

**El consumo de agua por los centros de datos necesarios para la implementación de la inteligencia artificial y las necesidades de adaptación frente al impacto del cambio climático**

---

**12/05/2025**

# AUTORES



**Carlos Enrique Rubio Navarro, Universidad de Zaragoza**

**Ricardo Pernía, ZINNAE**

**EDITA: ECODES**

**DISEÑO GRÁFICO: ECODES**

**FECHA: 12 de mayo de 2025**

## Índice

<b>GLOSARIO</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>4</b>
<b>DESCRIPCIÓN DE LOS CENTROS DE DATOS</b> .....	<b>5</b>
<b>ANATOMÍA DE UN CENTRO DE DATOS</b> .....	<b>6</b>
CENTRO DE OPERACIONES.....	6
SISTEMA DE ALIMENTACIÓN .....	7
SISTEMAS INFORMÁTICOS .....	7
SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN .....	8
<b>TIPOS DE CENTROS DE DATOS</b> .....	<b>9</b>
TIPOS DE CENTROS DE DATOS SEGÚN SU FUNCIONALIDAD .....	9
TIPOS DE CENTROS DE DATOS SEGÚN SU ESCALABILIDAD Y TAMAÑO .....	10
TIPOS DE CENTROS DE DATOS SEGÚN SU NIVEL DE SEGURIDAD Y REDUNDANCIA .....	12
<b>NORMATIVA APLICABLE</b> .....	<b>13</b>
<b>DIRECTIVA (UE) 2023/1791</b> .....	<b>13</b>
<b>REGLAMENTO DELEGADO (UE) 2024/1364</b> .....	<b>14</b>
MECANISMO DE REPORTE PARA LA SOSTENIBILIDAD DE LOS CENTROS DE DATOS .....	15
OBLIGACIONES DE REPORTE Y ESTRUCTURA DE LA BASE DE DATOS EUROPEA.....	18
<b>CÓDIGO DE CONDUCTA EUROPEO PARA CENTROS DE DATOS</b> .....	<b>19</b>
<b>PACTO DE CENTROS DE DATOS CLIMÁTICAMENTE NEUTRALES</b> .....	<b>20</b>
COMPROMISOS CLAVE DEL CNDCP .....	20
IMPACTO Y SEGUIMIENTO DEL CNDCP .....	21

<b>USO DE AGUA EN LOS CENTROS DE DATOS.....</b>	<b>22</b>
<b>INTRODUCCIÓN: LA HUELLA HÍDRICA Y LOS CENTROS DE DATOS.....</b>	<b>22</b>
<b>EL AGUA COMO ELEMENTO CRÍTICO EN LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO DE CENTROS DE DATOS.....</b>	<b>22</b>
<b>SISTEMAS Y TECNOLOGÍAS ACTUALES DE REFRIGERACIÓN DE CENTROS DE DATOS .....</b>	<b>23</b>
REFRIGERACIÓN POR AIRE .....	25
SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN LÍQUIDA .....	27
CONSUMO DE AGUA DURANTE EL ENFRIAMIENTO .....	27
SISTEMAS MÁS NOVEDOSOS .....	28
FACTORES DE DECISIÓN DEL TIPO DE SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE CENTROS DE DATOS .....	29
FUTUROS SISTEMAS Y TECNOLOGÍAS DE REFRIGERACIÓN DE CENTROS DE DATOS .....	31
<b>REQUISITOS DE CALIDAD DEL AGUA EN CENTROS DE DATOS.....</b>	<b>32</b>
VARIACIÓN SEGÚN EL TIPO DE SISTEMA DE REFRIGERACIÓN .....	34
CONSIDERACIONES ADICIONALES .....	34
METODOLOGÍAS APLICADAS.....	35
<b>CONSUMO PROMEDIO DE AGUA EN CENTROS DE DATOS: UN ANÁLISIS COMPARATIVO .....</b>	<b>36</b>
<b>EVOLUCIÓN DEL IMPACTO DE LOS CENTROS DE DATOS.....</b>	<b>38</b>
<b>CRECIMIENTO DE LOS CENTROS DE DATOS .....</b>	<b>38</b>
<b>EFFECTO EN LA CRISIS HÍDRICA .....</b>	<b>40</b>
MAYOR PRESIÓN SOBRE LA SOSTENIBILIDAD HÍDRICA DE LOS CENTROS DE DATOS .....	40
COMPROMISOS DEL SECTOR DE CENTROS DE DATOS CON LA CAUSA HÍDRICA.....	40
<b>INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y SOSTENIBILIDAD EN LOS CENTROS DE DATOS .....</b>	<b>41</b>
<b>ESTRATEGIAS PARA REDUCIR EL USO DE AGUA.....</b>	<b>44</b>
<b>DISEÑO SOSTENIBLE .....</b>	<b>44</b>
FREE COOLING.....	45
REFRIGERACIÓN LÍQUIDA EN CIRCUITO CERRADO .....	46
<b>WATER POSITIVE .....</b>	<b>47</b>
<b>SOLUCIONES INNOVADORAS.....</b>	<b>49</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>52</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>54</b>

# Glosario

- **Big data:** Conjunto masivo de datos que requiere herramientas avanzadas para su procesamiento, almacenamiento y análisis.
- **BMS (Building Management System):** Sistema de gestión automatizada que controla y supervisa infraestructuras clave de un edificio, como climatización o iluminación.
- **Centros de datos de hiperescala:** Instalaciones a gran escala capaces de albergar decenas de miles de servidores para empresas como Google o Amazon.
- **Centros de datos Edge:** Pequeños centros ubicados cerca del usuario final para reducir la latencia en el procesamiento de datos.
- **Centros de datos modulares:** Instalaciones flexibles y escalables, ensambladas por módulos prefabricados que se adaptan a diferentes necesidades.
- **Chillers:** Equipos de refrigeración que enfrían el agua usada en sistemas de climatización para centros de datos.
- **CNDCP (Climate Neutral Data Centre Pact):** Compromiso voluntario del sector europeo para alcanzar la neutralidad climática en los centros de datos en 2030.
- **CPD (Centro de Procesamiento de Datos):** Infraestructura que alberga sistemas de TI para almacenar, procesar y distribuir información digital.
- **CRAC (Computer Room Air Conditioner):** Unidad de aire acondicionado diseñada específicamente para salas de servidores.
- **CRAH (Computer Room Air Handler):** Unidad que regula el flujo de aire en salas de servidores usando agua enfriada.
- **CSP (Cloud Service Provider):** Empresa que ofrece servicios de computación en la nube, como almacenamiento o procesamiento de datos.
- **CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive):** Directiva europea que obliga a ciertas empresas a reportar su impacto ambiental, social y de gobernanza.
- **DLC (Direct Liquid Cooling):** Sistema de refrigeración que aplica directamente líquido sobre componentes informáticos para disipar calor.
- **EED (Energy Efficiency Directive):** Normativa de la UE que promueve la eficiencia energética en todos los sectores, incluidos los centros de datos.
- **ENIAC (Electrical Numerical Integrator and Computer):** Primer ordenador digital de propósito general, desarrollado en 1945, considerado el origen de los centros de datos modernos.
- **EPC (Energy Performance Certificate):** Certificado que califica la eficiencia energética de un edificio.

- **ESG (Environmental, Social and Governance):** Criterios para medir el impacto ambiental, social y de gobernanza de una organización.
- **EU DC CoC (European Code of Conduct for Energy Efficiency in Data Centres):** Iniciativa voluntaria que promueve buenas prácticas energéticas en centros de datos.
- **Free cooling:** Método de refrigeración que aprovecha el aire exterior o agua natural sin necesidad de enfriamiento mecánico.
- **GPU (Graphics Processing Unit):** Unidad de procesamiento gráfico que también se utiliza en tareas de alto rendimiento como IA o simulaciones.
- **HPC (High Performance Computing):** Computación de alto rendimiento para ejecutar tareas complejas a gran velocidad, como simulaciones científicas.
- **Hub:** Punto central de interconexión de dispositivos o redes para facilitar el tráfico de datos.
- **IA (Inteligencia Artificial):** Tecnología que permite a las máquinas realizar tareas que requieren inteligencia humana, como el aprendizaje o la toma de decisiones.
- **IoT (Internet of Things):** Red de objetos físicos conectados a internet que recopilan e intercambian datos.
- **JRC (Joint Research Centre):** Centro de investigación de la Comisión Europea que proporciona asesoramiento científico y técnico a las políticas de la UE.
- **KPI (Key Performance Indicator):** Indicador clave para medir el rendimiento de un proceso o actividad.
- **Mainframe:** Gran ordenador central usado en el pasado para tareas críticas en empresas y organismos, ahora reemplazado por modernos servidores.
- **PUE (Power Usage Effectiveness):** Indicador que mide la eficiencia energética de un centro de datos, comparando la energía total con la usada por los equipos TI.
- **Rack:** Estructura metálica (bastidor) donde se montan servidores y otros equipos de TI.
- **Router:** Dispositivo que dirige el tráfico de datos entre redes de ordenadores.
- **SAI (Sistema de Alimentación Ininterrumpida):** Dispositivo que proporciona energía de emergencia a los equipos en caso de fallo eléctrico.
- **Startup:** Empresa emergente, generalmente tecnológica, con alto potencial de crecimiento.
- **Switch:** Dispositivo de red que conecta equipos dentro de un centro de datos y gestiona el tráfico de datos entre ellos.
- **TDP (Thermal Design Power):** Cantidad máxima de calor que debe disipar un sistema de refrigeración de un procesador para evitar sobrecalentamiento.
- **TDS (Total Dissolved Solids):** Medida de los sólidos disueltos en agua, usada para

controlar la calidad del agua de refrigeración.

- **TI (Tecnologías de la Información):** Conjunto de herramientas y sistemas empleados para gestionar la información digital.
- **Tier:** Clasificación que indica el nivel de disponibilidad y redundancia de un centro de datos (*Tier I* a *IV*).
- **Water positive:** Enfoque por el cual una organización repone más agua de la que consume, contribuyendo a la sostenibilidad hídrica.
- **WPC (Water Performance Certificate):** Certificación propuesta que evalúa la eficiencia hídrica de una instalación.
- **WUE (Water Usage Effectiveness):** Indicador que relaciona el consumo de agua de un centro de datos con la energía usada por los equipos TI.

# Introducción

La seguridad hídrica es un desafío global que requiere acciones colaborativas. Según el *CDP Global Water Report 2020*, la inacción en la industria puede generar costes hasta cinco veces mayores que la implementación de medidas adecuadas. En este contexto, el consumo de agua en los centros de datos emerge como un aspecto crítico y, a menudo, subestimado dentro de la gestión de estas infraestructuras tecnológicas.

Los centros de datos son esenciales para el funcionamiento de internet y la computación en la nube, lo que los convierte en una pieza clave de la economía digital. Sin embargo, su operación demanda grandes cantidades de recursos, entre ellos el agua, utilizada principalmente en los sistemas de enfriamiento para evitar el sobrecalentamiento de los servidores. Con el crecimiento exponencial de los servicios digitales, la eficiencia en el uso del agua y la gestión sostenible de su consumo se han vuelto temas prioritarios en el debate ambiental y tecnológico. [1]

El impacto del uso del agua en estas infraestructuras es complejo y multifacético. En regiones con estrés hídrico o propensas a la sequía, el alto consumo de los centros de datos puede ejercer una presión significativa sobre los recursos locales. Además, el agua utilizada en los sistemas de enfriamiento suele ser devuelta a temperaturas elevadas, contribuyendo a la contaminación térmica y afectando los ecosistemas acuáticos. Asimismo, la dependencia de estos sistemas expone a los centros de datos a riesgos operacionales ante posibles interrupciones en el suministro de agua. [2]

A medida que los centros de datos se expanden, los desafíos medioambientales, económicos y regulatorios se intensifican. En Europa, el impacto de estas infraestructuras en el consumo de agua se ha convertido en una preocupación creciente, especialmente en periodos estacionales de elevadas temperaturas y escasez hídrica. Paralelamente, el debate sobre la regulación de la inteligencia artificial (IA) y la sostenibilidad de los recursos ha generado tensiones entre la innovación tecnológica y la necesidad de establecer marcos normativos. El reciente choque entre Estados Unidos y la Unión Europea sobre la regulación de la IA, evidenciado en la conferencia en París por el vicepresidente de Estados Unidos, refleja la dificultad de equilibrar el desarrollo tecnológico con la seguridad y la sostenibilidad. [3]

Ante estos desafíos, algunas empresas han comenzado a adoptar estrategias más responsables, comprometiéndose a ser «*water positive*» para 2030, es decir, a devolver más agua al medioambiente de la que consumen. Este tipo de iniciativas buscan mitigar el impacto ambiental de los centros de datos y sentar un precedente en la gestión sostenible de recursos dentro de la industria tecnológica. [4]

Este informe analiza estos retos y oportunidades, explorando el equilibrio entre innovación y regulación, así como las estrategias de sostenibilidad que pueden ayudar a reducir el impacto ambiental del crecimiento acelerado de los centros de datos.

## Descripción de los centros de datos

Los Centros de Procesamiento de Datos (CPD), también conocidos como centros de datos, son instalaciones diseñadas para almacenar, gestionar y procesar grandes volúmenes de información de manera eficiente y segura. Su papel es crucial en el funcionamiento de empresas, instituciones gubernamentales y proveedores de servicios digitales, ya que permiten la operación continua de plataformas tecnológicas y sistemas informáticos a gran escala.

La historia de los centros de datos se remonta a la década de 1940, cuando las primeras computadoras requerían grandes espacios dedicados exclusivamente a su funcionamiento. Uno de los primeros ejemplos es el ENIAC (*Electrical Numerical Integrator and Computer*), desarrollado por el ejército de Estados Unidos y completado en 1945 en la Universidad de Pensilvania. Esta máquina pionera marcó el inicio de la infraestructura informática centralizada. [5]

Con el avance de la tecnología, los ordenadores fueron reduciendo su tamaño y aumentando su eficiencia, disminuyendo la necesidad de grandes espacios físicos. En la década de 1990, la llegada de los microordenadores revolucionó las operaciones de Tecnologías de la Información (TI), permitiendo que múltiples equipos compactos reemplazaran a los voluminosos *mainframes*, máquinas con una electrónica básica, muy alejada de la que conocemos hoy en día, pero que funcionaron y ayudaron a los estudios de principios del siglo XX. Estos microordenadores, organizados en salas especializadas, dieron lugar a los centros de datos modernos, que optimizaron la gestión y el procesamiento de información.

A principios de los años 2000, la computación en la nube transformó aún más el panorama de los centros de datos. Los servicios en la nube permitieron a las organizaciones acceder a recursos informáticos bajo demanda a través de internet, adoptando un modelo de pago por uso que ofrece mayor flexibilidad y escalabilidad. Esta evolución redujo la necesidad de infraestructuras propias y dio paso a la creación de centros de datos más grandes y eficientes.

El crecimiento exponencial de la demanda de procesamiento de datos llevó a la aparición de los centros de datos de hiperescala. En 2006, Google inauguró el primero de estos centros en The Dalles, Oregón, una instalación que hoy ocupa aproximadamente 120 000 metros cuadrados y cuenta con un equipo de alrededor de 200 operadores especializados. Desde entonces, empresas líderes en IA, como Google, Microsoft y OpenAI, han continuado expandiendo este modelo para soportar el entrenamiento y ejecución de modelos cada vez más complejos. La creciente adopción de la IA ha impulsado una inversión sin precedentes en infraestructura de datos a nivel global, consolidando a los centros de datos como el núcleo de la economía digital. [6]

## Anatomía de un centro de datos

En la era digital, los centros de datos se han convertido en las infraestructuras invisibles que sustentan nuestra vida cotidiana. Cada búsqueda en internet, cada transacción financiera, cada videollamada o interacción en redes sociales depende, de forma silenciosa pero esencial, del correcto funcionamiento de estos complejos sistemas tecnológicos. Lejos de ser simples almacenes de servidores, los centros de datos son instalaciones sofisticadas, diseñadas para garantizar la disponibilidad, seguridad, eficiencia energética y continuidad operativa de los datos y servicios que alojan.

A continuación, se va a describir la «anatomía» de un centro de datos, analizando sus componentes físicos, tecnológicos y operativos. Desde los sistemas de procesamiento, almacenamiento y redes hasta las infraestructuras críticas como la alimentación eléctrica y la refrigeración (Figura 1). [7]

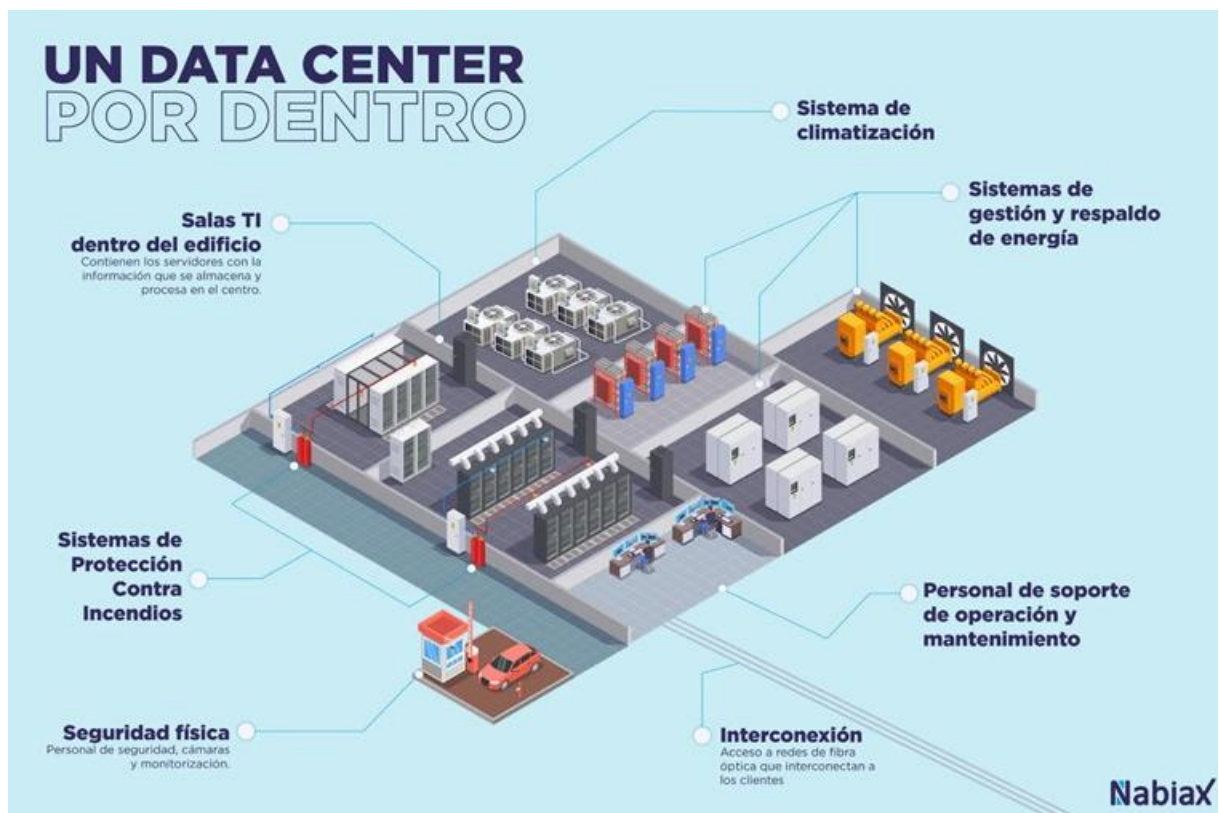


Figura 1. Interior de un centro de datos

### CENTRO DE OPERACIONES

El centro de operaciones actúa como el auténtico cerebro de la instalación. Desde aquí, un equipo de técnicos especializados en diferentes áreas como energía, refrigeración o redes monitoriza en tiempo real los sistemas críticos que garantizan el funcionamiento continuo del centro de datos.

Estos profesionales están entrenados para detectar y responder rápidamente a cualquier anomalía que pueda poner en riesgo la disponibilidad de los servicios. Su labor consiste no solo en reaccionar ante incidentes, sino también en anticiparse a fallos potenciales mediante el análisis constante de parámetros operativos clave. [8]

Suele estar equipado con varias filas de escritorios orientadas hacia grandes pantallas que muestran alarmas activas, incidentes en curso, y métricas de rendimiento del centro. En este diseño, todos los miembros del equipo comparten la misma información en tiempo real, lo que permite que se puedan solucionar de manera ágil posibles complicaciones o problemas.

## **SISTEMA DE ALIMENTACIÓN**

La alimentación eléctrica constituye uno de los sistemas más críticos en un centro de datos. Garantizar un suministro estable, continuo y protegido es esencial para evitar interrupciones que puedan comprometer servicios digitales sensibles. A diferencia de otros entornos industriales, los centros de datos deben estar diseñados no solo para soportar cortes de energía, sino también para seguir operando sin interrupciones, incluso durante mantenimientos o fallos de red/energía. A continuación, se describen los principales componentes de esta infraestructura.

### ***Generadores in situ***

Los centros de datos de alta disponibilidad —por ejemplo, aquellos diseñados conforme al estándar *Tier III*, una clasificación que indica el nivel de redundancia y tolerancia a fallos de la infraestructura— deben ser capaces de funcionar al menos 12 horas de forma autónoma en caso de fallo total del suministro eléctrico externo. Para ello, cuentan con generadores diésel (u otras tecnologías) y depósitos de combustible suficiente para asegurar la autonomía operativa. Estos sistemas se activan automáticamente ante cualquier fallo en la red y permiten mantener el suministro eléctrico durante el tiempo necesario.

