio	Energía [GWh]
Antofagasta	17.544	16,85	8,1 a 27,3	207/11.316/6.021/0	1,1655	255,240
Valparaíso	17.544	13,89	1,9 a 32,5	6.676/7.551/3.203/114	1,1475	251,306
Concepción	17.544	13,14	-0,3 a 28,8	6.712/8.303/2.528/1	1,1435	250,418

Fuente: elaboración propia a partir de registros climáticos históricos.

Figura 12.1. Evolución mensual del PUE horario medio por emplazamiento



Fuente: elaboración propia a partir de registros climáticos históricos.

A modo de sustitución numérica, la energía anual calculada para Concepción se obtiene con el PUE horario medio de 1,14346. Los valores equivalentes para Antofagasta y Valparaíso se presentan en la Tabla 12.1.

$$E_{\text{Concepción}} = 25 \times 8.760 \times 1{,}14346 = 250.418\text{MWh/año} \tag{80}$$

12.4 Desarrollo económico y puntos de quiebre

Los costos anuales se convierten a valor presente mediante una tasa real de 10 % y un horizonte de 20 años.

$$FVP = \frac{1-(1+0{,}10)^{-20}}{0{,}10} = 8{,}5136 \tag{81}$$

El desarrollo del TCO de Concepción incorpora el costo anual de energía, los cargos de transmisión y el CAPEX del emplazamiento.

$$\begin{gathered} C_{\text{energía,C}} = \frac{251.193 \times 23{,}48}{10^6} = 5{,}898\text{MUSD/año} \\ C_{\text{trans,C}} = \frac{251.193 \times 9{,}70}{10^6} = 2{,}437\text{MUSD/año} \\ TCO_{\text{C}} = 312{,}90 + (5{,}898 + 2{,}437) \times 8{,}5136 = 383{,}857\text{MUSD} \end{gathered} \tag{82}$$

El PBE de equilibrio de Concepción se obtiene imponiendo igualdad con el TCO de Valparaíso y despejando el precio de energía de la macrozona Sur.

$$PBE_{C^*} = \frac{(386{,}145 - 312{,}900)\times 10^6}{251.193\times 8{,}5136} - 9{,}70 = 24{,}55 \text{USD/MWh} \tag{83}$$

El costo de conexión de equilibrio corresponde al valor base de Concepción más la diferencia de TCO respecto de Valparaíso.

$$C_{\text{conexión},C^*} = 16{,}50 + (386{,}145 - 383{,}857) = 18{,}79 \text{MUSD} \tag{84}$$

El PUE de equilibrio se obtiene manteniendo constantes el CAPEX y los precios energéticos de Concepción.

$$PUE_{C^*} = \frac{(386{,}145 - 312{,}900)\times 10^6}{25\times 8.760\times (23{,}48 + 9{,}70)\times 8{,}5136} = 1{,}184 \tag{85}$$

La utilización de equilibrio compara la diferencia de CAPEX con la diferencia de costos operacionales acumulados a plena utilización.

$$u_* = \frac{312{,}90 - 302{,}90}{(386{,}145 - 302{,}90) - (383{,}857 - 312{,}90)} = 0{,}8138 = 81{,}4\% \tag{86}$$

La tasa real de equilibrio se determina resolviendo numéricamente la igualdad de TCO entre Concepción y Valparaíso. Los costos operacionales anuales corresponden a 8,335 MUSD/año y 9,778 MUSD/año, respectivamente.

$$\begin{gathered} 312{,}90 + 8{,}335 \times FVP(r, 20) = 302{,}90 + 9{,}778 \times FVP(r, 20) \\ r_* = 13{,}2\% \end{gathered} \tag{87}$$