### ***Sistema de alimentación ininterrumpida***

Antes de llegar al equipamiento de TI, la energía pasa por un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI). Este componente actúa como una barrera de protección frente a picos de tensión, cortes breves o fluctuaciones de voltaje, y proporciona energía eléctrica mediante baterías durante el breve intervalo de tiempo (hasta que entran en funcionamiento los generadores). El SAI es esencial para garantizar que no se produzca ni un solo segundo de interrupción, permitiendo una transición fluida entre las distintas fuentes de energía. [9]

### ***Distribución eléctrica***

Una vez estabilizada por el SAI, la energía se distribuye a las salas técnicas y bastidores (*racks*) donde se encuentran los servidores de los clientes. Este sistema de distribución está diseñado con topologías redundantes, lo que significa que existen caminos alternativos de energía para que, en caso de fallo en una línea, otra pueda asumir la carga sin interrumpir el servicio. Esta configuración de redundancia eléctrica (N+1, 2N, etc.) es uno de los pilares de la fiabilidad en entornos críticos. [10]

## **SISTEMAS INFORMÁTICOS**

El verdadero corazón de un centro de datos se encuentra en sus sistemas informáticos: una infraestructura crítica que alberga equipamiento valorado en cientos de millones de euros, así como los sistemas de información y datos que son vitales para la operativa de muchas empresas. [11]

Todo este equipamiento se concentra en la llamada sala de datos. Al entrar en una de estas salas (Figura 2) [11], se accede a un gran espacio donde se disponen filas y filas de servidores

apilados en bastidores. Los cables de red y de alimentación pueden ir dispuestos por bandejas aéreas o bajo suelos técnicos, ocultos tras paneles registrables.



*Figura 2. Sala de datos de un centro de datos*

En muchos casos, los bastidores están dispuestos en pares enfrentados, configurando lo que se conoce como «pasillos calientes» y «pasillos fríos». Este diseño permite implementar sistemas de contención de aire, que gestionan los flujos térmicos para evitar la mezcla entre el aire frío de suministro y el aire caliente de retorno, mejorando significativamente la eficiencia energética del sistema de refrigeración.

## **SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN**

Tanto el calor como el frío extremo pueden impedir que los equipos informáticos funcionen con la máxima eficiencia. En particular, los centros de datos consumen mucha energía, lo que se traduce en calor que hay que disipar, tanto mayor cuanto más equipos constituyan la instalación. La refrigeración comprende el conjunto de equipos, herramientas, sistemas, técnicas y procesos que garantizan temperaturas y niveles de humedad ideales dentro de las instalaciones de un centro de datos.

La gestión térmica de los centros de datos resulta esencial para ofrecer confiabilidad de los equipos y eficiencia energética, evitar la pérdida de datos, optimizar el rendimiento, brindar seguridad, costes más bajos y eficiencia operativa, así como para minimizar el impacto ambiental. De ese modo se garantiza que los componentes electrónicos individuales funcionen dentro de sus rangos de temperatura óptimos, lo que además reduce su consumo energético. A medida que aumenta la temperatura de los componentes también aumenta su resistencia interna, disminuyendo su rendimiento y aumentando la demanda energética. Los sistemas de enfriamiento pueden consumir entre 30 % y 40 % de la energía total, y dado que la mayoría de las instalaciones gastan el 50 % de sus gastos operativos en facturas de energía, la refrigeración es un buen lugar para centrarse en las mejoras de eficiencia. [12]

En un apartado posterior de esta memoria se explican con más detalle los sistemas y tecnologías actuales de refrigeración de centros de datos, así como algunas soluciones novedosas.

## Tipos de centros de datos

Los centros de datos pueden clasificarse en distintas categorías según su propiedad, funcionalidad, infraestructura y nivel de servicio. A continuación, se describen sus principales tipos.

### TIPOS DE CENTROS DE DATOS SEGÚN SU FUNCIONALIDAD

#### *Centros de datos de uso empresarial*

Un centro de datos de uso empresarial consiste en una instalación privada que da soporte a una sola organización. Este tipo es el más adecuado para las empresas que tienen necesidades de red únicas, o empresas con un volumen de negocio suficiente para aprovechar las economías de escala, como pueden ser bancos o administraciones públicas. [13]

Los centros de datos empresariales se construyen a medida para que sean compatibles con las aplicaciones y procesos empresariales distintivos de la organización. Se encuentran en las propias instalaciones que la empresa o fuera de ellas, en lugares cuidadosamente seleccionados por la conectividad, potencia y seguridad que ofrecen.

#### *Centros de datos de servicios gestionados*

Los centros de datos de servicios gestionados son instalaciones en las que proveedores externos se encargan de la gestión integral de la infraestructura del centro de datos de una organización, incluidos los componentes físicos y virtuales. Este modelo permite a las organizaciones externalizar las operaciones y el mantenimiento de TI en varios entornos.

Generalmente, estos servicios son prestados por un proveedor de servicios gestionados, que garantiza la supervisión y el mantenimiento continuos 24 horas al día, 7 días a la semana, del centro de datos, ejecutados in situ por ingenieros y técnicos altamente cualificados. [14]

#### *Centros de datos de colocación*

Los centros de datos de colocación ofrecen un espacio a aquellas empresas que desean alojar su hardware informático y sus servidores fuera de sus instalaciones (Figura 3) [15]. Estas infraestructuras proporcionan los componentes de centro de datos adecuados —energía, refrigeración, seguridad y equipos de red— necesarios para ello. Las empresas que no disponen de espacio para su propio centro de datos, o de un equipo informático especializado para gestionarlo, suelen optar por un centro de datos de colocación. Esto les permite redirigir recursos financieros y de personal a otras actividades de su negocio. [15]



Figura 3. Centro de datos de colocación: Equinix

### **Centros de datos en la nube**

Los centros de datos en la nube son instalaciones físicas y virtualizadas que proporcionan almacenamiento, procesamiento y administración de datos a través de internet mediante servicios de computación en la nube. En lugar de operar con servidores, redes y almacenamiento en instalaciones locales, los centros de datos en la nube permiten a las empresas y usuarios acceder a estos recursos como un servicio a través de plataformas de nube públicas, privadas o híbridas. Están diseñados para soportar cargas de trabajo masivas, escalabilidad dinámica y garantizar alta disponibilidad de servicios de TI, todo mientras se optimiza el uso de los recursos y se reduce la necesidad de infraestructura interna. [17]

### **TIPOS DE CENTROS DE DATOS SEGÚN SU ESCALABILIDAD Y TAMAÑO**

Otra posible clasificación de los distintos tipos de centros de datos es por su tamaño, que puede ser altamente variable. Su elección vendrá determinada, como siempre, por el tipo de necesidades que precise cada empresa.

### **Centros de datos modulares**

Los centros de datos portátiles, denominados centros de datos modulares, permiten a las empresas conectar y utilizar todos los componentes del centro de datos en un lugar donde se necesite capacidad de tratamiento de datos. Estos módulos contienen equipos informáticos y la energía y refrigeración necesarias para funcionar como un pequeño centro de datos totalmente funcional. [18]

Los dos objetivos principales de los centros de datos modulares son reducir el tiempo y el coste necesarios para construir e instalar un centro de datos. Las instalaciones modulares ahorran tiempo al trasladar las tareas convencionales de construcción *in situ* a instalaciones de fabricación externas, al tiempo que suponen un ahorro de costes al recurrir a la estandarización y reducir la mano de obra *in situ*. Su enfoque está basado en la creación de un centro de datos a través de módulos prefabricados. Estos módulos son construidos en instalaciones controladas, asegurando altos niveles de calidad y uniformidad en el proceso de fabricación. La modularidad de esta solución permite que las organizaciones personalicen y adapten su infraestructura de TI de acuerdo con sus necesidades cambiantes.

### **Centros de datos de hiperescala**

Los centros de datos de hiperescala son instalaciones masivas, centralizadas y construidas a medida que son operadas por una única empresa (Figura 4) [15]. Estas instalaciones dan soporte principalmente a proveedores de servicios en la nube (CSP) y grandes empresas de

internet con enormes necesidades de computación, almacenamiento y redes. Los centros de datos de hiperescala pueden ser subcontratados o autoconstruidos por los «hiperescaladores», entre los que se incluyen empresas como Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure, Google Cloud y Meta (Facebook).



Figura 4. Centro de datos de hiperescala: Google, Lithia Springs, condado de Douglas, Georgia

### **Centros de datos Edge**

Los centros de datos *Edge*, también llamados periféricos o en el borde, son instalaciones más pequeñas y descentralizadas que proporcionan computación y almacenamiento en una ubicación más cercana al lugar donde se generan y utilizan los datos (Figura 5) [15]. Están situados cerca de los usuarios a los que van destinados, lo que permite procesar y analizar los datos en tiempo real. Como los centros de datos *Edge* realizan este análisis más cerca de la fuente de creación de los datos, se reduce la latencia de respuesta y se optimiza el ancho de banda, lo que facilita el desarrollo de nuevas aplicaciones. [19]



Figura 5. Centro de datos Edge - AtlasEdge, Barcelona

El término «*Edge*» hace referencia a la ubicación en la que suelen desplegarse este tipo de centros de datos, que está más cerca del punto de conectividad. Los centros de datos *Edge* pueden desplegarse como instalaciones independientes o en diversos entornos, como oficinas centrales de telecomunicaciones, puntos de distribución local, base de torres de telefonía móvil o en las instalaciones de una empresa.

## TIPOS DE CENTROS DE DATOS SEGÚN SU NIVEL DE SEGURIDAD Y REDUNDANCIA

El *Uptime Institute* clasifica los centros de datos en cuatro niveles (*Tier*) según su disponibilidad y tolerancia a fallos [20]:

### ***Tier I (Básico)***

Un centro de datos de nivel 1 proporciona el nivel de capacidad básico necesario para dar soporte informático a una empresa. Requiere un SAI en previsión de cortes, caídas y picos de tensión, un equipo de refrigeración que funcione fuera del horario de oficina y un generador para cortes de corriente.

### ***Tier II (Redundante)***

Un centro de datos de nivel 2 ofrece una protección mejorada contra eventos físicos. Proporciona mantenimiento y seguridad contra interrupciones a través de equipos como sistemas de refrigeración, generadores y almacenamiento de energía, depósitos de combustible y bombas.

### ***Tier III (Alta Disponibilidad)***

Un centro de datos de nivel 3 no necesita interrumpir la actividad cuando es necesario realizar tareas de mantenimiento o sustitución de equipos. Cuenta con componentes redundantes y rutas de distribución que garantizan su mantenimiento simultáneo. Es el más adecuado para grandes empresas y protege contra la mayoría de los eventos físicos.

### ***Tier IV (Tolerante a Fallos)***

Los centros de datos de nivel 4 cuentan con sistemas independientes y físicamente aislados que crean componentes de capacidad redundante y rutas de distribución. Esto garantiza que las interrupciones planificadas o imprevistas no afecten a las instalaciones ni a las operaciones de TI. Todos los equipos de TI de una instalación de nivel 4 deben tener un diseño de alimentación tolerante a fallos, y el edificio requiere refrigeración continua para que el entorno permanezca estable.

## Normativa aplicable

En la actualidad, el sector de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC) cada día adquiere mayor importancia y la implementación de las nuevas tecnologías trae consigo importantes desafíos económicos y ambientales. Así es el caso de los centros de datos, que según estimaciones suponen el 3 % de la demanda eléctrica en Europa en la actualidad, cifra que seguro aumentará si continua el crecimiento de este sector. [21]

En este contexto, la Comisión Europea publicó una comunicación titulada «Configurar el futuro digital de Europa» donde se resalta la importancia de que la transformación digital y la transición ecológica avancen de manera conjunta, asegurando que el crecimiento tecnológico sea compatible con los objetivos de sostenibilidad de la Unión Europea (UE). En este sentido, el documento pone de relieve la necesidad de desarrollar centros de datos altamente eficientes desde el punto de vista energético y sostenibles, alineándose con la meta de alcanzar la neutralidad climática para 2050. La Comisión enfatiza que el sector digital, incluido el almacenamiento y procesamiento de datos, debe reducir su impacto ambiental, optimizando el consumo energético y promoviendo el uso de energías renovables. [22]

Además, se destaca que las soluciones digitales deben respetar los valores europeos y fomentar una economía eficiente en el uso de los recursos. Esto implica que los centros de datos deben diseñarse con criterios de eficiencia energética, reutilización del calor residual y reducción de emisiones de dióxido de carbono, garantizando su sostenibilidad a largo plazo. [23]

Para intentar garantizar estos objetivos, la UE dio un paso importante hacia la mejora de la eficiencia energética en los centros de datos con la aprobación de la Directiva (UE) 2023/1791, de 13 de septiembre de 2023, relativa a la eficiencia energética, concretamente, y entre otros, su artículo 12, referente a los centros de datos, la cual se encuentra actualmente en transposición a las normativas nacionales, y el Reglamento Delegado (UE) 2024/1364, de 14 de marzo de 2024, relativo a la primera fase del establecimiento de un régimen de evaluación común de la Unión para centros de datos.

## Directiva (UE) 2023/1791

La Nueva Directiva de Eficiencia Energética 2023/1791 fue adoptada por el Parlamento Europeo y el Consejo en el año 2023. Su objetivo principal es cumplir con los requerimientos legales previstos en el Paquete «Fit for 55» y en el plan REPowerEU, propuestos por la Comisión Europea en julio de 2021.

El Paquete «Fit for 55», de julio de 2021, nace del Plan del Objetivo Climático titulado «Intensificar la ambición climática de Europa para 2030: Invertir en un futuro climáticamente neutro en beneficio de nuestros ciudadanos». En este Plan, la Comisión propuso incrementar la ambición climática de la Unión, elevando el objetivo de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero hasta, como mínimo, un 55 % por debajo de los niveles de 1990. La propuesta materializaba el compromiso asumido en el Pacto Verde Europeo de presentar un plan integral para elevar el objetivo de la Unión para 2030 al 55 % de manera responsable. También es conforme con el Acuerdo de París de mantener el aumento de la temperatura mundial muy por debajo de 2 °C y proseguir los esfuerzos para limitarlo a 1,5 °C. [24]

En segundo lugar, el Plan REPowerEU, de mayo de 2022, tiene como objetivo impulsar el cambio hacia fuentes energéticas limpias, reconfigurando el sistema energético que depende

de los combustibles fósiles hacia uno que se sustente en energías renovables y sostenibles, acelerando así la transición energética. [25]

Con estos objetivos, la Directiva pretende conseguir un uso de la energía mucho más eficiente y, en consecuencia, un gran ahorro de esta. Concretamente, fija el objetivo de reducir el consumo energético en toda la UE un 11,7 % para el año 2030, en comparación con las previsiones de 2020, haciendo que el consumo energético final de la UE no supere los 763 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep).

En esta nueva revisión, se ha incorporado la obligación para los centros de datos con una potencia instalada superior a 500 kW de informar sobre su consumo energético y eficiencia a partir de mayo de 2024. [26]

Los estados miembros de la UE han dispuesto de dos años para hacer la incorporación a su legislación de la gran mayoría de los elementos de la nueva Directiva, desde que la Nueva Directiva fue publicada en el Diario Oficial de la Unión Europea.

A continuación, se van a mencionar las principales obligaciones recogidas en la nueva Directiva de eficiencia energética.

### Obligaciones en materia de los centros de datos:

- **Publicación de datos:** Los operadores de centros de datos con una demanda de potencia eléctrica de los sistemas de tecnologías de la información (TI) igual o superior a 500 kW deberán publicar anualmente, antes del 15 de mayo, información detallada sobre su consumo energético y otros indicadores relacionados con la sostenibilidad. [22]
- **Transparencia y acceso a la información:** La Comisión Europea creará una base de datos centralizada donde los centros de datos deberán reportar sus indicadores de consumo. Esta medida facilitará el análisis de la sostenibilidad del sector a nivel europeo y permitirá el desarrollo de políticas públicas más efectivas. [22]
- **Integración en legislaciones nacionales:** Los estados miembros de la UE están obligados a incorporar esta directiva en sus legislaciones nacionales. Alemania, por ejemplo, planea hacerlo a través de su Ley de Eficiencia Energética.
- **Utilización del calor residual:** El artículo 26 de la Directiva establece que los Estados miembros velarán por que los centros de datos con una entrada de energía nominal total superior a 1 MW utilicen el calor residual u otras aplicaciones de recuperación de calor residual, a menos que puedan demostrar que no resulta técnica o económicamente viable.

Estas medidas buscan no solo optimizar el consumo energético de los centros de datos, sino también promover una mayor transparencia y sostenibilidad en el sector, contribuyendo significativamente a los objetivos climáticos de la Unión Europea.

## Reglamento Delegado (UE) 2024/1364

El Reglamento Delegado (UE) 2024/1364 establece un marco común para evaluar la sostenibilidad de los centros de datos en la Unión Europea. Este reglamento complementa la Directiva (UE) 2023/1791 y detalla las obligaciones específicas a la hora de informar que

deben cumplir los operadores de centros de datos con una potencia instalada superior a 500 kW. Estas obligaciones son necesarias para poder establecer un régimen común que permita evaluar la sostenibilidad de los centros de datos en la UE, definiendo los indicadores clave de rendimiento y la metodología para medirlos. A partir de la obtención esta información y de los indicadores clave de rendimiento, se establecerán los indicadores de sostenibilidad de los centros de datos. [27]

Este reglamento se aplica a los operadores de centros de datos cuya demanda de potencia eléctrica destinada a los sistemas de tecnologías de la información (TI) sea igual o superior a 500 kW. Este umbral establece el alcance mínimo a partir del cual los centros de datos deben cumplir con las obligaciones de reporte y transparencia reguladas por la normativa.

El texto legislativo incorpora también una serie de definiciones fundamentales, necesarias para la correcta interpretación y aplicación del Reglamento. Entre ellas, se incluyen:

- **Las tipologías y categorías de centros de datos**, atendiendo a su capacidad, finalidad y nivel de servicio.
- **La definición formal de operador de centro de datos**, como la entidad responsable de la operación técnica y funcional de las instalaciones.
- **Los indicadores clave de rendimiento (KPI)** que deben ser medidos y registrados, tales como el **uso de energía (PUE)**, **uso de agua (WUE)**, emisiones, y otros parámetros de eficiencia y sostenibilidad.

De esta manera se asegura una base común para la recopilación de datos, el análisis comparativo y el seguimiento de objetivos en materia de sostenibilidad, eficiencia energética y uso responsable de recursos en el sector de los centros de datos a nivel europeo.

## **MECANISMO DE REPORTE PARA LA SOSTENIBILIDAD DE LOS CENTROS DE DATOS**

Los operadores de centros de datos deberán presentar la información y los indicadores clave de los centros de datos en los que operan en la base de datos europea antes del 15 de septiembre de 2024 y, posteriormente, de forma anual cada 15 de mayo. [22]

Esta obligación se aplica a todos los tipos de centros de datos (empresariales, de colocación, etc.) e incluye información sobre el propio centro de datos (nombre, ubicación, propietario/operador, tipo de centro de datos, etc.) y sobre sus operaciones (grado de redundancia de la infraestructura eléctrica y de refrigeración).

Sin embargo, el elemento central del reporte son los indicadores clave establecidos en el Anexo II del Reglamento, que los operadores deberán medir y supervisar. En este sentido, se definen 24 indicadores de rendimiento, organizados en tres bloques temáticos principales.

Tabla 1. Indicadores de rendimiento relacionados con la energía y sostenibilidad

Energía y sostenibilidad	
<p><b>Demanda de potencia eléctrica</b> de los sistemas de tecnologías de la información instalados («PD<sub>IT</sub>», en kW)</p> <p><b>Superficie total</b> del centro de datos («S<sub>DC</sub>», en metros cuadrados)</p> <p><b>Superficie de la sala de ordenadores</b> del centro de datos («S<sub>CR</sub>», en metros cuadrados)</p> <p><b>Consumo total de energía</b> («E<sub>DC</sub>», en kWh)</p> <p><b>Consumo total de energía de los equipos</b> de tecnologías de la información («E<sub>IT</sub>», en kWh)</p> <p><b>Funciones de red eléctrica</b></p> <p><b>Capacidad media de las baterías</b> («C<sub>BIG</sub>», en kW)</p> <p><b>Aporte total de agua</b> («W<sub>IN</sub>», en metros cúbicos)</p> <p><b>Aporte total de agua potable</b> («W<sub>IN-POT</sub>», en metros cúbicos)</p> <p><b>Calor residual reutilizado</b> («E<sub>REUSE</sub>», en kWh)</p>	<p><b>Temperatura media del calor residual</b> («T<sub>WH</sub>», en grados Celsius)</p> <p><b>Temperatura media de consigna del aire de entrada</b> de los equipos de tecnologías de la información («T<sub>IN</sub>», en grados Celsius)</p> <p><b>Tipos de refrigerantes utilizados</b> en los equipos de refrigeración y aire acondicionado de la superficie de la sala de ordenadores del centro de datos</p> <p><b>Grados-día de refrigeración</b> (en grados-día)</p> <p><b>Consumo total de energía renovable</b> («E<sub>RES-TOT</sub>», en kWh)</p> <p><b>Consumo total de energía renovable procedente de garantías de origen</b> («R<sub>ES-GOO</sub>», en kWh)</p> <p><b>Consumo total de energía renovable procedente de contratos de compraventa</b> de electricidad («E<sub>RES-PPA</sub>», en kWh)</p> <p><b>Consumo total de energía renovable procedente de la energía renovable producida en el centro</b> («E<sub>RES-OS</sub>», en kWh)</p>

Tabla 2. Indicadores de rendimiento relacionados con las tecnologías de la información y comunicación

Tecnologías de la información y comunicación
Capacidad de las TIC para servidores («C <sub>SERV</sub> »)
Capacidad de las TIC para equipos de almacenamiento («C <sub>STOR</sub> », en petabytes)

Tabla 3. Indicadores de rendimiento relacionados con el tráfico de datos

Tráfico de datos
Ancho de banda del tráfico entrante («B <sub>IN</sub> », en gigabytes por segundo)
Ancho de banda del tráfico saliente («B <sub>OUT</sub> », en gigabytes por segundo)
Tráfico de datos entrantes («T <sub>IN</sub> », en exabytes)
Tráfico de datos salientes («T <sub>OUT</sub> », en exabytes)

Además, se establecen los indicadores de sostenibilidad que permiten evaluar de manera objetiva la eficiencia global de un centro de datos. Entre estos, destacan especialmente dos métricas ampliamente reconocidas en el sector: el indicador de eficiencia en el uso de la energía (*power usage effectiveness* o *PUE*) y el indicador de eficiencia en el uso del agua (*water usage effectiveness* o *WUE*).

La *PUE* es el indicador más utilizado para medir la eficiencia energética de un centro de datos. Introducido por *The Green Grid* en 2007, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$PUE = \frac{\text{Consumo total anual de energía (kWh)}}{\text{Energía anual de TI (kWh)}}$$

Un valor de *PUE* cercano a 1 indica una alta eficiencia energética, ya que significa que la mayor parte de la energía se destina directamente al equipamiento TI (servidores, sistemas de almacenamiento, redes), y no a sistemas auxiliares como climatización, iluminación o distribución eléctrica. Actualmente, los centros de datos de alta eficiencia consiguen valores de *PUE* inferiores a 1,3, mientras que el promedio del sector oscila alrededor de 1,5. [28]

Por otro lado, la *WUE* se ha convertido en una métrica clave para evaluar y comparar la sostenibilidad del consumo de agua en los centros de datos. [29]

La *WUE* se calcula dividiendo el consumo anual de agua del centro de datos (medido en litros) por la cantidad de energía consumida anualmente por sus equipos de tecnología de la información (medida en kWh):

$$WUE = \frac{\text{Consumo anual de agua (L)}}{\text{Energía anual de TI (kWh)}}$$

Este indicador permite a los operadores de centros de datos, a los investigadores y a otras partes interesadas evaluar la eficiencia con la que se utiliza el agua en relación con la energía consumida para las operaciones de TI. [30] Un valor de *WUE* más bajo indica una mayor eficiencia en el uso del agua. La *WUE* es una herramienta valiosa para identificar oportunidades de reducción del consumo de agua y para realizar un seguimiento del progreso hacia la sostenibilidad. [31]

Sin embargo, la *WUE* tiene algunas limitaciones. No distingue entre el uso consuntivo total del agua en el sitio y el uso consuntivo debido a la evaporación, que es la principal preocupación en términos de agotamiento de los recursos hídricos. [32] Además, la *WUE* no tiene en cuenta el uso de fuentes de agua alternativas, como el agua reciclada o el agua de lluvia, ni la posible reutilización del agua descargada. [33] Finalmente, la *WUE* trata cada litro de agua por igual, sin considerar la escasez local de la fuente de agua o la calidad del agua utilizada. [33]

A pesar de estas limitaciones, la *WUE* sigue siendo un indicador útil para evaluar la eficiencia en el uso del agua. Algunos ejemplos de valores de *WUE* reportados por empresas importantes en los últimos dos años incluyen:

- Equinix notificó una *WUE* de 1,07 L/kWh para todos sus centros de datos en 2023 y una *WUE* de 1,63 L/kWh específicamente para los centros de datos que utilizan enfriamiento evaporativo. [33]
- AWS logró una *WUE* de 0,18 L/kWh en 2023, lo que representa una mejora con respecto a los 0,25 L/kWh de 2021. [34]
- Microsoft reportó una *WUE* promedio de 0,30 L/kWh en el año 2023, lo que indica una mejora del 39 % desde 2021 [35]. La compañía tiene como objetivo alcanzar una *WUE* cercano a cero con sus nuevos diseños de centros de datos que no utilizan evaporación para la refrigeración. [36]
- Meta (Facebook) registró una *WUE* promedio de 1,80 L/kWh. [37]
- Google informó una *PUE* promedio de 1,10 para su conjunto de centros de datos en 2023, pero no proporcionó una cifra de *WUE* global. [38]

## OBLIGACIONES DE REPORTE Y ESTRUCTURA DE LA BASE DE DATOS EUROPEA

Según lo establecido en el Reglamento, los operadores de centros de datos están obligados a reportar información e indicadores clave de desempeño de forma periódica. La obligación de reporte se ajusta al período de actividad del centro [22]:

- **Centros de datos con más de un año de operación:** deberán reportar tomando como base el calendario del año anterior.
- **Centros de datos con menos de un año de operación:** el reporte se limitará al período efectivo de funcionamiento, indicando expresamente dicho intervalo.

Se contempla una única excepción a esta obligación: cuando existan problemas técnicos claramente justificables que impidan la recopilación de los datos exigidos. En tal caso, el operador deberá presentar una justificación detallada, documentando los motivos de la omisión.

La información será recopilada a través de una base de datos europea unificada, que contará con una interfaz común y una API estándar —una interfaz de programación que permite el intercambio automatizado de datos entre sistemas—, lo que facilitará una comunicación coherente entre todos los operadores de centros de datos de la UE. Los datos serán publicados de forma agregada, tanto a nivel de cada Estado miembro como del conjunto de la Unión Europea, garantizando en todo momento la confidencialidad de la información sensible conforme al artículo 4(2) del Reglamento (CE) nº 1049/2001 sobre el acceso a documentos públicos.

Finalmente, si bien el Reglamento establece con claridad las obligaciones de reporte, no incluye disposiciones específicas relativas a sanciones en caso de incumplimiento por parte de los operadores de centros de datos.

## Código de Conducta Europeo para Centros de Datos

Aunque no se trate de normativas ni reglamentos de cumplimiento obligatorio específicos para la eficiencia energética y la sostenibilidad en los centros de datos, el sector ha desarrollado una serie de códigos de conducta y pactos voluntarios que agrupan a empresas comprometidas con la reducción de su impacto ambiental. Estas iniciativas permiten establecer estándares y mejores prácticas que fomentan la eficiencia energética y la descarbonización, promoviendo una transición más sostenible en la industria.

Uno de estos compromisos es el Código de Conducta Europeo para Centros de Datos (*European Code of Conduct for Energy Efficiency in Data Centres*, EU DC CoC). El EU DC CoC es una iniciativa voluntaria creada por el Centro Común de Investigación (JRC) en respuesta al creciente consumo de energía en los centros de datos y su impacto en el medio ambiente, la economía y la seguridad del suministro energético. Su objetivo es incentivar y guiar a los operadores y propietarios de centros de datos en la reducción del consumo energético de manera rentable, sin comprometer la función crítica de estas instalaciones. [39]

Mediante una mejor comprensión de la demanda energética en los centros de datos, la concienciación y la recomendación de buenas prácticas en eficiencia energética, el EU DC CoC busca lograr ahorros energéticos significativos en este sector de alto consumo eléctrico.

El EU DC CoC establece estándares voluntarios ambiciosos para las empresas que deseen participar (denominadas «Participantes») e identifica y se enfoca en los principales desafíos y soluciones consensuadas, como se detalla en el documento de Buenas Prácticas. Este documento se actualiza anualmente para incorporar los últimos avances tecnológicos que deben implementarse. [40]

Además, un segundo documento, el Marco de Evaluación, complementa al de Buenas Prácticas al hacerlo más orientado a requisitos en lugar de simples recomendaciones. Esto proporciona a los auditores las herramientas necesarias para evaluar si los centros de datos aplican correctamente las prácticas establecidas y permite a los actores del mercado completar sus informes de divulgación para la alineación con la Taxonomía, como parte de su informe no financiero, sin ambigüedades.

Desde su lanzamiento en 2008, más de 500 centros de datos se han unido al EU DC CoC para mejorar su eficiencia energética. Aquellos participantes que demuestren una reducción significativa en su consumo energético pueden optar a los Premios Anuales del EU DC CoC.

## Pacto de Centros de Datos Climáticamente Neutrales

El Pacto de Centros de Datos Climáticamente Neutrales (*Climate Neutral Data Centre Pact*, *CNDCP*) es otra iniciativa voluntaria al igual que el Código de Conducta Europeo para Centros de Datos. El *CNDCP* fue lanzado en 2021 por la industria de los centros de datos en Europa con el objetivo de alcanzar la neutralidad climática para 2030. Este pacto surge como una respuesta del sector a las crecientes demandas regulatorias y sociales para reducir su impacto ambiental, alineándose con los objetivos del Pacto Verde Europeo y el compromiso de la Unión Europea de lograr la descarbonización de la economía. [41]

El *CNDCP* agrupa a más de 100 operadores de centros de datos y 20 asociaciones del sector que representan una parte significativa de la infraestructura digital de Europa. A través de este compromiso, las empresas participantes buscan reducir su huella de carbono, mejorar la eficiencia energética y utilizar fuentes de energía renovable en sus operaciones.

### COMPROMISOS CLAVE DEL CNDCP

Para alcanzar la neutralidad climática en 2030, las empresas adheridas al pacto deben cumplir con una serie de objetivos medibles en cinco áreas principales [42]:

#### ***Eficiencia energética***

- Mejorar la *PUE* mediante la optimización de infraestructuras y la implementación de tecnologías más eficientes.
- Adoptar las mejores prácticas para minimizar el consumo energético sin comprometer el rendimiento de los centros de datos.

#### ***Uso de energía 100 % renovable***

- Garantizar que todos los centros de datos funcionen con electricidad procedente de fuentes totalmente renovables antes de 2030.
- Priorizar contratos de energía verde y el desarrollo de infraestructura propia de generación renovable.

#### ***Uso eficiente del agua***

- Reducir la *WUE* mediante sistemas avanzados de refrigeración y estrategias para la reutilización del agua.
- Diseñar centros de datos con menor dependencia del agua en regiones con escasez hídrica.

#### ***Reutilización del calor residual***

- Implementar sistemas para recuperar y reutilizar el calor generado por los servidores en redes de calefacción urbana o procesos industriales.
- Colaborar con gobiernos y empresas locales para integrar estas soluciones de eficiencia térmica.

#### ***Reciclaje y economía circular***

- Fomentar la reutilización y el reciclaje de equipos para reducir la generación de

residuos electrónicos.

- Aplicar estrategias de circularidad en el diseño de infraestructuras, prolongando la vida útil de los servidores y optimizando su mantenimiento.

## **IMPACTO Y SEGUIMIENTO DEL CNDCP**

El cumplimiento de estos compromisos es supervisado a través de un sistema de auditoría y reporte, en el que las empresas deben demostrar avances periódicos en cada una de las áreas establecidas. Además, el pacto se coordina con la Comisión Europea para garantizar que los objetivos sean realistas y alineados con las políticas climáticas de la UE. [43]

A medida que la demanda de servicios digitales sigue en aumento, el *CNDCP* representa un esfuerzo clave para que la industria avance hacia la sostenibilidad sin comprometer la innovación ni la eficiencia operativa. Contando con el compromiso de las principales empresas tecnológicas y de centros de datos, esta iniciativa refuerza el papel del sector como un actor clave en la transición energética y la lucha contra el cambio climático.

# Uso de agua en los centros de datos

## Introducción: la huella hídrica y los centros de datos

La creciente digitalización de la sociedad ha llevado a una proliferación de centros de datos, infraestructuras críticas que sustentan una amplia gama de servicios en línea. Estas instalaciones, repletas de equipos informáticos que operan las 24 horas del día, los 7 días de la semana, requieren cantidades significativas de recursos, entre ellos el agua. Para comprender el impacto total de los centros de datos en el medio ambiente, es fundamental analizar su relación con la huella hídrica. [44]

La huella hídrica se define como el volumen total de agua dulce que se utiliza para producir los bienes y servicios que consumimos. Esta métrica integral considera tanto el uso directo del agua, que es el agua que se utiliza en nuestras actividades diarias, como el uso indirecto o virtual, que es el agua necesaria para los procesos de producción externos. [29] La huella hídrica se desglosa en tres componentes principales: la huella hídrica verde, que representa el agua de precipitación almacenada en el suelo y utilizada por la vegetación; la huella hídrica azul, que se refiere al agua superficial o subterránea utilizada; y la huella hídrica gris, que es el volumen de agua dulce necesario para asimilar la carga de contaminantes de los procesos productivos. [30]

La operación de los centros de datos está intrínsecamente ligada a la huella hídrica a través de su elevado consumo energético y la necesidad de refrigeración. La generación de la inmensa cantidad de energía que requieren estos centros a menudo implica un uso considerable de agua en las centrales eléctricas, lo que constituye una parte importante de su huella hídrica indirecta [44]. Además, muchos centros de datos utilizan agua directamente en sus sistemas de enfriamiento para disipar el calor generado por los equipos informáticos, lo que contribuye a su huella hídrica azul. La creciente adopción de la IA está impulsando una mayor demanda de capacidad de procesamiento, lo que a su vez intensifica el consumo energético y, por ende, la huella hídrica de los centros de datos. La ubicación geográfica de un centro de datos emerge como un factor determinante en su huella hídrica, especialmente en regiones que ya enfrentan estrés hídrico, donde la demanda adicional de agua para refrigeración puede exacerbar la escasez local. [44]

## El agua como elemento crítico en los sistemas de enfriamiento de centros de datos

El funcionamiento ininterrumpido de los centros de datos depende en gran medida de la capacidad para gestionar el calor generado por sus equipos informáticos. Servidores, *routers*, *switches* y sistemas de almacenamiento operan continuamente, produciendo cantidades significativas de calor como subproducto de la energía eléctrica que consumen para realizar cálculos y almacenar datos. [31] Este calor debe disiparse eficientemente para evitar el sobrecalentamiento, que puede llevar a la disminución del rendimiento, la pérdida de datos y, en casos extremos, el fallo del equipo.

El agua se ha consolidado como un medio de enfriamiento primordial en los centros de datos debido a sus propiedades físicas excepcionales para la transferencia de calor. Su alta capacidad calorífica le permite absorber grandes cantidades de calor sin experimentar un aumento significativo de temperatura. Además, su elevada conductividad térmica facilita la

rápida transferencia de calor desde los componentes electrónicos hacia el agua. La capacidad del agua para enfriar a través de la evaporación también es fundamental en muchos sistemas de enfriamiento. [45] El agua conduce el calor aproximadamente 30 veces mejor que el aire, y su capacidad de enfriamiento es más de cuatro veces superior a la del aire. [46] Esta eficiencia superior en la transferencia de calor hace que el agua sea una opción preferida para enfriar equipos de alta densidad, especialmente en el contexto del creciente uso de la IA, que genera cargas térmicas de trabajo muy elevadas. [47]

Existen diversos mecanismos de enfriamiento basados en agua utilizados en los centros de datos:

- **Torres de enfriamiento evaporativas:** Estos sistemas aprovechan el principio de la evaporación para disipar el calor del agua utilizada en el enfriamiento de los equipos. El agua caliente se bombea a la torre, donde se distribuye sobre un material de relleno mientras un flujo de aire pasa a través de ella. Una porción del agua se evapora, liberando calor a la atmósfera y enfriando el agua restante, que luego se recircula al centro de datos. Este proceso consume agua debido a la evaporación, lo que requiere un suministro constante para reponer las pérdidas. [29]
- **Chillers:** Los enfriadores de agua (*chillers*) son sistemas de refrigeración que disminuyen la temperatura del agua, la cual se bombea a través de serpentines en unidades de tratamiento de aire para enfriar el aire que circula dentro del centro de datos. Los *chillers* pueden ser enfriados por agua, utilizando torres de enfriamiento para disipar el calor, o por aire. [48]
- **Enfriamiento líquido directo (DLC):** Esta tecnología implica la circulación de un líquido refrigerante, que puede ser agua o un fluido especializado, directamente a través de bloques de enfriamiento que están en contacto con los componentes que generan más calor, como los microprocesadores y las tarjetas gráficas. El calor se transfiere al líquido, que luego se enfría en un intercambiador de calor antes de recircular. Los sistemas *DLC* que operan en circuito cerrado minimizan significativamente el consumo de agua. [44]
- **Enfriamiento por inmersión:** En este método, los servidores se sumergen completamente en un tanque lleno de un líquido dieléctrico no conductor que absorbe el calor generado por los componentes electrónicos. El líquido caliente se bombea a través de un intercambiador de calor para enfriarse antes de recircular al tanque. Al igual que el *DLC*, este es un sistema de circuito cerrado con un consumo de agua mínimo. [49]

El consumo de agua varía significativamente entre estos métodos. El enfriamiento evaporativo tiende a ser el más intensivo en agua, con un centro de datos de 1 MW que puede utilizar millones de litros anualmente. [50] El enfriamiento por aire, aunque no consume agua directamente, puede resultar menos eficiente energéticamente. [48] En contraste, el enfriamiento líquido, especialmente las técnicas *DLC* y por inmersión, ofrecen una mayor eficiencia energética y pueden reducir o eliminar la necesidad de un suministro continuo de agua fresca para la refrigeración. [44]

## Sistemas y tecnologías actuales de refrigeración de centros de datos

Las soluciones de refrigeración más habituales consisten en:

- Expulsar el aire caliente al exterior e introducir aire exterior, enfriándolo y haciéndolo

circular por la instalación.

- Reciclar el aire interior enfriándolo, normalmente mediante un diseño de pasillos calientes y fríos para maximizar la eficiencia de la refrigeración.
- Expulsar el aire caliente al exterior y, a continuación, introducir aire exterior preenfriado en la instalación para enfriarla (refrigeración libre), que sólo funciona en los climas más fríos.
- Enfriar o calentar las instalaciones a la temperatura máxima recomendada y sustituir los equipos a medida que vayan fallando. Aunque parezca contradictorio, en algunos casos puede resultar más barato que instalar y mantener otros métodos de refrigeración.

La refrigeración de los centros de datos se puede estructurar en distintos niveles: sistema, subsistemas y placas. A nivel de sistema, enfriar un centro de datos en su totalidad implica una planificación cuidadosa que abarca desde la infraestructura física hasta el consumo energético y la ubicación geográfica. La solución óptima varía según factores como la temperatura, la humedad y las condiciones ambientales dentro del recinto. La selección del sistema más apropiado depende en gran medida del tipo de industria, así como de la carga de trabajo y el nivel de uso que se espera para el centro de datos. La Figura 6 [51] muestra una posible distribución de espacios en un centro energéticamente eficiente. En cuanto a nivel de subsistemas, los bastidores donde se encuentran los equipos informáticos pueden refrigerarse por aire o líquido con distintas configuraciones, como se comentará posteriormente. Finalmente, a nivel de placa se emplea comúnmente aire como medio para la absorción de calor, con elementos como disipadores pasivos, tubos termosifón, cámaras de vapor, ventiladores activos y sopladores, si bien los centros de datos más modernos y potentes hacen uso de refrigeración líquida.

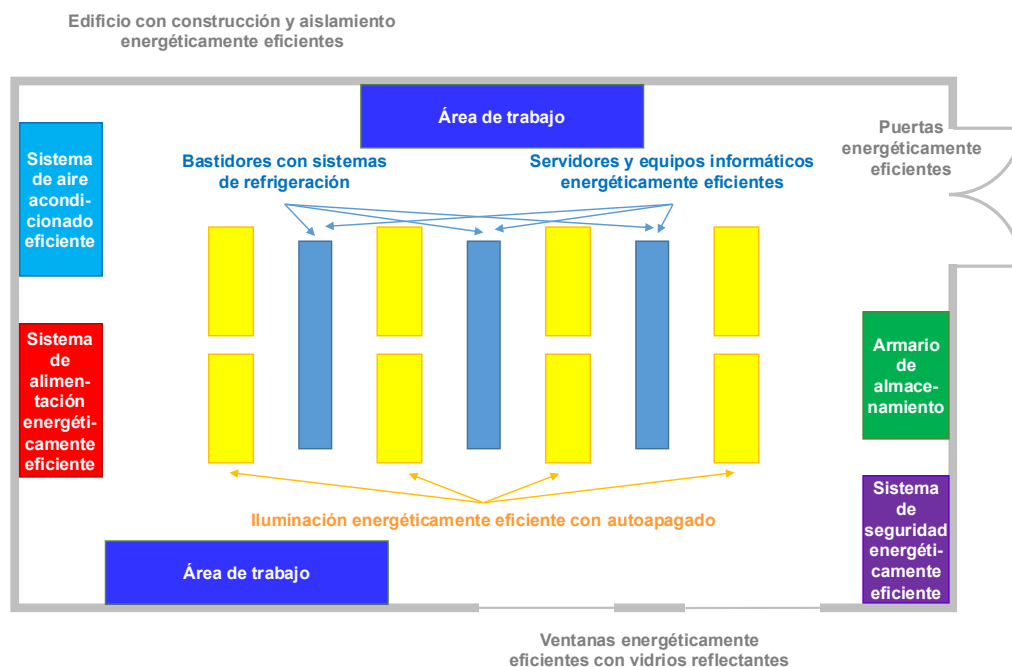


Figura 6. Instalación de centro de datos energéticamente eficiente (adaptado de TechTarget)

Los dos tipos más habituales para el enfriamiento de centros de datos son a refrigeración por aire y la refrigeración líquida.

## REFRIGERACIÓN POR AIRE

Este método de refrigeración es ideal para los centros de datos más pequeños o antiguos, por debajo de los 20 kW por bastidor, que combinan suelos elevados con diseños de pasillos calientes y fríos. El concepto es sencillo: el aire frío se sopla o circula alrededor del hardware, disipando el calor mediante el intercambio de aire caliente con aire frío.

Los sistemas de refrigeración por aire se clasifican generalmente en tres tipos, dependiendo de cómo se controlan los flujos de aire: basados en sala, en fila y en bastidores (Figura 7) [52].

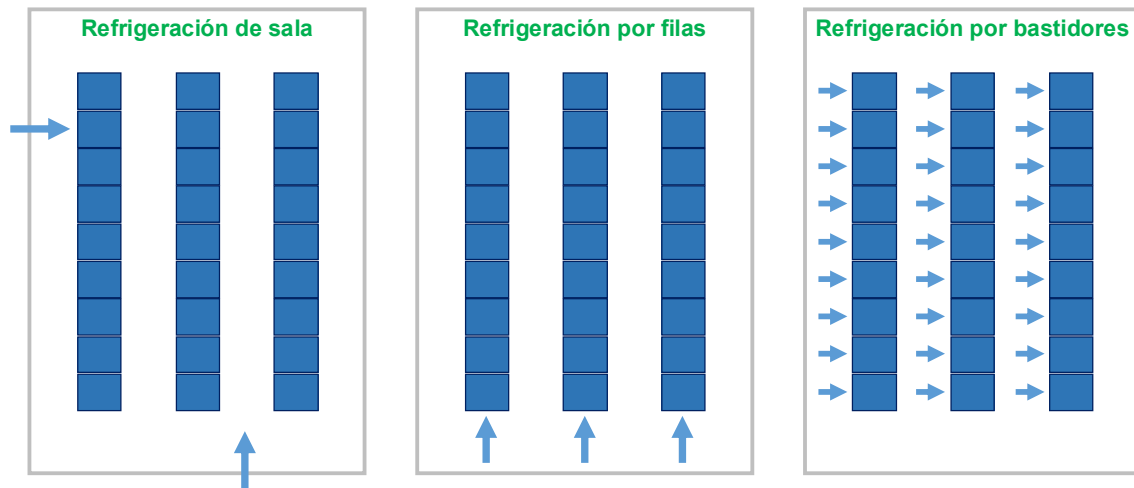


Figura 7. Conceptos básicos de las arquitecturas de refrigeración basadas en salas, filas y bastidores (adaptado de TechTarget)

En los **sistemas de sala** se impulsa refrigerado procedente de unidades de aire acondicionado para salas de ordenadores (*CRAC, Computer Room Air Conditioning*) o de controladores de aire de la sala de ordenadores (*CRAH, Computer Room Air Handler*). [53] El aire puede circular por toda la sala o ventilarse a través de suelos elevados cerca de los equipos. Cuando la unidad envía aire frío, la presión por debajo del suelo elevado aumenta y envía el aire frío a las entradas de los equipos. El aire frío desplaza al aire caliente, que vuelve al *CRAC* o *CRAH*, donde se enfría y recircula. Estos últimos son más eficientes que los *CRAC*, ya que aspiran aire exterior y lo enfrían utilizando agua fría en lugar de refrigerante.

Muchos sistemas de sala incorporan una configuración de pasillos de aire caliente y frío para controlar mejor el flujo de aire y dirigirlo a los equipos, permitiendo una colocación más selectiva de los orificios de entrada y salida, y evitando que el aire caliente y el frío se mezclen, lo que ayuda a ahorrar energía y reducir costes. La configuración también puede utilizar algún tipo de contención para aislar mejor los pasillos calientes y fríos entre sí. En esta distribución, los bastidores de sistemas informáticos se disponen en filas, cada una de ellas orientada en dirección opuesta a la anterior, como muestra la Figura 8 [54]. Los bastidores deben estar lo más llenos posible para evitar espacios vacíos, huecos y aberturas para cables que puedan filtrar aire caliente o frío al pasillo opuesto, haciendo que el sistema de refrigeración trabaje más de lo necesario.

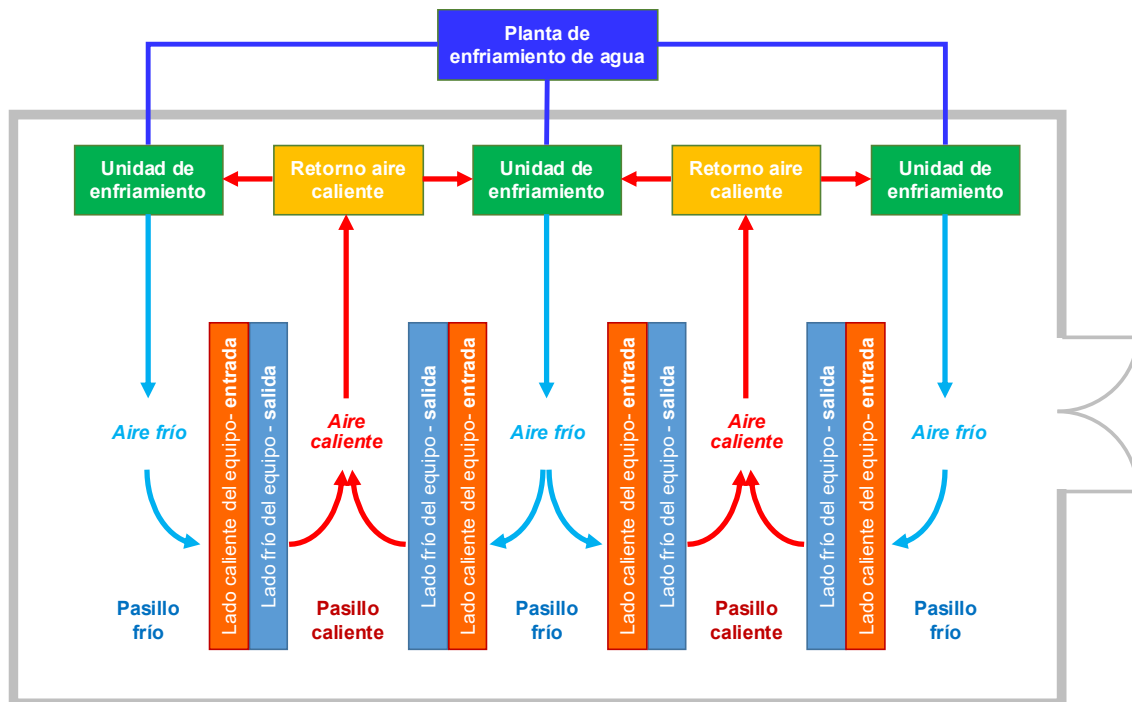


Figura 8. Disposición de enfriamiento de pasillos fríos y calientes (adaptado de TechTarget)

La **refrigeración por filas** es más selectiva y eficaz que un sistema por salas. Cada fila contiene unidades de refrigeración específicas que dirigen el flujo de aire a equipos concretos, reduciendo la potencia de los ventiladores necesaria para dirigir el flujo de aire, lo que contribuye a reducir el consumo de energía y los costes.

Un **sistema basado en bastidores** va un paso más allá al dedicar unidades de refrigeración a bastidores específicos, con lo que se consigue una precisión y eficiencia aún mayores que con los otros enfoques de la refrigeración por aire. Las unidades de refrigeración suelen montarse sobre o dentro de los bastidores, permitiendo adecuar la capacidad de refrigeración a los requisitos específicos de un bastidor, lo que se traduce en un rendimiento y unos costes más predecibles. Sin embargo, requiere muchas más unidades de refrigeración aumentando la complejidad general.

Como **ventajas** de los sistemas de refrigeración por aire hay que destacar que han demostrado ser una herramienta inestimable para proteger los equipos de los centros de datos. Las tecnologías en las que se basa son bien conocidas, están ampliamente implantadas y siguen utilizándose ampliamente en centros de datos de todo el mundo. El personal de los centros de datos está familiarizado con la refrigeración por aire y el mantenimiento es sencillo y cuenta con el respaldo de una amplia experiencia en el sector.

Sus principales **inconvenientes** son la incapacidad para satisfacer las demandas modernas de carga de trabajo, con bastidores de alto rendimiento constituidos por unidades centrales de procesamiento (CPU) y unidades de procesamiento de gráficos (GPU) que superan fácilmente los 30 kW o más, con densidades de potencia térmica mucho más altas que las generaciones anteriores. Los costes de instalación de refrigeraciones por aire, la complejidad añadida y el aumento de costes energéticos hace que supongan un porcentaje significativo de los gastos operativos de los centros de datos. A esto hay que añadir las restricciones y los costes del agua que utilizan los sistemas basados en refrigeración evaporativa o de torres de refrigeración. Además, se requiere un elevado número de ventiladores y bombas de refrigeración, aumentando el ruido ambiental hasta niveles que obligan al personal a llevar dispositivos de protección auditiva.

## SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN LÍQUIDA

Cuando los sistemas basados en enfriamiento por aire no proporcionan el rendimiento de refrigeración deseado, los centros de datos han comenzado a adoptar la refrigeración líquida para algo más que mainframes y superordenadores. El agua y otros líquidos son mucho más eficientes en la transferencia de calor que el aire: entre 50 y 1000 veces más eficientes. La refrigeración líquida promete ayudar a resolver muchos de los problemas que plantean los sistemas de refrigeración por aire, especialmente a medida que aumentan las densidades de computación de alto rendimiento (*HPC*), como entrenamiento de IA, simulaciones científicas, análisis de datos complejos y representación gráfica. [55]

Los sistemas de enfriamiento por agua utilizan este líquido como medio principal para disipar el calor a lo largo del centro de datos. Son especialmente adecuados para entornos con grandes volúmenes de procesamiento o instalaciones de gran escala, ya que ofrecen una alta eficiencia y pueden manejar cargas térmicas mucho más elevadas que los sistemas basados en aire. Esta capacidad les permite adaptarse mejor a fluctuaciones en la demanda térmica durante el día.

A pesar de sus ventajas, los sistemas enfriados por agua implican una inversión mayor en infraestructura. El equipo central, las redes de tuberías y los mecanismos de enfriamiento instalados en los bastidores son significativamente más costosos que sus equivalentes en sistemas de aire acondicionado. Además, existe un riesgo asociado a posibles fugas, por lo que su instalación y mantenimiento deben ser realizados por técnicos especializados, con el fin de proteger el hardware del servidor de cualquier daño.

## CONSUMO DE AGUA DURANTE EL ENFRIAMIENTO

La forma más común de enfriar tanto el aire acondicionado como el agua de refrigeración en los centros de datos es mediante *chillers*. Este sistema distribuye agua fría a las unidades de climatización dentro de las salas técnicas. Un ventilador impulsa el aire a través de un serpentín de agua fría, proporcionando aire acondicionado fresco al equipamiento informático. Una vez que el agua ha absorbido el calor del ambiente, regresa al enfriador para reiniciar el ciclo. [49]

El funcionamiento de estos sistemas se apoya en una unidad de gran tamaño conocida como torre de refrigeración, cuya función es expulsar al exterior el calor absorbido por el sistema. Estas torres son, de hecho, una de las principales fuentes de consumo de agua en los centros de datos tradicionales. Operan introduciendo aire del exterior por los laterales, el cual pasa por una superficie húmeda que provoca la evaporación del agua. Esta evaporación permite disipar el calor, que se expulsa mediante una corriente de aire caliente y húmedo por la parte superior. Una vez enfriada, el agua vuelve al enfriador para continuar con el proceso de refrigeración.

Durante este proceso, las torres de refrigeración pierden agua de tres formas principales (Figura 9):

- **Evaporación**, debido al calor eliminado del circuito de agua del condensador.
- **Purgas**, necesarias para retirar minerales y contaminantes acumulados.
- **Dispersión o arrastre**, que se produce cuando el viento o el ventilador expulsan pequeñas gotas de agua al exterior.

Aunque estas pérdidas pueden ser relativamente pequeñas en condiciones óptimas, la ausencia de sistemas adecuados de control del viento o de tratamiento de agua puede incrementar el consumo total de agua del centro de datos, afectando tanto la eficiencia como la sostenibilidad de la instalación.

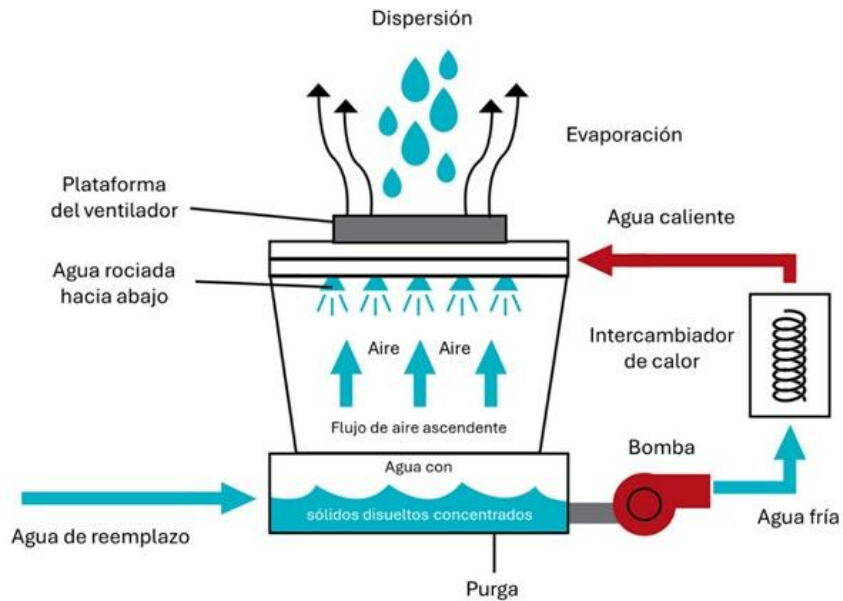


Figura 9. Las torres de refrigeración consumen o pierden agua a través de tres mecanismos: evaporación, purga y dispersión

## SISTEMAS MÁS NOVEDOSOS

Los sistemas más novedosos actúan a nivel más local, utilizando líquidos refrigerantes en lugar de agua. Los actuales se resumen en tres tipos principales de refrigeración líquida. La Figura 10 muestra ejemplos de los dos primeros: GPU con refrigeración líquida directa al chip de Supermicro (izquierda) [56] y unidad de refrigeración Liebert XDU de Vertiv Group con intercambiador de calor líquido-aire (derecha) [57].



Figura 10. GPU con refrigeración líquida directa al chip de Supermicro (izquierda) y unidad de refrigeración Liebert XDU de Vertiv Group con intercambiador de calor líquido-aire (derecha)

- **Directa al chip:** A veces denominada refrigeración directa a la placa, integra el sistema de refrigeración directamente en el chasis del ordenador. Este método utiliza tubos flexibles para llevar líquido dieléctrico no inflamable directamente al chip de procesamiento o al componente de la placa base que genera más calor, como la CPU

o la GPU. El fluido absorbe el calor convirtiéndolo en vapor, que transporta el calor fuera del equipo a través del mismo tubo.

- **Intercambiadores de calor:** Un concepto similar puede aplicarse a nivel de *rack* utilizando intercambiadores de calor. En este caso, se monta un intercambiador en la parte trasera del rack en lugar de su puerta trasera. Los ventiladores del servidor soplan el aire caliente a través del intercambiador, que disipa el calor. El líquido circula por un sistema de circuito cerrado que realiza el intercambio de calor. Aunque el proceso exacto varía de un sistema a otro, la refrigeración por la puerta trasera suele incluir un refrigerante contenido que circula por el intercambiador y un sistema para reducir la temperatura del refrigerante a medida que circula. Este sistema puede adaptarse desde una unidad de refrigeración local hasta un nivel de operación mucho mayor, por ejemplo, transportando el refrigerante por tuberías subterráneas para reducir su temperatura.
- **Por inmersión:** Una tecnología más reciente que se está abriendo paso es la refrigeración por inmersión. En este caso, todos los componentes internos del servidor se sumergen en un fluido dieléctrico no conductor. Los componentes y el fluido están encerrados en un contenedor sellado para evitar fugas. El calor de los componentes se transfiere al refrigerante, un proceso que requiere mucha menos energía que otros métodos. La refrigeración por inmersión puede ser monofásica o bifásica. Con la refrigeración monofásica, el refrigerante circula y se enfría continuamente para disipar el calor. En un sistema bifásico, se utiliza un refrigerante con un punto de ebullición bajo. Cuando el refrigerante hierve, se convierte en vapor y asciende hasta la tapa del recipiente, donde se enfría y se condensa de nuevo a líquido.

Como **ventajas** de la refrigeración líquida hay que destacar que puede conducir el calor mucho mejor que el aire, permitiendo gestionar las densidades crecientes de los centros de datos de forma más eficaz, ayudando a acomodar aplicaciones de cálculo intensivo. Además, la refrigeración líquida reduce significativamente el consumo de energía y utiliza menos agua que muchos sistemas de refrigeración por aire, lo que se traduce en menores gastos operativos y mayor sostenibilidad. La refrigeración líquida también ocupa menos espacio, produce menos ruido y ayuda a prolongar la vida útil de los equipos informáticos.

Sus principales **inconvenientes** son unos costes de inversión mucho mayores, y el riesgo de fugas de líquido, especialmente con la refrigeración directa al chip, donde podría tener un efecto devastador en el hardware. La refrigeración líquida también requiere que los operarios aprendan nuevas habilidades y adopten un nuevo sistema de gestión, lo que puede representar costes operativos adicionales. También podría implicar la contratación de nuevo personal o consultores, incrementando los costes para la empresa. Además, el mercado de la refrigeración líquida aún está evolucionando, con una amplia gama de tecnologías, lo que da lugar a productos patentados y al riesgo de dependencia de un proveedor.

## FACTORES DE DECISIÓN DEL TIPO DE SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE CENTROS DE DATOS

A la hora de elegir entre refrigeración por aire y refrigeración líquida los principales factores que deben considerarse son:

- **Precio:** se considera que los costes de instalación de la refrigeración líquida son mayores que los basados en aire, pero para bastidores de 10 kW la inversión es similar. Además, la refrigeración líquida consume menos energía y agua, lo que puede ser especialmente importante en zonas donde escasea el agua. Por otro lado, el riesgo

de dependencia del proveedor, la formación del personal especializado y la gestión del sistema de refrigeración líquida podría influir negativamente en los costes de la instalación. Los sistemas informáticos también deben tenerse en cuenta, ya que la refrigeración líquida permite soportar mayores densidades de computación, al tiempo que reduce la huella del centro de datos, lo que conduce a una mejor utilización del espacio y menores costes.

- **Facilidad de instalación y mantenimiento:** En la refrigeración por aire, el funcionamiento del equipo y el cambio de componentes suelen ser sencillos y rara vez afectan a los propios componentes del ordenador. Aunque tiene requerimientos, como el tratamiento continuo del agua o el mantenimiento mecánico, es una tecnología fiable y consolidada. Al considerar la refrigeración líquida, los técnicos requerirán en general formación especializada o mantenimientos llevados a cabo por empresas externas. Por ejemplo, si hay que sustituir placa de memoria de un servidor que utiliza refrigeración por inmersión habría que sacar el servidor del líquido dieléctrico, que no es una tarea trivial, y limpiar el líquido de los componentes. El líquido también puede requerir una manipulación especial porque es peligroso o plantea problemas medioambientales, lo que aumenta la complejidad.
- **Sostenibilidad:** Los operadores de centros de datos están sometidos a más presión que nunca para hacerlos más sostenibles. Esta presión no sólo procede de los clientes, sino también de los empleados, accionistas, empresas de inversión, gobiernos y el público en general. Las organizaciones que avanzan hacia prácticas más ecológicas en los centros de datos deberían considerar la refrigeración líquida frente a la refrigeración por aire, ya que utiliza menos electricidad y agua y puede acomodar más fácilmente cargas de trabajo y volúmenes de datos más densos. Dada la creciente presión para apoyar una mayor sostenibilidad, la refrigeración líquida podría convertirse en la única opción viable, por lo que las organizaciones deben prepararse para la transición.
- **Ubicación:** La ubicación puede ser un factor importante a la hora de elegir entre la refrigeración por aire y la refrigeración líquida. Aunque un centro de datos cerca del Ártico puede utilizar el abundante aire frío para reducir las temperaturas de funcionamiento, es preciso filtrar el aire exterior y regular su humedad. Por otro lado, en un centro de datos situado en un clima más cálido o cerca de fábricas donde no puede utilizarse el aire exterior puede que la refrigeración líquida sea una opción más viable, igual que en un entorno urbano densamente poblado, donde debe aprovecharse al máximo el limitado espacio disponible. No hay que olvidar las normativas locales o ventajas fiscales que también pueden influir a la hora de elegir entre refrigeración por aire o líquida.
- **Futuro:** En los últimos años, el desarrollo de IA y las mayores densidades de computación obligarán a los centros de datos a aprovechar mejor el espacio y a mejorar la eficiencia. En algún momento, la refrigeración líquida podría convertirse en la única opción viable. Aunque no es algo urgente, los centros de datos deberían estar preparados para el cambio.
- **Madurez tecnológica:** Los intercambiadores de calor son cada vez más habituales en los centros de datos, y otras formas de refrigeración líquida han empezado a dar pasos importantes. Sin embargo, la refrigeración líquida sigue siendo una industria relativamente joven, por lo que, en un presente que evoluciona rápidamente, es difícil predecir qué tecnologías liderarán el mercado, cómo se estandarizarán o qué esperar de aquí a cuatro o cinco años. La refrigeración por aire está muy consolidada, pero es probable que su viabilidad a largo plazo sea limitada. Los centros de datos que no

necesiten tomar una decisión precipitada quizá prefieran dar más tiempo a la refrigeración líquida para que madure, mientras que los que ya están al límite de su capacidad deberían considerar el cambio a corto plazo.

## FUTUROS SISTEMAS Y TECNOLOGÍAS DE REFRIGERACIÓN DE CENTROS DE DATOS

Aunque la refrigeración líquida sigue siendo relativamente nueva, hay otras tecnologías de refrigeración de centros de datos que podrían implantarse a corto y medio plazo, como hacer partícipe a la naturaleza o el uso de IA para gestionar la refrigeración:

- La **refrigeración geotérmica** utiliza la temperatura casi constante de la Tierra por debajo del nivel de la superficie para refrigerar. Se utiliza un sistema de tuberías de circuito cerrado con agua u otro refrigerante que discurre por pozos verticales subterráneos, llenos de un líquido que transfiere el calor. El centro de datos de Iron Mountain en el oeste de Pensilvania, Verne Global en Islandia y Green Mountain en Noruega utilizan refrigeración geotérmica para sus centros de datos.
- La **refrigeración evaporativa** aprovecha el descenso de temperatura que se produce cuando el agua se expone al aire en movimiento y empieza a evaporarse. Un ventilador hace pasar el aire caliente del centro de datos a través de una almohadilla humedecida con agua o refrigerante y, a medida que el líquido se evapora, el aire se enfría y vuelve a introducirse en el centro de datos. Puede costar una fracción de un *CRAH* y funciona mejor en climas de baja humedad.
- La **refrigeración solar** convierte el calor del sol en frío que puede utilizarse en los sistemas de refrigeración por aire de los centros de datos. El sistema recoge la energía solar y utiliza un proceso de refrigeración térmico para reducir la temperatura del aire en un edificio. Esto es útil en zonas con mucha luz solar o para centros de datos que buscan complementar su refrigeración actual con un método más respetuoso con el medio ambiente.
- La **refrigeración Kyoto** es una mejora del método de refrigeración libre que utiliza una rueda térmica para controlar los flujos de aire caliente y frío a través del centro de datos. El aire caliente interno se expulsa al exterior a medida que la rueda gira; el aire exterior enfría entonces la rueda y el aire que se introduce de nuevo en la instalación. Utiliza entre un 75 % y un 92 % menos de energía para funcionar que otros sistemas *CRAH*, reduce las emisiones de dióxido de carbono y elimina la necesidad de agua en el sistema de refrigeración. Esta tecnología se utiliza en el centro de datos de United Airlines en las afueras de Chicago y en el de HP en las afueras de Toronto.
- **Uso de tecnología inteligente para la refrigeración de centros de datos:** Muchas tecnologías novedosas de refrigeración de centros de datos requieren una inversión inicial significativa, por lo que una posible forma de ahorrar es el uso de asistentes inteligentes, IA y tecnologías de aprendizaje automático para supervisar las instalaciones de forma más eficiente y realizar ajustes en tiempo real para garantizar temperaturas y niveles de humedad óptimos. Google, por ejemplo, utiliza controles de temperatura inteligentes para reducir la producción de calor y el uso de refrigeración. La empresa también ha utilizado su producto DeepMind AI para reducir el uso de energía de refrigeración en un 40 % en 18 meses. OneNeck IT Solutions han desarrollado robots de refrigeración que pueden desplazarse por las instalaciones, controlando las temperaturas y los niveles de humedad de determinados armarios de servidores.

## Requisitos de calidad del agua en centros de datos

La calidad del agua utilizada en los sistemas de enfriamiento de los centros de datos es un factor crítico que afecta la eficiencia, la fiabilidad y la vida útil de los equipos. El agua sin tratar puede contener impurezas que provocan corrosión, incrustaciones y crecimiento microbiológico, lo que reduce la eficiencia de la transferencia de calor, obstruye las tuberías y puede dañar los costosos equipos informáticos. [58]

Los principales parámetros de calidad del agua que se exigen en los centros de datos incluyen:

- **pH:** Debe mantenerse dentro de un rango específico para evitar la corrosión de los metales y la formación de incrustaciones minerales. Generalmente, se recomienda un pH entre 6,5 y 8,5 para los sistemas de enfriamiento con agua. [59] Tanto los sistemas de circuito cerrado como los de circuito abierto suelen buscar intervalos entre 7,0 y 9,0, aunque los sistemas abiertos pueden sufrir fluctuaciones debidas a la evaporación y requieren ajustes con reactivos químicos.
- **Dureza:** La dureza del agua, causada principalmente por las concentraciones de iones de calcio y magnesio, puede llevar a la formación de incrustaciones en los tubos de refrigeración y los intercambiadores de calor. Muchos diseños tienen como objetivo una dureza inferior a 100-150 mg de  $\text{CaCO}_3$  por litro (ppm). Cuando la dureza es demasiado alta, se introducen ablandadores de agua u otros métodos de tratamiento para mitigar la formación de incrustaciones. En la mayoría de las ocasiones, se recomienda mantener los niveles de calcio y magnesio por debajo de 1,0 mg/L expresados como  $\text{CaCO}_3$ . [59]
- **Alcalinidad:** La alcalinidad actúa como un amortiguador que ayuda a estabilizar el pH del agua, compensando cambios bruscos y protegiendo las superficies de los materiales. Suele mantenerse en un rango moderado (aproximadamente entre 50 y 150 mg/L expresados como  $\text{CaCO}_3$ ).
- **Conductividad:** Indica la cantidad de sólidos disueltos en el agua. Una alta conductividad puede aumentar el riesgo de corrosión. Se recomienda mantener la conductividad por debajo de un cierto umbral, como 10,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . [59] En los sistemas «directo a chip», que exigen agua ultrapura para garantizar la máxima seguridad de los equipos, la conductividad puede mantenerse por debajo de 2-5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En cambio, los sistemas de agua fría de circuito cerrado pueden tolerar niveles ligeramente superiores (del orden de unos cientos de  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), siempre que se aplique un tratamiento continuo (como la desionización) para evitar la corrosión.
- **Sólidos disueltos totales (TDS):** Un alto nivel de *TDS* puede contribuir a la formación de incrustaciones (transferencia de calor poco eficaz) y a la corrosión. En los sistemas de recirculación, como los diseños de circuito cerrado, los valores de *TDS* suelen mantenerse por debajo de 500 mg/L. En los sistemas que utilizan agua desionizada muy pura (como en la refrigeración «directa a chip»), los *TDS* se mantienen muy bajos, a menudo por debajo de 100 mg/L, para evitar la formación de depósitos. Por tanto, se recomienda mantener los *TDS* por debajo de 100 mg/L.
- **Contenido microbiológico:** El crecimiento de bacterias, algas y otros microorganismos puede obstruir las tuberías, reducir la eficiencia de la transferencia de calor y la corrosión (por formación de biopelículas) y, en algunos casos, representar un riesgo para la salud (por ejemplo, legionelosis). Es esencial controlar el crecimiento microbiológico, manteniendo el agua razonablemente limpia y libre de bacterias, fijando como objetivo

mantener los recuentos microbianos muy bajos —para muchos sistemas, esto significa por debajo de 10 unidades formadoras de colonias (UFC) por mL— con un control continuo y tratamientos biocidas cuando sea necesario. Como norma general, los sistemas han de presentar valores inferiores a 100 UFC/mL. [58]

- **Silicio (o sílice, SiO<sub>2</sub>):** Aunque no siempre se considera un como un parámetro crítico, un nivel elevado de silicio (a menudo presente en forma de sílice) puede precipitar y causar depósitos en las superficies de intercambio de calor. La práctica del sector es mantener los niveles de silicio lo más bajos posible, y muchos sistemas emplean métodos de filtración para eliminar eficazmente las partículas de sílice. Se recomienda mantener los niveles por debajo de 150 mg/L para evitar la formación de incrustaciones. [59]
- **Cloruro (Cl):** Los iones cloruro son conocidos por favorecer la corrosión, especialmente en aleaciones como el acero inoxidable o el cobre. Los sistemas de refrigeración suelen requerir que las concentraciones de cloruro se mantengan muy bajas (a menudo por debajo de 50 mg/L, llegando a valores menores a 0,5 mg/L en los sistemas más sensibles), con un estricto control y tratamiento si se utiliza agua regenerada o reciclada. De forma genérica, se recomienda mantener los niveles por debajo de 10 mg/L. [60]
- **Oxígeno disuelto:** Al igual que para otros parámetros comentados, niveles altos de oxígeno disuelto en el agua pueden acelerar la corrosión de los componentes metálicos del sistema de enfriamiento. [61]
- **Turbidez:** La turbidez, una medida de la claridad del agua, debe mantenerse baja, idealmente por debajo de 1 NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez). [62]

Los intervalos y valores recomendados para estos parámetros pueden variar ligeramente dependiendo del sistema de enfriamiento específico utilizado. [63] Por ejemplo, los sistemas de enfriamiento líquido directo suelen tener requisitos de calidad del agua más estrictos que las torres de enfriamiento evaporativas debido a la proximidad del agua a los componentes electrónicos sensibles.

## VARIACIÓN SEGÚN EL TIPO DE SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Los distintos métodos de refrigeración exigen diferentes niveles de exigencia. La Tabla 4 muestra un resumen comparativo:

Tabla 4. Requisitos del agua utilizada en distintos sistemas de refrigeración

Parámetro	Refrigeración directa al chip	Sistemas de circuito cerrado (agua refrigerada)	Sistemas de circuito abierto (torres de refrigeración)
<b>pH</b>	7,0-8,5 (control más estricto debido al contacto directo con el equipo)	6,5-9,0	7,0-9,0 (ajustado según sea necesario para contrarrestar los efectos de la evaporación)
<b>Conductividad</b>	Ultrabaja ( $<2-5 \mu\text{S/cm}$ )	Baja a moderada (por ejemplo, $200-500 \mu\text{S/cm}$ )	Variable (debe controlarse mediante purgas periódicas)
<b>TDS</b>	Muy bajo ( $<100 \text{ mg/L}$ )	Moderado (normalmente, $<500 \text{ mg/L}$ )	Tiende a concentrarse con la evaporación; es necesaria una descarga periódica
<b>Cloruros</b>	Muy bajo ( $<50 \text{ mg/L}$ )	Bajo ( $<50-100 \text{ mg/L}$ )	Puede aumentar debido a la evaporación; es esencial un control estricto
<b>Silicio</b>	Mínimo (requiere agua tratada de alta calidad)	Bajo (precisa una filtración adecuada)	Debe controlarse mediante filtración y limpieza regular
<b>Dureza</b>	Ultrabaja (para evitar cualquier riesgo de incrustación)	Por debajo de $100-150 \text{ mg/L}$ , como $\text{CaCO}_3$	Similar a la de circuito cerrado, pero exige un control estricto
<b>Alcalinidad</b>	Baja a moderada ( $10-100 \text{ mg/L}$ como $\text{CaCO}_3$ )	Moderada ( $50-150 \text{ mg/L}$ , como $\text{CaCO}_3$ )	Se gestiona ajustando con reactivos químicos para mantener el equilibrio del pH
<b>Recuento microbiano</b>	Extremadamente bajo ( $<1-10 \text{ UFC/mL}$ ; crítico para evitar biopelículas)	Bajo ( $<10 \text{ UFC/mL}$ ; se mantiene con dosificación de biocidas)	Normalmente controlado ( $<10-50 \text{ UFC/mL}$ ) mediante biocidas

**Nota:** Estos intervalos son indicativos. Los requisitos reales dependen de las recomendaciones del fabricante, la sensibilidad específica del equipo, la calidad del agua local y las tecnologías de tratamiento del agua elegidas.

### CONSIDERACIONES ADICIONALES

- **Fuente y tratamiento del agua:** Muchos centros de datos pueden abastecerse de agua potable, agua regenerada o efluentes tratados. El agua reciclada, a pesar de sus ventajas en el reciclaje de recursos, puede requerir un tratamiento adicional para que los parámetros (especialmente cloruros, dureza y recuentos microbianos) estén dentro de los límites aceptables para los equipos de refrigeración sensibles.

- **Diseño y funcionamiento del sistema:**
  - Los sistemas de **refrigeración directa al chip** requieren la calidad de agua de calidad más estricta porque el refrigerante líquido está en contacto muy estrecho con los componentes electrónicos.
  - Los **sistemas de circuito cerrado** se benefician de estar aislados de los contaminantes ambientales, aunque siguen necesitando un tratamiento regular del agua (por ejemplo, desionización, inyecciones de biocidas) para mantener bajos los niveles de contaminantes a lo largo del tiempo.
  - Los **sistemas de circuito abierto** (torres de refrigeración) se enfrentan intrínsecamente a la evaporación, que aumenta las concentraciones de sólidos disueltos y sales. Normalmente incorporan purgas programadas y tratamientos químicos para contrarrestar estos efectos.
- **Control y mantenimiento:** La supervisión continua es esencial. Muchas instalaciones colocan sensores en línea para comprobar parámetros como el pH, la conductividad y los niveles microbianos. Un mantenimiento proactivo, que incluya muestreos periódicos, ajustes del tratamiento y limpieza del sistema de filtración, permite mantener la calidad del agua dentro de los umbrales deseados durante largos periodos de funcionamiento.

## METODOLOGÍAS APLICADAS

Para asegurar la calidad del agua necesaria, se aplican diversos tratamientos y metodologías:

- **Filtración:** Se utiliza para eliminar partículas suspendidas, sedimentos y otras impurezas del agua, utilizando filtros de diferentes tipos como filtros de pantalla, de disco y de arena. [58]
- **Tratamiento químico:** Se añaden productos químicos al agua para prevenir la formación de incrustaciones, la corrosión y el crecimiento microbiológico, o para controlar el pH. Esto incluye el uso de biocidas para controlar microorganismos e inhibidores de corrosión para proteger las superficies metálicas. [58]
- **Ablandamiento por intercambio iónico:** Este proceso se utiliza para reducir la dureza del agua, intercambiando los iones de calcio y magnesio por iones de sodio, lo que ayuda a prevenir la formación de incrustaciones. [64]
- **Ósmosis inversa y nanofiltración:** Estas tecnologías de membrana se utilizan para eliminar sólidos disueltos, materia orgánica y otras impurezas del agua, produciendo agua de alta calidad para su uso en los sistemas de enfriamiento. [64]
- **Esterilización UV:** La luz ultravioleta se utiliza para inactivar o matar bacterias y otros microorganismos presentes en el agua, sin necesidad de añadir productos químicos. [58]
- **Desgasificación:** Se utiliza principalmente para eliminar el oxígeno disuelto del agua, lo que ayuda a reducir la velocidad de corrosión de los componentes metálicos. [64]

En España, la legislación aplicable a la calidad del agua de consumo humano se establece principalmente en el Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, que transpone la Directiva (UE) 2020/2184. [65] Este decreto deroga el anterior Real Decreto 140/2003 y establece los criterios técnico-sanitarios para la calidad del agua destinada al consumo humano, que incluye el agua utilizada en diversos procesos industriales. Para los vertidos de aguas residuales

industriales a cauces públicos, la Orden AAA/2056/2014 establece los requisitos y procedimientos para la obtención de la autorización correspondiente. [66] Además, las comunidades autónomas y los municipios pueden tener regulaciones específicas para los vertidos a la red de alcantarillado. [67] El Sistema Nacional de Información de Aguas de Consumo (SINAC) recopila y gestiona los datos sobre la calidad del agua en todo el territorio español. [68]

A nivel europeo, la Directiva (UE) 2020/2184 es la principal normativa que regula la calidad del agua destinada al consumo humano. [68] Otras directivas relevantes incluyen la Directiva 2006/118/CE sobre la protección de las aguas subterráneas y la Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. [69] La Directiva (UE) 2023/1791 de Eficiencia Energética (*EED*) también incluye requisitos para el uso eficiente del agua y obliga a los centros de datos a informar sobre su consumo. [67] Asimismo, el Reglamento de la Taxonomía de la UE y la Directiva sobre la Presentación de Informes de Sostenibilidad Corporativa (*CSRD*) pueden requerir la divulgación de información relacionada con el uso del agua. [67]

## Consumo promedio de agua en centros de datos: un análisis comparativo

La cantidad de agua utilizada por los centros de datos varía considerablemente en función de diversos factores, como el tamaño de la instalación, la ubicación geográfica, el tipo de sistema de enfriamiento empleado y la eficiencia de las prácticas de gestión del agua. [47] Un centro de datos relativamente pequeño, con una capacidad de 1 MW y que utiliza métodos de enfriamiento tradicionales, puede llegar a consumir hasta 26 millones de litros de agua al año. [31] En el otro extremo, los centros de datos de hiperescala, diseñados para proveedores de servicios en la nube y grandes empresas de internet, pueden utilizar un promedio de 2,1 millones de litros de agua por día. [50] Un estudio realizado por Virginia Tech clasificó a la industria de los centros de datos entre los diez principales consumidores de agua dentro del sector comercial e industrial en los Estados Unidos. [59]

A continuación, se presentan datos comparativos sobre el consumo de agua de algunas de las empresas más importantes del sector durante los últimos cinco años:

- **Google:** En el año 2023, el consumo total de agua de los centros de datos y oficinas de Google alcanzó los 24 mil millones de litros. [70]. Esta cifra representa un aumento con respecto a los 16,3 mil millones de litros consumidos en 2021 [71] y los 21,2 mil millones de litros en 2022. [50] El centro de datos de Google ubicado en Council Bluffs, Iowa, fue el de mayor consumo en 2023, con aproximadamente 3,7 mil millones de litros. [72] El incremento en el consumo de agua de Google en los últimos años se ha atribuido, en parte, a la expansión de sus productos y servicios de IA. [73]
- **Microsoft:** En el año 2022, el consumo de agua de Microsoft para sus centros de datos se elevó a 6,4 millones de m<sup>3</sup>, lo que supuso un aumento del 34 % en comparación con el año anterior. [74] En el año 2023, el promedio de su *WUE* fue de 0,30 L/kWh. [35] A pesar del aumento en el consumo, Microsoft está implementando activamente estrategias para mejorar la eficiencia y reducir su huella hídrica, incluyendo el desarrollo de centros de datos con un consumo nulo de agua para la refrigeración. [35]
- **AWS:** Amazon Web Services no publica cifras absolutas sobre su consumo de agua. En cambio, se enfoca en la eficiencia en el uso del agua, con *WUE* de 0,18 L/kWh en 2023, lo que representa una mejora en comparación con los 0,25 L/kWh registrados

en 2021. [34] AWS se ha comprometido a alcanzar un estado de «*water positive*» para el año 2030, lo que implica devolver más agua a las comunidades y al medio ambiente de la que utiliza en sus operaciones directas. [75] Esta estrategia proactiva sugiere un enfoque en la mitigación del impacto hídrico a través de la eficiencia y la reposición, sin necesariamente divulgar las cifras totales de consumo. [76]

# Evolución del impacto de los centros de datos

A lo largo de las últimas décadas, los centros de datos han experimentado una transformación sin precedentes, pasando de ser salas especializadas con servidores individuales a infraestructuras globales de hiperescala que sustentan la economía digital. Este crecimiento ha traído consigo un impacto significativo en diversos ámbitos, desde el consumo energético y la emisión de gases de efecto invernadero hasta el uso de agua y la gestión de residuos electrónicos.

En sus inicios, los centros de datos operaban con tecnologías menos eficientes, lo que resultaba en un elevado consumo energético por unidad de procesamiento. Sin embargo, la evolución en la arquitectura de hardware, la virtualización y la adopción de modelos en la nube han permitido optimizar el uso de los recursos, reduciendo la huella ecológica relativa de estas infraestructuras. A pesar de estos avances, la creciente demanda de IA, *big data* y servicios en la nube sigue impulsando una escalada en la necesidad de energía y refrigeración, generando nuevos desafíos en términos de sostenibilidad.

Este apartado explora la evolución del impacto de los centros de datos, analizando cómo han cambiado sus efectos ambientales en un contexto de creciente digitalización global.

## Crecimiento de los centros de datos

La distribución geográfica de los centros de datos ha experimentado una evolución significativa en las últimas décadas, impulsada por factores como la digitalización, la demanda creciente de servicios en la nube y el desarrollo de tecnologías avanzadas como la IA. Inicialmente, los centros de datos se concentraban en regiones con acceso a infraestructuras tecnológicas avanzadas y grandes mercados de consumo, como Estados Unidos y algunas áreas de Europa. Sin embargo, con la globalización del acceso a internet y el auge de la computación en la nube, se ha producido una expansión hacia nuevas ubicaciones estratégicas. [77]

En Europa, la proliferación de centros de datos ha seguido un patrón de crecimiento marcado por la necesidad de proximidad a los usuarios, el acceso a fuentes de energía renovable y la estabilidad de la infraestructura digital. Países como Alemania, los Países Bajos, Irlanda y los países nórdicos han emergido como nodos (*hubs*) clave, mientras que España ha ido ganando relevancia como punto de conexión entre Europa, África y América Latina. [78]

Esta evolución en la distribución también ha estado influenciada por consideraciones medioambientales y regulatorias. A medida que aumenta la presión para reducir la huella de carbono y la huella hídrica de la industria, los operadores de centros de datos buscan ubicaciones con climas fríos para optimizar la refrigeración natural y con acceso a energías renovables para disminuir su impacto ecológico. Sin embargo, las políticas gubernamentales y los incentivos fiscales también han jugado un papel clave en la atracción de nuevas inversiones en el sector.

Según los datos disponibles en marzo de 2025 en la plataforma de estadísticas e informes Statista (Figura 11), Estados Unidos encabeza la lista de países líderes en número de centros de datos con un total de 5426 centros de datos, reflejando su papel como *hub* tecnológico global, impulsado por grandes empresas de servicios en la nube como AWS, Microsoft Azure y Google Cloud [79].

A gran distancia le siguen Alemania (529) y Reino Unido (523), que representan los principales nodos digitales en Europa, gracias a su infraestructura avanzada y su papel estratégico en redes de telecomunicaciones. España figura en esta lista con 143 centros de datos, una cifra que no deja de crecer gracias a la continua expansión del sector. Las regiones de Madrid y Cataluña concentran actualmente la mayor parte de las infraestructuras, actuando como polos estratégicos por su conectividad y presencia empresarial. No obstante, destaca especialmente el caso de Aragón, que ya se posiciona como la segunda comunidad autónoma en capacidad instalada y que, según las proyecciones, podría incluso duplicar a Madrid en número de centros de datos una vez se materialicen los proyectos anunciados. [79]

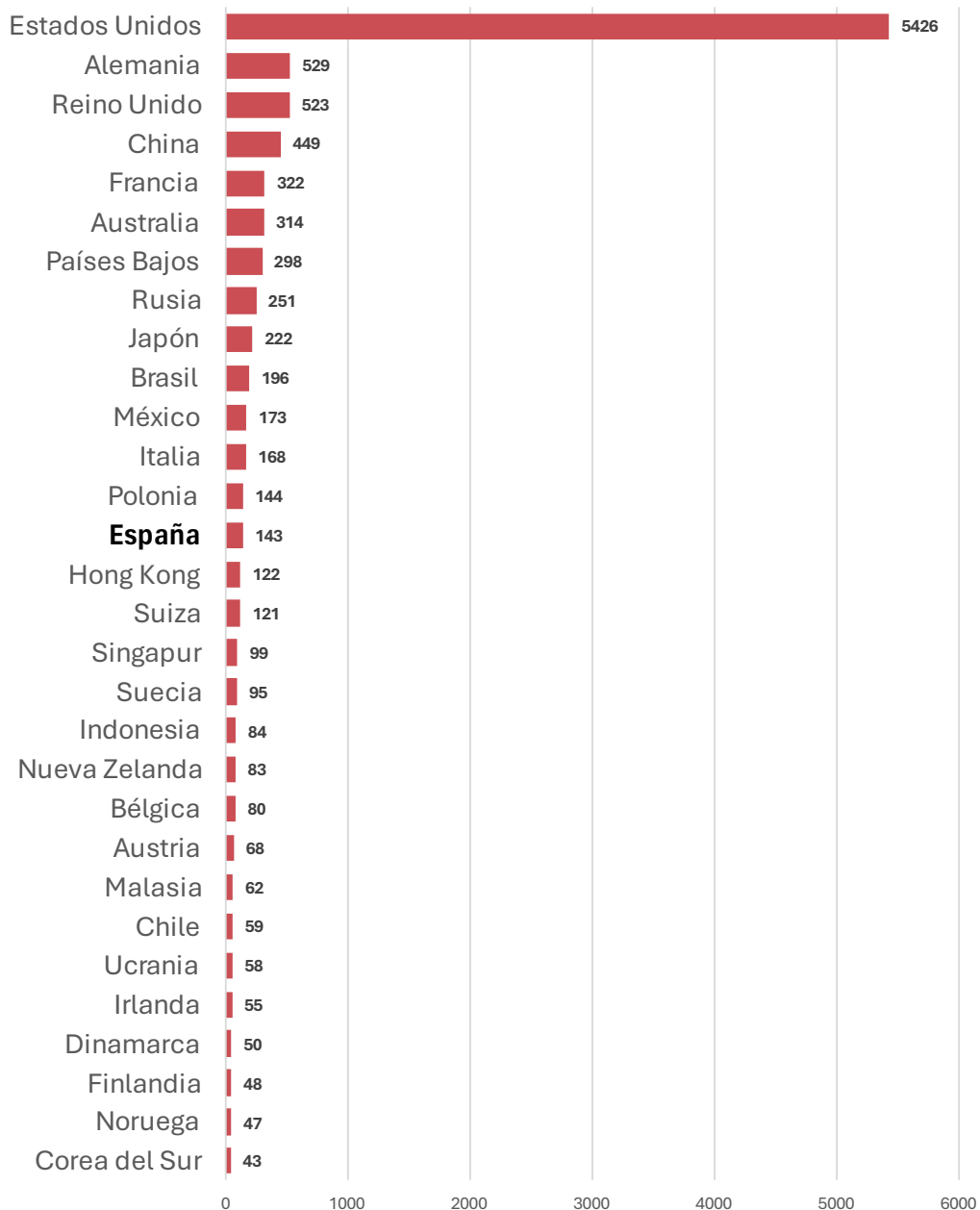


Figura 11. Países líderes por número de centros de datos (marzo 2025). (Adaptado del gráfico de Statista)

## Efecto en la crisis hídrica

Durante los últimos años, los operadores de centros de datos han sido objeto de escrutinio por el enorme consumo eléctrico requerido para almacenar información digital. Sin embargo, en el contexto del cambio climático y la creciente preocupación por la crisis del agua, está cobrando protagonismo la cantidad de agua que muchas instalaciones necesitan para gestionar su refrigeración. [81]

Según científicos de la Comisión Europea, la sequía del 2022 fue la peor en 500 años. El Observatorio Europeo de la Sequía informó que el 63 % de las tierras de la Unión Europea y el Reino Unido se vieron gravemente afectadas. La escasez de agua ha generado alarma incluso en países que antes se consideraban con suministro abundante.

Un análisis satelital reciente reveló un problema aún más preocupante: la disminución constante del agua subterránea almacenada en acuíferos en toda Europa entre 2002 y 2022. Esta pérdida, atribuida principalmente al cambio climático, se estima en un promedio de 84 gigatoneladas por año desde el comienzo del siglo XXI. La creciente frecuencia de sequías severas ha provocado que se bombee agua subterránea desde mayores profundidades para compensar la falta de lluvias, lo que, unido a olas de calor récord, impide que los acuíferos se recuperen como lo hacían antes. [82]

### MAYOR PRESIÓN SOBRE LA SOSTENIBILIDAD HÍDRICA DE LOS CENTROS DE DATOS

A medida que se agrava la crisis del agua, organizaciones, científicos y asociaciones están lanzando advertencias. A finales de marzo de 2023 se celebró en Nueva York la Conferencia del Agua de la ONU 2023, la primera desde 1977. António Guterres, secretario general de la ONU, expresó que esta conferencia debería «dar lugar a una ambiciosa Agenda de Acción por el Agua». [83]

Se espera una mayor intervención gubernamental decisiva en el uso del agua en los próximos años. A esto se suma la presión del sector inversor por una mayor transparencia en los riesgos, lo que está impulsando el crecimiento de los compromisos medioambientales, sociales y de gobernanza (ESG). Algunas regulaciones que podrían impactar al sector de centros de datos incluyen:

- Imposición de un certificado de eficiencia hídrica (*WPC*) para propiedades públicas y privadas, o incluir la medición del agua fría en la calificación energética actual (*EPC*).
- Aumento del precio del agua mediante un impuesto ecológico. En Dinamarca, el consumo per cápita se redujo a la mitad (de casi 200 L/día en la década de 1990 a 104 L/día en 2020), debido principalmente al precio del agua. No obstante, en el contexto actual de alta inflación, esta medida es poco probable en el corto plazo.

### COMPROMISOS DEL SECTOR DE CENTROS DE DATOS CON LA CAUSA HÍDRICA

El *CNDCP*, que representa al 90 % del sector europeo de centros de datos, ha propuesto a la Comisión Europea reducir voluntariamente su consumo de agua a un máximo de 400 mL por kWh de potencia informática para el año 2040. [84]

Esta propuesta se enmarca en el objetivo del *CNDCP* de lograr neutralidad climática en el sector para 2030, adelantándose a los objetivos de la UE para 2050. El grupo se formó en 2021 como respuesta al Pacto Verde Europeo y ha asumido compromisos adicionales en temas como carbono, residuos y ahora uso de agua.

La propuesta se basa en el indicador *WUE*, que mide el uso de agua por cada kWh consumido por los equipos de TI. El objetivo propuesto tiene en cuenta la diversidad de tecnologías, tipos de edificios y condiciones climáticas en el territorio europeo, y se plantea como una métrica neutra en cuanto a tecnología y ubicación. El horizonte de 2040 también responde a la necesidad de respetar los ciclos de vida de los actuales sistemas de refrigeración, evitando así el impacto negativo que tendría su sustitución prematura en términos de carbono incorporado.

Esta propuesta forma parte de una estrategia más amplia del *CNDCP*, que incluye la neutralidad en carbono para 2030 y una hoja de ruta para minimizar otros impactos ambientales, como los residuos y el uso de recursos. Además, el grupo trabaja activamente con la Comisión Europea a través de reuniones bianuales y en colaboración con auditores independientes, para asegurar que sus métricas estén alineadas con estándares internacionales.

Junto a este compromiso en materia de agua, el pacto ha lanzado nuevos grupos de trabajo dedicados al desarrollo de métricas específicas reutilización y economía circular, cuyos avances se presentarán en próximas reuniones con la Comisión.

## Inteligencia artificial y sostenibilidad en los centros de datos

Una de las grandes incertidumbres que podría cambiar la trayectoria del crecimiento del consumo energético de los centros de datos y por lo tanto su huella hídrica es el uso de modelos de IA generativa. Tanto el sector público como el empresarial quedaron impactados tras el lanzamiento de ChatGPT de OpenAI el 30 de noviembre de 2022. Aún se están empezando a recopilar evidencias sobre la amplitud con la que se utilizarán estas herramientas y el impacto que tendrán en las necesidades computacionales. Se estima que estas primeras aplicaciones requieren aproximadamente diez veces más electricidad para responder a las consultas de los usuarios, pasando de 0,3 Wh en una búsqueda tradicional de Google a 2,9 Wh en una consulta de ChatGPT [85], tal y como se puede observar en la Figura 12 [86].

---

*Se estima que las consultas que utilizan IA generativa requieren aproximadamente diez veces más electricidad que las búsquedas tradicionales por Internet [86]*

---

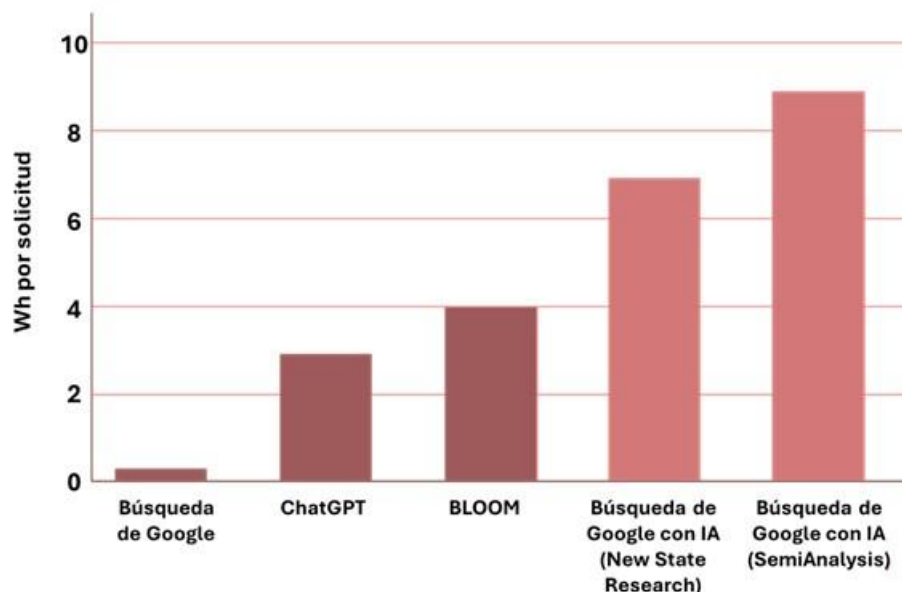


Figura 12. Consumo energético por solicitud (en Wh por solicitud) entre distintos tipos de búsquedas y modelos de IA

La Agencia Internacional de la Energía (AIE) cree que las búsquedas web impulsadas por IA aumentarán la demanda de electricidad diez veces. Para 2026, la AIE espera que la demanda total de electricidad de los centros de datos aumente de aproximadamente 460 TWh en 2022 a más de 1000 TWh. [87]

La generación de música, fotos y videos originales basados en instrucciones del usuario, así como otras aplicaciones emergentes de IA, podrían demandar aún más energía. Con 5300 millones de usuarios de internet en todo el mundo, la adopción masiva de estas herramientas podría suponer un cambio significativo en los requisitos energéticos.

El diseño de los centros de datos también está evolucionando para adaptarse a las cargas de trabajo de IA, debido a la necesidad de una mayor potencia de procesamiento en comparación con las formas genéricas de computación. Esta necesidad ha llevado a una adopción masiva de unidades de procesamiento gráfico (GPU), en sustitución o complemento de las tradicionales CPU.

A diferencia de las CPU, diseñadas para tareas generales y procesos secuenciales, las GPU están optimizadas para realizar millones de operaciones en paralelo, lo que las hace ideales para entrenar y ejecutar redes neuronales profundas. Esta arquitectura paralela permite acelerar de forma significativa los cálculos necesarios en modelos de IA, pero tiene una contrapartida energética importante.

Uno de los principales indicadores de esta demanda energética es el *TDP* (*Thermal Design Power*), es decir, la cantidad máxima de calor que un chip necesita disipar cuando está funcionando a plena capacidad. A medida que los modelos de IA se hacen más complejos, también lo hacen los chips que los ejecutan. Las GPU de última generación, como los utilizados por empresas tecnológicas líderes, pueden tener un *TDP* de más de 700 W por unidad, frente a los 100–200 W de una CPU convencional de servidor. [88]

Este incremento tiene implicaciones directas sobre el diseño y operación de los centros de datos. Un mayor *TDP* significa:

- **Mayor consumo energético**, tanto para la computación como para la refrigeración.
- **Mayor densidad térmica**, que exige soluciones de enfriamiento más avanzadas (como refrigeración líquida o por inmersión).
- **Mayores requisitos de infraestructura eléctrica**, con implicaciones en costes y planificación.

Como se puede ver en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. [89]**, la evolución tecnológica, impulsada en gran medida por la IA, está llevando a los centros de datos hacia un punto de inflexión en cuanto a sus necesidades térmicas y energéticas. La refrigeración líquida se perfila como una estrategia imprescindible para garantizar la operatividad de los centros de datos del futuro.

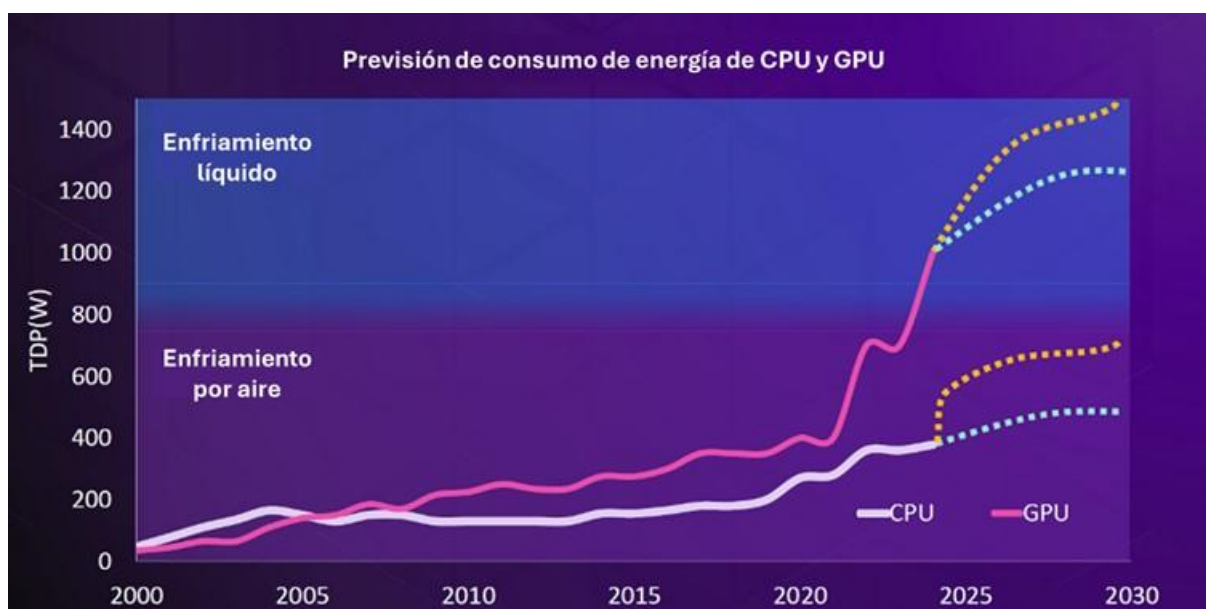


Figura 13. Previsión del consumo de energía de CPU y GPU (Adaptación del gráfico de OMDIA)

## Estrategias para reducir el uso de agua

En los centros de datos, el agua se utiliza principalmente para refrigeración y humidificación. La refrigeración es esencial para mantener la temperatura óptima de los equipos y evitar el sobrecalentamiento, mientras que la humidificación ayuda a controlar la humedad relativa, previniendo la acumulación de electricidad estática que podría dañar los componentes electrónicos. [70] En los últimos años, la demanda de aplicaciones de alto rendimiento en la nube y de IA ha crecido significativamente. Este aumento ha llevado al desarrollo de chips de silicio más avanzados que, aunque ofrecen un rendimiento superior, también consumen más energía y generan más calor. Para evitar que estos chips funcionen mal debido al exceso de calor, se requieren sistemas de refrigeración más intensivos, lo que históricamente ha implicado un mayor consumo de agua. [90]

La refrigeración por agua ha sido una solución común debido a su eficacia en la transferencia de calor. Sin embargo, con el aumento de la densidad de potencia en los centros de datos, la cantidad de calor generado ha incrementado, lo que a su vez ha elevado la demanda de agua para la refrigeración. Además, en climas cálidos, los centros de datos suelen complementar el enfriamiento por aire con sistemas que utilizan agua, especialmente cuando las temperaturas exteriores superan ciertos umbrales.

Para abordar estos desafíos y reducir el consumo de agua, la industria está explorando alternativas que permiten una disipación de calor más eficiente. A continuación, se van a presentar algunas de estas estrategias a la hora de reducir la huella hídrica en los centros de datos.

### Diseño sostenible

Una de las vías más efectivas para mejorar la sostenibilidad de los centros de datos comienza en la fase de diseño. Incorporar principios de diseño sostenible permite reducir significativamente el consumo de energía y recursos naturales desde el inicio del ciclo de vida de estas infraestructuras.

Un ejemplo es el caso de Google con la implementación de una estrategia de «enfriamiento consciente del clima» para sus centros de datos, que tiene en cuenta la hidrología local y los factores de emisión al seleccionar las tecnologías de enfriamiento. La compañía utiliza fuentes de agua alternativas, como agua reciclada o no potable, en más del 25 % de sus campus de centros de datos [50]. Google se ha fijado el objetivo de reponer el 120 % del agua que consume para el año 2030 a través de inversiones en proyectos de administración del agua. [36]

Otro ejemplo de sostenibilidad desde el diseño sería el nuevo centro de datos lanzado por Digital Realty en 2023, diseñado con un fuerte enfoque en la eficiencia energética. Una característica clave de esta instalación es la incorporación de tecnologías de enfriamiento líquido directo (DLC), lo que subraya la tendencia hacia soluciones de enfriamiento más eficientes y sostenibles para manejar las crecientes demandas de energía y computación. [91]

Entre las estrategias más destacadas se encuentra el *free cooling*, un sistema que aprovecha las bajas temperaturas del aire exterior o del agua circundante para refrigerar los equipos, reduciendo o eliminando la necesidad de sistemas de climatización mecánicos intensivos en energía. Otros ejemplos incluyen el uso de refrigeración líquida en circuito cerrado, que permite reutilizar el agua sin necesidad de un suministro constante.

## FREE COOLING

Una de las estrategias innovadoras que utilizan el aire para enfriar los chips de los servidores de un centro de procesamiento de datos es el *free cooling*. El *free cooling* es el proceso por el cual se emplea una baja temperatura externa al centro de procesamiento de datos como fuente de refrigeración natural, lo que permite a una enfriadora de agua o a un sistema de aire acondicionado industrial prescindir total o parcialmente del proceso de refrigeración mecánica (Figura 14) [92]. El uso del *free cooling* en un centro de procesamiento de datos significa que, cuando el aire exterior es lo suficientemente frío para cubrir las necesidades de refrigeración de la planta, la enfriadora del sistema es redundante, o al menos tiene menos demanda de trabajo. Como el compresor que acciona la enfriadora es el principal causante del consumo de energía, se pueden conseguir ahorros significativos.

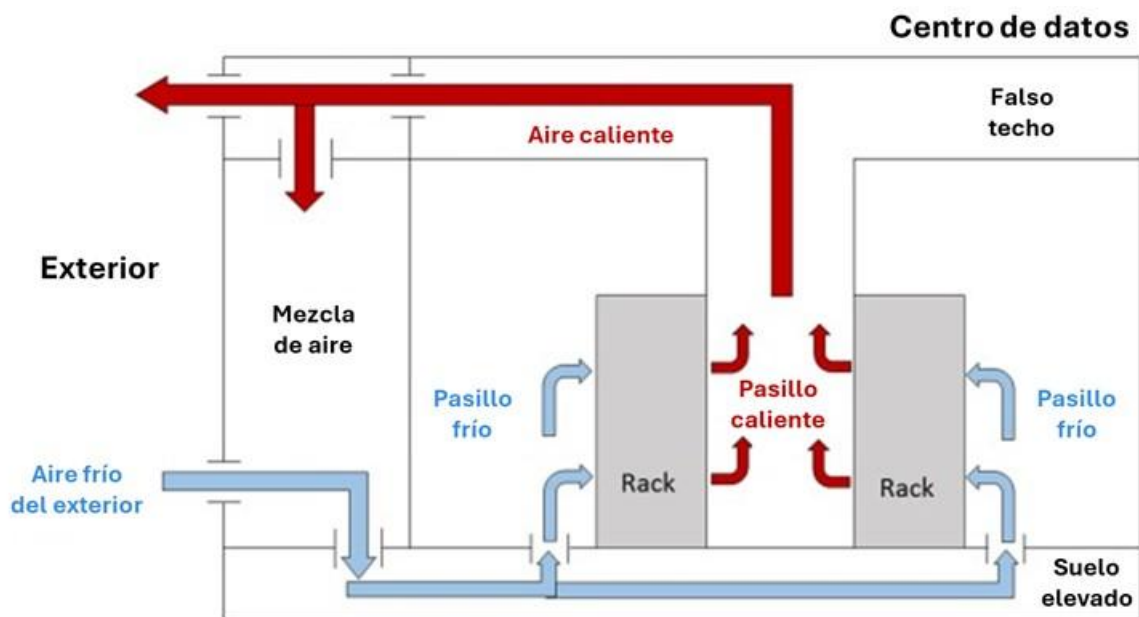


Figura 14. Sistema de free cooling para enfriar centros de datos

Hay varias formas de conseguir el *free cooling*. Para muchos sistemas refrigerados por agua, el *free cooling* utilizará un gran intercambiador de placas y bastidores para transferir el aire frío entre una torre de refrigeración y un bucle de agua fría. También el sistema utiliza agua del condensador más fría de lo normal para trasladar la refrigeración sin necesidad de compresor. Para poder refrigerar mediante *free cooling*, es indispensable que la climatización del local sea por aire. Además, el sistema de climatización debe estar diseñado con una serie de compuertas que permitan utilizar esta tecnología y refrescar la estancia.

Cabe destacar que, en la práctica, la refrigeración por *free cooling* no es del todo gratuita, ya que se necesitan bombas, ventiladores y otros equipos de tratamiento de aire/agua, y esos equipos también requieren reparaciones y mantenimiento periódicos. No obstante, el sistema garantiza un ahorro considerable en el consumo de energía. La razón es sencilla: en los lugares donde el ambiente es más frío que en el interior de las instalaciones, el sistema funciona más horas y, por tanto, ahorra energía. [92]

No obstante, el *free cooling* también presenta sus inconvenientes. Al bajar la temperatura ambiente, en ocasiones puede aumentar la humedad relativa del aire. Entonces es posible que se forme condensación en las superficies frías, lo que puede aumentar el porcentaje de humedad de la sala. Una situación que puede evitarse deshumidificando (parcialmente) el aire antes de suministrarlo.

Algunos analistas apuntan a que gracias a esta técnica de refrigeración es posible lograr una reducción del 70 % en el consumo de energía. Si añadimos un importante ahorro de costes de funcionamiento (gracias a la supervisión remota) y una significativa reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> (gracias a la ventilación forzada), el *free cooling* se convierte en una solución viable para la eficiencia energética.

## REFRIGERACIÓN LÍQUIDA EN CIRCUITO CERRADO

Ante el creciente desafío que representa la gestión eficiente del agua en centros de datos, la refrigeración líquida en circuito cerrado se posiciona como una solución tecnológica para reducir la huella hídrica de estas infraestructuras. A diferencia de los sistemas evaporativos tradicionales, que requieren un aporte constante de agua, estos nuevos sistemas recirculan el agua de manera continua entre los servidores y los enfriadores, sin necesidad de reposición externa tras su llenado inicial (Figura 15). [93]

Gracias a la implementación de sistemas cerrados y otras estrategias de eficiencia operativa, se ha logrado reducir este indicador de forma significativa. Por ejemplo, algunos operadores globales han alcanzado una *WUE* promedio de 0,30 L/kWh. [93]

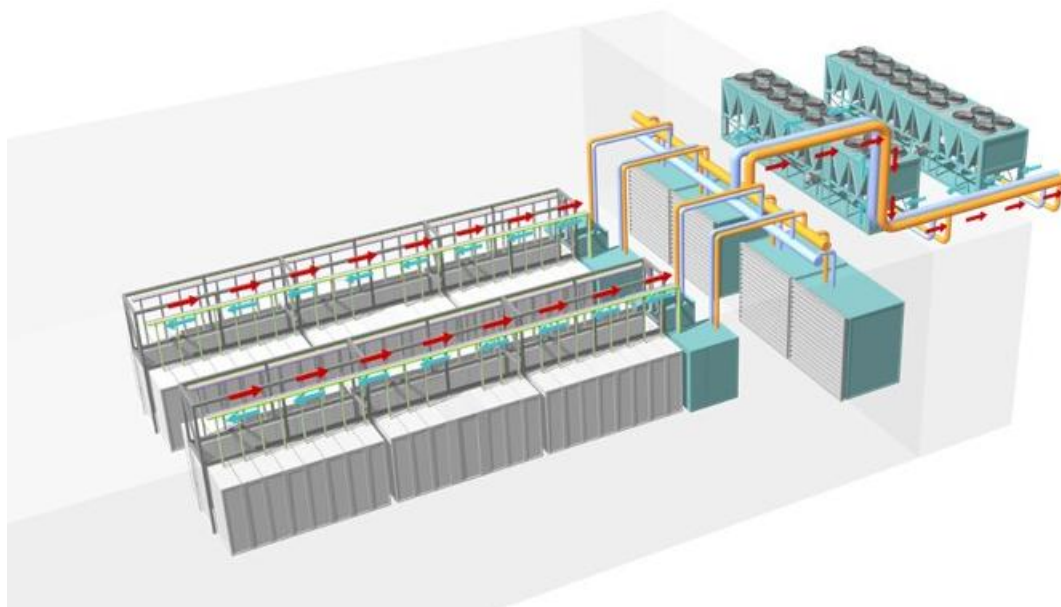


Figura 15. Diseño sin evaporación de agua para refrigeración recicla el agua a través de un sistema de circuito cerrado

Además del uso de aguas recicladas o regeneradas, la refrigeración líquida en circuito cerrado permite ampliar el rango de temperaturas operativas y eliminar el riesgo de evaporación, haciendo posible operar incluso en regiones con estrés hídrico severo. Esta tecnología también facilita la integración con fuentes de energía renovable y permite mantener condiciones térmicas estables con un impacto mínimo sobre los recursos naturales.

Actualmente, Microsoft está desarrollando proyectos piloto con refrigeración sin evaporación de agua en ubicaciones como Phoenix (Arizona) y Mt. Pleasant (Wisconsin), y se espera que esta tecnología pase a formar parte de todos los nuevos diseños de centros de datos de la compañía a partir de 2024, con despliegues operativos previstos para 2027. Un ejemplo de esta estrategia es la implementación prevista en España, concretamente en Aragón, donde Microsoft construirá una red de centros de datos que incorporarán refrigeración líquida directa al chip, eliminando completamente la necesidad de evaporación de agua. Según anunció Eoin

Doherty, vicepresidente de Cloud Operations + Innovation de Microsoft EMEA, durante el evento «The Wave» en Zaragoza, estas infraestructuras permitirán avanzar hacia una nube más sostenible y eficiente, especialmente en regiones con alto estrés hídrico. Este enfoque tecnológico refuerza el compromiso de la compañía con la sostenibilidad hídrica, al tiempo que marca una referencia para futuras infraestructuras digitales tanto en España como en el resto de Europa. [95]

## Water positive

Además de las iniciativas centradas en la eficiencia y el rediseño de los sistemas de refrigeración, los proyectos de compensación de huella hídrica se han consolidado como una estrategia complementaria dentro del compromiso ambiental de muchos operadores de centros de datos. Estos proyectos buscan equilibrar el impacto neto sobre los recursos hídricos devolviendo al entorno la misma —o incluso una mayor— cantidad de agua utilizada en sus operaciones. [96]

El concepto de ser «*water positive*» implica que una organización no solo minimiza su consumo de agua, sino que también restaura o reutiliza más agua de la que consume directamente. En el caso de los centros de datos, donde el uso de agua para refrigeración puede ser intensivo, este enfoque es especialmente relevante, sobre todo en regiones con estrés hídrico.

Algunas empresas tecnológicas líderes del sector están aplicando esta estrategia como parte de sus compromisos medioambientales, sociales y de gobernanza (ESG), y comienzan a reportar indicadores como el balance hídrico neto o los litros restituidos por litro consumido. [97]

Este es el caso de AWS, comprometido a ser «*water positive*» para 2030 y que está invirtiendo en numerosos proyectos de reposición hídrica en las comunidades donde opera. Estos proyectos abarcan iniciativas en España, Chile, Brasil, China, Estados Unidos, Australia, Singapur, Indonesia, India, Sudáfrica y el Reino Unido, y tienen como objetivo devolver más agua al medio ambiente de la que utiliza la compañía en sus operaciones directas. AWS también está utilizando fuentes de agua más sostenibles, como el agua reciclada para la refrigeración, en 24 de sus centros de datos a nivel mundial. [98]

Otro caso sería el de Equinix que, en su compromiso con el uso responsable del agua, estableció en 2023 su decisión de evitar el uso de enfriamiento evaporativo en áreas identificadas con alto estrés hídrico. Además, la compañía está explorando activamente la posibilidad de exportar el calor residual generado por sus centros de datos para su reutilización en sistemas de calefacción comunitarios, lo que representa una estrategia innovadora para minimizar tanto el consumo de agua como las emisiones de dióxido de carbono. [37]

## Caso de estudio: Andel – Sistema de detección de fugas en centros de datos

Los centros de datos consumen grandes cantidades de agua para sus sistemas de refrigeración, lo que genera una huella hídrica significativa. Implementar sistemas de detección de fugas es esencial para minimizar el desperdicio de agua y proteger la infraestructura crítica. Este es el caso del proyecto desarrollado por Andel, empresa de Reino Unido especializada en detección de fugas y sostenibilidad hídrica.

En este caso de estudio, un importante proveedor europeo de centros de datos operaba múltiples instalaciones con suelos elevados, una característica común en estos entornos.

Las tuberías de agua bajo estos suelos y las unidades de ventilación de refrigeración montadas en el techo representaban riesgos potenciales de fugas, que podrían dañar equipos sensibles si no se detectaban a tiempo.

### Solución implementada

Para mitigar estos riesgos, se implementó el sistema de detección de fugas de Andel, que incluye:

- **Paneles de control multizona:** Monitorean continuamente múltiples zonas para detectar fugas de agua y gas refrigerante.
- **Cables sensores de alta sensibilidad:** Instalados bajo el suelo y suspendidos debajo de las unidades de ventilación en el techo, detectan incluso pequeñas cantidades de agua, permitiendo una respuesta rápida.
- **Sensores puntuales y de gas refrigerante:** Colocados estratégicamente en áreas de riesgo para proporcionar una cobertura integral.

El sistema activa alarmas audiovisuales y envía comunicaciones al Sistema de Gestión de Edificios (*BMS*), permitiendo acciones inmediatas para prevenir daños.

### Resultados

La implementación de esta solución resultó en:

- **Reducción del desperdicio de agua:** La detección temprana de fugas permitió reparaciones rápidas, minimizando el consumo innecesario de agua.
- **Protección de infraestructura crítica:** La rápida identificación y respuesta a las fugas protegieron equipos esenciales de posibles daños por agua.
- **Eficiencia operativa mejorada:** La integración con el *BMS* facilitó una gestión más eficiente de las instalaciones.

Este caso ejemplifica cómo los centros de datos pueden reducir su huella hídrica y proteger su infraestructura mediante la implementación de sistemas avanzados de detección de fugas.

En el caso de España, el sistema utilizado en este proyecto está disponible a través del distribuidor oficial ACAI Depuración S.L., lo que facilita su adaptación a contextos locales y su implementación en centros de datos que operan en el territorio nacional.

### Más información:

<https://www.andel.com/>

<https://acaidepuracion.com/>

## Caso de estudio: Spherag - Agricultura inteligente potenciada por AWS

Spherag es una *startup* tecnológica aragonesa que ha desarrollado una solución pionera en el sector agrícola, permitiendo a los agricultores monitorizar y controlar el riego de sus cultivos de forma remota, sin necesidad de conexión eléctrica, gracias a dispositivos de internet de las cosas (*IoT*) solares conectados a la nube. [99]

Muchos agricultores carecen de herramientas para monitorizar en tiempo real el estado de sus cultivos o para automatizar procesos como el riego o el fertirriego, lo que conlleva un uso ineficiente del agua, pérdidas en la producción y una gestión reactiva frente a condiciones climáticas cambiantes.

Para hacer frente a este problema, Spherag ha desarrollado una tecnología basada en:

- **Dispositivos IoT autónomos**, instalados en fincas agrícolas, alimentados por energía solar.
- Una **plataforma digital en la nube**, que permite el control y seguimiento remoto de las operaciones agrícolas mediante una aplicación móvil.
- **Integración de IA**, datos satelitales y predicciones agroclimáticas para generar recomendaciones personalizadas.

El resultado: los agricultores pueden automatizar el riego, recibir alertas y tomar decisiones basadas en datos, generando ahorros de hasta un 40 % en el uso de agua. [100]

El pilar tecnológico que hace posible esta solución es su infraestructura en AWS:

- **Escalabilidad:** AWS permite que la plataforma gestione miles de dispositivos distribuidos, con acceso global y en tiempo real.
- **Seguridad y rendimiento:** Al estar alojada en centros de datos de hiperescala, Spherag garantiza una disponibilidad continua y una conexión segura para sus usuarios.
- **Procesamiento en la nube:** Las funciones de IA y análisis de datos que ayudan a optimizar el riego son procesadas en la nube, lo que reduce los costes de infraestructura para la empresa y mejora el rendimiento para el usuario final.

### Impacto y futuro

La solución de Spherag ha demostrado ser especialmente útil para zonas rurales sin acceso a electricidad o conectividad avanzada, ampliando el alcance de la digitalización agrícola.

### Más información:

<https://spherag.com/>

## Soluciones innovadoras

Ante el creciente estrés hídrico global y la necesidad de mejorar la sostenibilidad de las infraestructuras digitales, los centros de datos están adoptando estrategias innovadoras para reducir el consumo de agua en sus sistemas de refrigeración. Tradicionalmente, muchas de estas instalaciones han dependido de torres de enfriamiento que implican un uso intensivo de agua, especialmente en climas cálidos o estaciones secas. Sin embargo, la evolución tecnológica y la presión regulatoria han impulsado el desarrollo de nuevas soluciones.

## Caso de estudio: Microsoft – Proyecto Natick

El proyecto Natick, una iniciativa de Microsoft lanzada en 2018 ha demostrado la viabilidad técnica, ambiental y económica de los centros de datos submarinos. El experimento consistió en el despliegue de un contenedor hermético con 864 servidores en el fondo marino de las Islas Orcadas (Escocia), a 36 metros de profundidad, donde operó durante dos años sin mantenimiento. [101]

El entorno marino proporcionó refrigeración pasiva gracias a las frías aguas del Atlántico Norte, mientras que la atmósfera de nitrógeno dentro del contenedor evitó la corrosión. Los resultados fueron notables: los servidores submarinos mostraron una fiabilidad ocho veces superior a la de instalaciones convencionales.

El proyecto también destacó por su eficiencia energética y sostenibilidad, ya que operó con energía 100 % renovable procedente de fuentes eólica, solar y marina. Además, al no requerir agua dulce para la refrigeración, se evitó el consumo de un recurso natural cada vez más escaso.

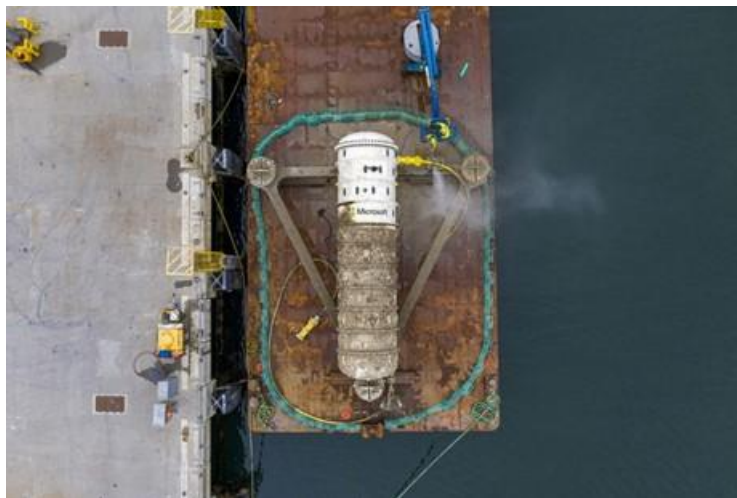


Figura 16. Centro de datos sellado recuperado del fondo marino

Tras su recuperación, el equipo analizó el contenedor —cubierto de algas y anémonas— y extrajo datos clave sobre la vida útil del hardware. Microsoft ahora explora cómo escalar esta tecnología para impulsar servicios en la nube, y valora su integración con infraestructuras como parques eólicos marinos (Figura 16).

### Más información:

<https://news.microsoft.com/es-es/2020/09/15/proyecto-natick-el-futuro-de-los-centros-de-datos-bajo-el-mar-es-fiable-practico-y-sostenible/>

## Caso de estudio: NTT y SKY Perfect JSAT – Centros de datos espaciales

NTT y SKY Perfect JSAT están desarrollando una red de computación denominada *Space Integrated Computing Network*. Este ambicioso proyecto plantea situar centros de datos en el espacio, que no solo procesen información fuera de la Tierra, sino que lo hagan de forma más rápida, eficiente y sostenible, gracias a los recursos naturales del entorno espacial.

Cada satélite de esta red estará equipado con funciones de cómputo propias, capaces de procesar datos directamente en el espacio. Esto elimina la necesidad de enviar grandes volúmenes de información de vuelta a la Tierra para su análisis, un proceso que tradicionalmente ha supuesto un importante consumo energético y un cuello de botella en la latencia.

Uno de los elementos más disruptivos del proyecto es el aprovechamiento del entorno espacial como sistema de refrigeración natural. El vacío del espacio exterior, con temperaturas extremadamente bajas, permite disipar el calor generado por los equipos sin necesidad de agua ni de complejos sistemas mecánicos.

### Más información:

[https://www.rd.ntt/e/research/JN202210\\_19855.html](https://www.rd.ntt/e/research/JN202210_19855.html)

<https://www.cio.com/article/1308658/data-centers-in-space.html>

## Conclusiones

La creciente digitalización de la sociedad, junto con el auge de la computación en la nube y la IA, ha situado a los centros de datos como infraestructuras esenciales para el funcionamiento de la economía y la vida cotidiana. Sin embargo, este avance tecnológico conlleva un uso intensivo de recursos naturales, entre los que el agua ha pasado a ocupar un lugar central en el debate sobre sostenibilidad. En un contexto de escasez hídrica global, la huella hídrica de estas infraestructuras no solo abarca el consumo directo para sistemas de refrigeración, sino también el uso indirecto asociado a la generación de la energía eléctrica que los alimenta.

El agua, por su capacidad de disipación térmica, desempeña un papel fundamental en la gestión del calor en centros de datos. Tecnologías como la refrigeración líquida, la evaporativa o los sistemas en circuito cerrado permiten mantener temperaturas óptimas, pero presentan importantes diferencias en cuanto a consumo de agua, eficiencia energética y adaptabilidad a distintos entornos climáticos. Además, la calidad del agua utilizada influye directamente en la fiabilidad y la durabilidad de estos sistemas, siendo necesario aplicar procesos de tratamiento y control que prevengan problemas como la corrosión o el crecimiento microbiológico.

Aunque tradicionalmente la atención medioambiental en el ámbito de los centros de datos se ha centrado casi exclusivamente en el consumo eléctrico y la huella de carbono, el impacto hídrico comienza a ganar visibilidad, impulsado por la intensificación del estrés hídrico en muchas regiones, la creciente presión regulatoria y una mayor sensibilidad social hacia la gestión sostenible del agua. Sin embargo, a pesar de esta creciente relevancia, persiste una notable dificultad para acceder a datos oficiales y detallados sobre el consumo de agua en estas infraestructuras. La mayoría de los informes de sostenibilidad publicados por los grandes operadores recogen compromisos generales de mejora y estrategias de reducción de la huella hídrica, pero rara vez incluyen cifras desglosadas por ubicación, tecnología o tipología de instalación, lo cual limita la posibilidad de realizar comparaciones objetivas y dificulta la evaluación rigurosa de los avances reales. En este contexto, el indicador *Water Usage Effectiveness (WUE)*, uno de los indicadores que deben de ser reportados por los operadores de centros de datos según el nuevo Reglamento Delegado (UE) 2024/1364, ha emergido como una herramienta clave para cuantificar la eficiencia hídrica, al relacionar el volumen de agua consumida con la energía utilizada por los equipos informáticos. Aunque presenta limitaciones y debe interpretarse junto a otros factores, permite establecer metas cuantificables y promueve una mayor estandarización en la evaluación del uso del agua en centros de datos.

El sector no permanece ajeno a la preocupación relativa a la huella hídrica. Grandes operadores están adoptando soluciones innovadoras que incluyen el uso de aguas recicladas, la eliminación de torres de enfriamiento abiertas, la implementación de tecnologías con «cero evaporaciones» y la participación en proyectos de reposición hídrica que compensan parte del consumo. Iniciativas voluntarias como el *CNDCP* reflejan una voluntad sectorial de autorregulación, con metas ambiciosas como limitar el uso de agua a 0,4 L/kWh de energía TI para el año 2040.

De cara al futuro, la tendencia apunta hacia una expansión acelerada de la refrigeración líquida, especialmente motivada por el auge de los modelos de IA generativa, que exigen una potencia de procesamiento y una disipación térmica mucho mayor. Esta evolución tecnológica hará aún más urgente el desarrollo de sistemas de refrigeración sostenibles, capaces de garantizar la continuidad operativa sin comprometer los recursos hídricos. Paralelamente, la legislación europea y nacional ya está avanzando hacia un mayor control, trazabilidad y exigencia de indicadores de sostenibilidad ambiental aplicables al sector.

En resumen, integrar la sostenibilidad hídrica en la planificación y operación de los centros de datos ya no es solo una buena práctica, sino una condición necesaria para asegurar su viabilidad a largo plazo. La transición hacia modelos operativos más eficientes, resilientes y transparentes exigirá una estrecha colaboración entre industria, autoridades reguladoras e instituciones científicas. Solo así será posible responder al crecimiento imparable de la demanda digital, sin poner en riesgo uno de los recursos más importantes y estratégicos del planeta como es el agua.

# Bibliografía

- [1] A. Collier, «La inteligencia artificial está usando una tonelada de agua... aquí le contamos cómo usar mejor los recursos,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.watertechnologies.mx/blog/artificial-intelligence-using-ton-water-heres-how-be-more-resourceful>.
- [2] M. G. Pascual, «El impacto de la tecnología: un nuevo datacenter de Meta en España consumirá 600 millones de litros de agua potable en una zona en peligro de sequía,» *La Nación*, 2023.
- [3] D. Verdú, «La UE anuncia que movilizará 200.000 millones para inteligencia artificial en pleno choque con EE UU por su regulación». *El País*.
- [4] Amazon Staff, «How AWS will return more water than it uses by 2030,» 2022. [En línea]. [Último acceso: abril 2025].
- [5] M. T. Bastidas Yffert, *La contabilidad electrónica y el comprobante fiscal*, IMCP, 2015.
- [6] M. Á. García Vega, «El futuro gira en torno a los datos,» *El País*, marzo 2025.
- [7] Nabiax, «¿Cómo es un centro de datos por dentro?,» 2023. [En línea]. Available: <https://nabiax.com/como-es-un-centro-de-datos-por-dentro/>. [Último acceso: abril 2025].
- [8] J. López, «NOC: qué es, características y funcionamiento,» 2024. [En línea]. Available: <https://hardzone.es/reportajes/que-es/noc-infraestructura-redes-nacional-empresas/>. [Último acceso: abril 2025].
- [9] userDataCenter, «Importancia de UPS para centros de datos,» 2021. [En línea]. Available: <https://blogs.salleurl.edu/es/importancia-de-ups-para-centros-de-datos>. [Último acceso: abril 2025].
- [10] V.-G. Anghel, «Críticidad y redundancia en el Data Center,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.datacenterdynamics.com/es/features/criticidad-y-redundancia-en-el-centro-de-datos/>. [Último acceso: abril 2025].
- [11] Skanska, «Mission Critical / Data Centers,» 2017. [En línea]. Available: [www.usa.skanska.com/what-we-deliver/build/mission-critical--data-centers/&as\\_qdr=y15](http://www.usa.skanska.com/what-we-deliver/build/mission-critical--data-centers/&as_qdr=y15). [Último acceso: abril 2025].
- [12] M. Á. García Vega, «Cara y cruz de la inteligencia artificial en la transición ambie,» *El País*, 2024.
- [13] Hewlett Packard Enterprise, «¿Qué es un centro de datos empresarial?,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.hpe.com/es/es/what-is/enterprise-data-center.html>. [Último acceso: abril 2025].
- [14] L. Bonilla, «Qué es un CPD, para qué sirve y cómo funciona,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.datacentermarket.es/dcm-xl/que-es-un-cpd-para-que-sirve-y-como-funciona/>. [Último acceso: abril 2025].
- [15] Check Point, «What is a Colocation Data Center?,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.checkpoint.com/es/cyber-hub/cyber-security/what-is-data-center/what-is-a-colocation-data-center/>. [Último acceso: abril 2025].

- [16] Fiber Opticom, «Explorando la diversidad de los centros de datos: empresa, colocación, hiperescala, borde y nube,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.opticomfiber.com/info/exploring-the-diversity-of-data-centers-enter-87261256.html>. [Último acceso: abril 2025].
- [17] L. Bonilla, «Cloud Data Center: el futuro de los centros de datos,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.datacentermarket.es/dcm-xl/cloud-data-center-el-futuro-de-los-centros-de-datos/>. [Último acceso: abril 2025].
- [18] Data Center Market, «Centro de datos modular, qué es y ventajas,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.datacentermarket.es/tendencias-ti/cpd-a-medida-pero-tamano-mini/>. [Último acceso: abril 2025].
- [19] L. Bonilla, «Qué son los Edge Data Center. Ventajas y aplicaciones de futuro,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.datacentermarket.es/dcm-xl/que-son-los-edge-data-center-ventajas-y-aplicaciones-de-futuro/#:~:text=Un%20centro%20de%20datos%20Edge%20es%20una%20peque%C3%B1a%20instalaci%C3%B3n%20situada,mejorar%20la%20experiencia%20del%20usuario..> [Último acceso: abril 2025].
- [20] Uptime Institute, «Tier Classification System,» 2020. [En línea]. Available: <https://uptimeinstitute.com/tiers>. [Último acceso: abril 2025].
- [21] P. M. Sandri, «La IA disparará en Europa la demanda de electricidad un 160% en cinco años,» *Al Vanguardia*, 2025.
- [22] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Centros de datos,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/eficiencia/centros-de-datos.html>. [Último acceso: abril 2025].
- [23] European Commission, «Shaping Europe Digital Future,» Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020.
- [24] Consejo de la Unión Europea, «Objetivo 55,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/fit-for-55/>. [Último acceso: abril 2025].
- [25] L. Llanso, «La reciente Directiva de Eficiencia Energética 2023/1791: Objetivos y Aplicaciones,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.dexma.com/es/blog-es/la-reciente-directiva-de-eficiencia-energetica-2023-1791-objetivos-y-aplicaciones/>. [Último acceso: abril 2025].
- [26] Gobierno de España, *Directiva (UE) 2023/1791 del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de septiembre de 2023 relativa a la eficiencia energética y por la que se modifica el Reglamento (UE) 2023/955 (versión refundida)*, 2023.
- [27] Unión Europea, *Reglamento Delegado (UE) 2024/1364 de la Comisión, de 14 de marzo de 2024, relativo a la primera fase del establecimiento de un régimen de evaluación común de la Unión para centros de datos.*, 17 de mayo de 2024.
- [28] D. Donnellan, «Uptime Institute's Global Data Center Survey Results 2023,» Uptime Institute, 2023.
- [29] UF Office of Sustainability University of Florida, «Action of the Month: Understand Your Water Footprint,» 2022. [En línea]. [Último acceso: abril 2025].
- [30] Repsol, «What is a water footprint?,» [En línea]. Available: <https://www.repsol.com/en/energy-and-the-future/future-of-the-world/water-footprint/index.cshhtml>. [Último acceso: abril 2025].
- [31] Submer, «Datacenter Water Usage: Where Does It All Go?,» [En línea]. Available: <https://submer.com/blog/datacenter-water-usage/>. [Último acceso: abril 2025].

- [32] Amazon Sustainability, «Water stewardship,» [En línea]. Available: <https://sustainability.aboutamazon.com/natural-resources/water>. [Último acceso: abril 2025].
- [33] Fluence Corporation, «Water's Growing Importance in the Data Center Sector,» [En línea]. Available: <https://www.fluencecorp.com/importance-of-water-in-data-center-sector/>. [Último acceso: abril 2025].
- [34] Amazon Sustainability, «AWS Cloud,» [En línea]. Available: <https://sustainability.aboutamazon.com/products-services/aws-cloud>. [Último acceso: abril 2025].
- [35] Data Center Dynamics , «Microsoft's water consumption jumps 34 percent amid AI boom,» [En línea]. Available: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/microsofts-water-consumption-jumps-34-percent-amid-ai-boom/>. [Último acceso: abril 2025].
- [36] HPCwire, «Microsoft to Open 'Zero Water' Data Centers in 2026,» [En línea]. Available: <https://www.hpcwire.com/2025/01/21/microsoft-to-open-zero-water-data-centers-in-2026/>. [Último acceso: abril 2025].
- [37] Dgtl Infra, «Data Center Water Usage: A Comprehensive Guide,» [En línea]. Available: <https://dgtlinfra.com/data-center-water-usage/>. [Último acceso: abril 2025].
- [38] Amiad, «Why Water Treatment is Critical for Data Center Cooling Systems,» [En línea]. Available: <https://amiad.com/blog/why-water-treatment-is-critical-for-data-center-cooling-systems/>. [Último acceso: abril 2025].
- [39] Joint Research Centre, «European Code of Conduct for Energy Efficiency in Data Centres,» European Commision, 2022.
- [40] J. Booth, «2023 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency,» Joint Research Centre – Ispra, 2023.
- [41] «Climate Neutral Data Centre Pact,» 2021.
- [42] Climate Neutral Data Center Pact, «Self Regulatory Initiative,» 2021. [En línea]. Available: [https://www.climateneutraldatacentre.net/wp-content/uploads/2023/02/221213\\_Self-Regulatory-Initiative.pdf](https://www.climateneutraldatacentre.net/wp-content/uploads/2023/02/221213_Self-Regulatory-Initiative.pdf). [Último acceso: abril 2025].
- [43] Datacenter Dynamics, «El Pacto de Centros de Datos Climáticamente Neutrales publica una lista de proveedores de servicios europeos registrados en cero neto para 2030,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.datacenterdynamics.com/es/noticias/el-pacto-de-centros-de-datos-clim%C3%A1ticamente-neutrales-publica-una-lista-de-proveedores-de-servicios-europeos-registrados-en-cero-neto-para-2030/>. [Último acceso: abril 2025].
- [44] Impax Asset Management, «Addressing the hidden water footprint of data,» [En línea]. Available: <https://impaxam.com/insights-and-news/blog/addressing-the-hidden-water-footprint-of-data/>. [Último acceso: abril 2025].
- [45] «How to reduce the water usage of data center cooling systems,» [En línea]. Available: <https://www.apl-datacenter.com/en/how-to-reduce-the-water-usage-of-data-center-cooling-systems/>. [Último acceso: abril 2025].
- [46] SWEP, «Liquid cooling – The future of data center cooling,» [En línea]. Available: <https://www.swep.net/company/news-and-media/news/2024/march/liquid-cooling--the-future-of-data-center-cooling/>. [Último acceso: abril 2025].

- [47] DCD, «Data center water usage remains hidden,» [En línea]. Available: <https://www.datacenterdynamics.com/en/analysis/data-center-water-usage-remains-hidden/>. [Último acceso: abril 2025].
- [48] Lenovo StoryHub, «The world's AI generators: rethinking water usage in data centers to build a more sustainable future,» [En línea]. Available: <https://news.lenovo.com/data-centers-worlds-ai-generators-water-usage/>. [Último acceso: abril 2025].
- [49] Uptime Institute Blog, «Ignore Data Center Water Consumption at Your Own Peril,» [En línea]. Available: <https://journal.uptimeinstitute.com/dont-ignore-water-consumption/>. [Último acceso: abril 2025].
- [50] World Economic Forum, «Circular water solutions key to sustainable data centres,» [En línea]. Available: <https://www.weforum.org/stories/2024/11/circular-water-solutions-sustainable-data-centres/>. [Último acceso: abril 2025].
- [51] TechTarget, «Data center energy-efficiency activities,» [En línea]. Available: [https://www.techtarget.com/rms/onlineimages/data\\_center\\_energy\\_efficiency\\_activitie-s-f.png](https://www.techtarget.com/rms/onlineimages/data_center_energy_efficiency_activitie-s-f.png). [Último acceso: abril 2025].
- [52] TechTarget, «3 types of air cooling systems,» [En línea]. Available: [https://www.techtarget.com/rms/onlineimages/data\\_center-liquid\\_vs\\_air\\_cooling-f.png](https://www.techtarget.com/rms/onlineimages/data_center-liquid_vs_air_cooling-f.png). [Último acceso: abril 2025].
- [53] Purestorage, «¿Qué es una unidad de aire acondicionado de sala de ordenadores (CRAC)?,» [En línea]. Available: <https://www.purestorage.com/es/knowledge/what-is-a-crc.html>. [Último acceso: abril 2025].
- [54] TechTarget, «Data center with hot and cold aisles,» [En línea]. Available: [https://www.techtarget.com/rms/onlineimages/data\\_center\\_with\\_hot\\_and\\_cold\\_aisles-f.png](https://www.techtarget.com/rms/onlineimages/data_center_with_hot_and_cold_aisles-f.png). [Último acceso: abril 2025].
- [55] ARROW, «Cómo funciona el enfriamiento de los centros de datos,» [En línea]. Available: <https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/how-data-center-cooling-works>. [Último acceso: abril 2025].
- [56] TechTarget, [En línea]. Available: [https://www.techtarget.com/rms/onlineimages/GPU\\_Front.jpg](https://www.techtarget.com/rms/onlineimages/GPU_Front.jpg).
- [57] TechTarget, [En línea]. Available: [https://www.techtarget.com/rms/onlineimages/Liebert\\_XDU\\_Interior\\_View.jpg](https://www.techtarget.com/rms/onlineimages/Liebert_XDU_Interior_View.jpg).
- [58] «Data Center Cooling Systems: Tackling Heat in a Digital World,» [En línea]. Available: <https://www.1-act.com/resources/blog/data-center-cooling-systems/>. [Último acceso: abril 2025].
- [59] «Water Efficiency | Center of Expertise for Energy Efficiency in Data Centers,» [En línea]. Available: <https://datacenters.lbl.gov/water-efficiency>. [Último acceso: abril 2025].
- [60] Chemstar WATER, «Data Center Water Treatment Provider,» [En línea]. Available: <https://www.chemstarwater.com/industries/data-center-water-treatment/>. [Último acceso: abril 2025].
- [61] Chardon Labs, «Best Practices: Cooling Water Maintenance in Data Centers,» [En línea]. Available: <https://www.chardonlabs.com/resources/cooling-water-maintance-in-data-centers/>. [Último acceso: abril 2025].

- [62] Veolia, «Data Center Water Treatment Solutions,» [En línea]. Available: <https://www.watertechnologies.com/industries/data-centers>. [Último acceso: abril 2025].
- [63] Massed Compute, «What are the recommended water quality standards for liquid cooling systems used with NVIDIA data center GPUs?,» [En línea]. Available: <https://massedcompute.com/faq-answers/?question=What+are+the+recommended+water+quality+standar>. [Último acceso: abril 2025].
- [64] Genesis Water Technologies, «Streamlining Disinfection of Cooling Water in Data Centers,» [En línea]. Available: <https://genesiswatertech.com/blog-post/disinfection-of-cooling-water-in-data-centers/>. [Último acceso: abril 2025].
- [65] «Water quality aspects from Spanish sites to support managed aquifer recharge (MAR) guidelines not based on maximum allowable concentration standards. .,» *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, vol. 13, nº 1, pp. 55-74, 2024.
- [66] UNECE, «The Protocol on Water and Health: 5th Reporting Spain,» [En línea]. Available: [https://unece.org/sites/default/files/2022-05/Spain\\_summary\\_report\\_5th\\_cycle\\_19Apr22\\_ENG.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2022-05/Spain_summary_report_5th_cycle_19Apr22_ENG.pdf). [Último acceso: abril 2025].
- [67] HWG LLP, «How Global Data Center Regs May Influence U.S. Policies,» [En línea]. Available: <https://hwglaw.com/2024/12/02/how-global-data-center-regs-may-influence-u-s-policies/>. [Último acceso: abril 2025].
- [68] BIOBOX , «Normativa de agua residual industrial en España,» [En línea]. Available: <https://biobox-water.com/noticias/normativa-de-agua-residual-industrial-en-espana/>. [Último acceso: abril 2025].
- [69] European Commission - Environment, «Drinking water,» [En línea]. Available: [https://environment.ec.europa.eu/topics/water/drinking-water\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/water/drinking-water_en). [Último acceso: abril 2025].
- [70] Seven Seas Water Group, «Data Center Water Usage,» [En línea]. Available: <https://sevenseaswater.com/data-center-water-usage/>. [Último acceso: abril 2025].
- [71] Sustainability Magazine, «Inside Microsoft's Global Water Conservation Initiatives,» [En línea]. Available: <https://sustainabilitymag.com/articles/inside-microsofts-global-water-conservation-initiatives>. [Último acceso: abril 2025].
- [72] «Google emissions jump 48% in five years due to AI data center boom,» [En línea]. Available: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/google-emissions-jump-48-in-five-years-due-to-ai-data-center-boom/>. [Último acceso: abril 2025].
- [73] «Data Center Trends 2025: Vertiv predicts industry efforts to support, enable, leverage, and regulate AI,» [En línea]. Available: <https://www.vertiv.com/en-us/about/news-and-insights/corporate-news/data-center-trends-2025-vertiv-predicts-industry-e>. [Último acceso: abril 2025].
- [74] ASCE, «Engineers often need a lot of water to keep data centers cool,» [En línea]. Available: <https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/civil-engineering-magazine/issues/magazine-issue/article/2024/03/engineers-often-need>. [Último acceso: abril 2025].
- [75] «Sharing the latest improvements to efficiency in Microsoft's datacenters,» [En línea]. Available: <https://azure.microsoft.com/en-us/blog/sharing-the-latest-improvements-to-efficiency-in-microsoft-s-datacenters/>. [Último acceso: abril 2025].

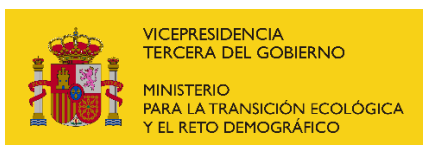
- [76] «The environmental footprint of data centers in the United States,» [En línea]. Available: <https://energyanalysis.lbl.gov/publications/environmental-footprint-data-centers>. [Último acceso: abril 2025].
- [77] Savills, «Spotlight: European Data Centres,» [En línea]. Available: [https://www.savills.com/research\\_articles/255800/345047-0](https://www.savills.com/research_articles/255800/345047-0). [Último acceso: abril 2025].
- [78] E. Reyes, «EU concentra el 45% de los data centers del mundo y eso es un problema,» abril 2025.
- [79] Jorge Alonso, «Aragón ya es la segunda potencia nacional en centros de datos y doblará a Madrid solo con los anunciados,» abril 2025.
- [80] Statista, «Leading countries by number of data centers as of March 2025,» [En línea]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1228433/data-centers-worldwide-by-country/>. [Último acceso: abril 2025].
- [81] M. Copley, «Data centers, backbone of the digital economy, face water scarcity and climate risk,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.npr.org/2022/08/30/1119938708/data-centers-backbone-of-the-digital-economy-face-water-scarcity-and-climate-ris>. [Último acceso: abril 2025].
- [82] Water News Europe, «Aquifers in Europe are declining alarmingly,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.waternewseurope.com/aquifers-in-europe-are-declining-alarmingly/>. [Último acceso: abril 2025].
- [83] AQUAE Fundación, «Conferencia de la ONU sobre el Agua de 2023,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.fundacionaquae.org/conferencia-onu-agua-2023/>. [Último acceso: abril 2025].
- [84] DCD, «Los operadores europeos planean reducir el uso de agua a 400 ml por kWh para 2040,» [En línea]. Available: <https://www.datacenterdynamics.com/es/noticias/los-operadores-europeos-planean-reducir-el-uso-de-agua-a-400-ml-por-kwh-para-2040/>. [Último acceso: abril 2025].
- [85] EPRI, «Powering Intelligence: Analyzing Artificial Intelligence and Data Center Energy Consumption,» 2024.
- [86] A. d. Vries, «The growing energy footprint of artificial intelligence,» Joule, 2023. [En línea]. Available: <https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351%2823%2900365-3>. [Último acceso: abril 2025].
- [87] CBRE, «El impacto de la IA en el desarrollo de los centros de datos,» [En línea]. Available: <https://www.cbre.es/insights/articles/el-impacto-de-la-ia-en-el-desarrollo-de-los-centros-de-datos>. [Último acceso: abril 2025].
- [88] Hyperstack, «Comparing NVIDIA H100 PCIe vs SXM: Performance, Use Cases and More,» [En línea]. Available: <https://www.hyperstack.cloud/technical-resources/performance-benchmarks/comparing-nvidia-h100-pcie-vs-sxm-performance-use-cases-and-more>. [Último acceso: abril 2025].
- [89] D. Robb, «How Computer Chips Are Being Upgraded to Serve AI Workloads in Data Centers,» Upsite Technologies, [En línea]. Available: <https://www.upsite.com/blog/how-computer-chips-are-being-upgraded-to-serve-ai-workloads-in-data-centers/>. [Último acceso: abril 2025].
- [90] Microsoft Prensa, «Sostenible desde el diseño: Transformando la eficiencia hídrica de los centros de datos,» [En línea]. Available: <https://news.microsoft.com/es-es/2024/07/26/sostenible-desde-el-diseno-transformando-la-eficiencia-hidrica-de-los-centros-de-datos/>. [Último acceso: abril 2025].

- [91] Uptime Institute Journal, «A Look at Data Center Cooling Technologies -», [En línea]. Available: <https://journal.uptimeinstitute.com/a-look-at-data-center-cooling-technologies/>. [Último acceso: abril 2025].
- [92] U. Ülkü, «Waste Heat Recovery from Cooling Systems of Data Centers,» *Proceedings of the 2022 International Symposium on Energy Management and Sustainability*, 2023.
- [93] It-daily, «Data centers of the future use no water for cooling,» [En línea]. Available: <http://it-daily.net/en/it-management-en/data-center-en/data-centers-of-the-future-use-no-water-for-cooling#:~:text=Microsoft%20measures%20water%20efficiency%20using,WUE%20of%200.30%20%2FkWh..> [Último acceso: abril 2025].
- [94] Microsoft, «Sustainable by design: Next-generation datacenters consume zero water for cooling,» [En línea]. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-cloud/blog/2024/12/09/sustainable-by-design-next-generation-datacenters-consume-zero-water-for-cooling/>. [Último acceso: abril 2025].
- [95] A. Sierra, «Centros de datos sin agua: el caso de Microsoft en Zaragoza,» HoyAragón, [En línea]. Available: <https://www.hoyaragon.es/articulo/noticias-aragon/centros-datos-agua-microsoft/20250319124356090980.html>. [Último acceso: abril 2025].
- [96] ECODES, «Por una mitigación que adapte: la urgencia de resolver a la vez los dos desafíos que la emergencia climática plantea a España,» [En línea]. Available: <https://ecodes.org/hacemos/investigacion-ambiental-2023/compensacion-de-la-huella-hidrica-en-proyectos-de-conservacion-y-mejora-del-dominio-publico-hidraulico>. [Último acceso: abril 2025].
- [97] Google, «2025 Water Stewardship Project Portfolio,» [En línea]. Available: <https://www.gstatic.com/gumdrop/sustainability/2025-google-water-stewardship-project-portfolio.pdf>. [Último acceso: abril 2025].
- [98] «Data Center Water Usage: A Comprehensive Guide,» [En línea]. Available: <https://dgtlinfra.com/data-center-water-usage/>. [Último acceso: abril 2025].
- [99] AWS, «Spherag y la transformación digital en la agricultura,» [En línea]. Available: <https://aws.amazon.com/es/solutions/case-studies/spherag-case/>. [Último acceso: abril 2025].
- [100] El Español, «La nube de Amazon Web Services 'riega' el campo sin conexión eléctrica,» [En línea]. Available: [https://www.elespanol.com/invertia/disruptores-innovadores/disruptores/startups/20210803/amazon-web-services-riega-sin-conexion-electrica/601190318\\_0.html](https://www.elespanol.com/invertia/disruptores-innovadores/disruptores/startups/20210803/amazon-web-services-riega-sin-conexion-electrica/601190318_0.html). [Último acceso: abril 2025].
- [101] Microsoft, «Microsoft finds underwater datacenters are reliable, practical and use energy sustainably,» [En línea]. Available: <https://news.microsoft.com/source/features/sustainability/project-natick-underwater-datacenter/>. [Último acceso: abril 2025].
- [102] Stream Data Centers, «Direct Liquid Cooling (DLC),» [En línea]. Available: <https://www.streamdatacenters.com/resource-library/glossary/direct-liquid-cooling-dlc/>. [Último acceso: abril 2025].
- [103] IBM, «General guidelines for data centers,» [En línea]. Available: <https://www.ibm.com/docs/en/cloudpakw3700/2.3.3?topic=determination-general-guidelines-data-centers>. [Último acceso: abril 2025].

- [104] AIRSYS North America, «Evaporative Cooling for Data Centers — Pros and Cons,» [En línea]. Available: <https://airsysnorthamerica.com/evaporative-cooling-for-data-centers-pros-and-cons/>. [Último acceso: abril 2025].
- [105] Flex, «The future of data centers demands advanced cooling,» [En línea]. Available: <https://flex.com/resources/the-future-of-data-centers-demands-advanced-cooling>. [Último acceso: abril 2025].
- [106] Future Bridge NetZero Events, «Evaporative Technologies in Data Centers: All You Need to Know,» [En línea]. Available: <https://netzero-events.com/evaporative-technologies-in-data-centers-all-you-need-to-know/>. [Último acceso: abril 2025].
- [107] Boyd | Trusted Innovation , «Energy Consumption in Data Centers: Air versus Liquid Cooling,» [En línea]. Available: <https://www.boydcorp.com/blog/energy-consumption-in-data-centers-air-versus-liquid-cooling.html>. [Último acceso: abril 2025].
- [108] JLL, «Liquid cooling enters the mainstream in data centers,» [En línea]. Available: <https://www.us.jll.com/en/trends-and-insights/workplace/liquid-cooling-enters-the-mainstream-in-data-centers>. [Último acceso: abril 2025].
- [109] Utility Dive, «The 2025 outlook for data center cooling,» [En línea]. Available: <https://www.utilitydive.com/news/2025-outlook-data-center-cooling-electricity-demand-ai-dual-phase-direct-to-chip-energy-efficiency/738120/>. [Último acceso: abril 2025].
- [110] Data Center Dynamics, «Microsoft's water consumption jumps 34 percent amid AI boom,» [En línea]. Available: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/microsofts-water-consumption-jumps-34-percent-amid-ai-boom/>. [Último acceso: abril 2025].



Con el apoyo de:



Elaborado por:

