



fcfm

Ciencias de la
Computación
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

REVISTA DEL DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
COMPUTACIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE

Bits

DE CIENCIA

EDICIÓN N°23 | AÑO 2022



TECNOLOGÍAS DIGITALES E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

**La huella de carbono
del aprendizaje
profundo**

/ Ivan Sipirán

**Fundación Chilenter y la ruta
que busca la circularidad de
los electrónicos con fin social**

/ Matías González Pacheco

**¿Puede realmente blockchain
ser sostenible y verde?**

/ Claudia Negri Ribalta
y Marius Lombard-Platet

Contenidos

1

Editorial

/ Federico Olmedo

2

Fuzz Testing en el software de vuelo de un CubeSat: Usando y analizando técnicas sistemáticas para mejorar la calidad de software en el ámbito aeroespacial bajo un contexto ágil

/ Tamara Gutiérrez y Alexandre Bergel

9

Jack J. Dongarra, el héroe de la ciencia e ingeniería computacional

/ Cristóbal Navarro y Nancy Hitschfeld Kahler

15

La huella de carbono del aprendizaje profundo

/ Ivan Sipirán

21

¿Puede realmente blockchain ser sostenible y verde?

/ Claudia Negri Ribalta y Marius Lombard-Platet

28

Los costos de estar conectados: Datacenters y el consumo hídrico

/ Rodrigo Vallejos Calderón

34

Open Water: Sistema abierto experto para apoyar la gestión de recursos hídricos mediante monitoreo de bajo costo en tiempo real de aguas superficiales y subterráneas

/ Sandra Céspedes, Linda Daniele, Doris Sáez y Javier Bustos

42

Ciencias de la computación "al rescate" para renovar la tierra

/ Jérémy Barbay

46

Entrevista a Reynaldo Cabezas y Pablo Garrido

Encargados de la Oficina de Ingeniería para la Sustentabilidad FCFM

/ Ana Martínez y Federico Olmedo

52

Fundación Chilenter y la ruta que busca la circularidad de los electrónicos con fin social

/ Matías González Pacheco

59

Estudiantes DCC



COMITÉ EDITORIAL

María Cecilia Bastarrica
Claudio Gutiérrez
Alejandro Hevia
Ana Gabriela Martínez
Bárbara Poblete
Jocelyn Simmonds
Iván Sipirán

EDITOR GENERAL

Federico Olmedo

EDITORA PERIODÍSTICA

Ana Gabriela Martínez

PERIODISTA

Karin Riquelme

DISEÑO

Paulette Filla

FOTOGRAFÍAS E IMÁGENES

Comunicaciones DCC

Revista BITS de Ciencia del Departamento de Ciencias de la Computación de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile se encuentra bajo Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-Compartir-Igual 3.0 Chile. Basada en una obra en www.dcc.uchile.cl



Revista Bits de Ciencia N°23

ISSN 0718-8005 (versión impresa)

www.dcc.uchile.cl/revista

ISSN 0717-8013 (versión en línea)

Departamento de Ciencias de la Computación

Avda. Beauchef 851, 3° piso,
edificio norte. Santiago, Chile.
837-0459 Santiago

 www.dcc.uchile.cl

 56 22 9780652

 bitsdeciencia@dcc.uchile.cl

    / [dccuchile](https://www.dcc.uchile.cl)

El contenido de los artículos publicados en esta Revista, son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no reflejan necesariamente el pensamiento del Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Chile.



Editorial

FEDERICO OLMEDO

Editor General

Revista Bits de Ciencia



Sin duda, las tecnologías digitales han transformado la industria, la economía global y de forma más general, la sociedad en su conjunto. Muchos incluso sostienen que pueden contribuir a achicar la brecha entre los países “desarrollados” y los “en vía de desarrollo”. Sin embargo, ¿qué costos estamos dispuestos a pagar por estos beneficios?

¿Sabías, por ejemplo, que entrenar un modelo de *deep learning* “actual” genera la misma huella de carbono que la de cinco autos en todo su tiempo de vida? ¿O que para su refrigeración, un datacenter puede requerir, en tan solo 24 horas, el equivalente a la demanda de agua potable anual de una población de 80 mil habitantes? La relación entre tecnologías digitales y desarrollo sostenible ha sido un claro ejemplo de lo que los angloparlantes suelen llamar *un elefante en la habitación*, un problema evidente al que la mayoría le hemos hecho la vista gorda.

Como tema central, en este número de la Revista abordamos la relación entre tecnologías digitales y medioambiente,

explorando distintas formas de interacción. Discutimos el impacto negativo que generan cierta familia de tecnologías, ubicuas en la actualidad, así como un conjunto de iniciativas que, por el contrario, buscan mitigar este efecto negativo, o incluso, contribuir a un desarrollo sostenible desde el ámbito tecnológico.

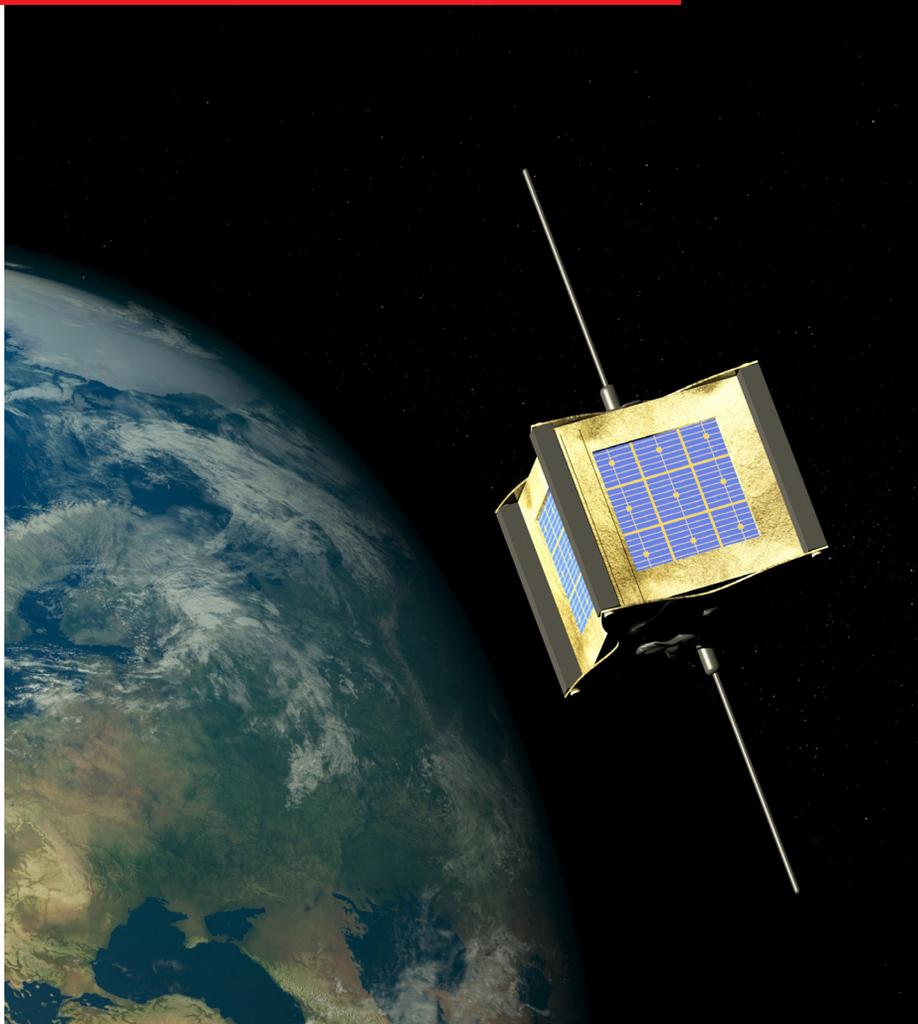
En la sección de Investigación Destacada discutimos la aplicación de *fuzz testing* al software de vuelo de nanosatélites; en la sección de Entrevistas conversamos con Reynaldo Cabezas y Pablo Garrido, encargados de la Oficina de Ingeniería para la Sustentabilidad de nuestra Facultad, y en Computación y Sociedad presentamos la labor de la Fundación Chilenter. Finalmente, concluimos el número con la sección Estudiantes DCC, donde algunxs egresadxs recientes nos cuentan sobre sus trabajos finales de pre y posgrado.

Esperemos que disfruten de la Revista. Como siempre, cualquier consulta o sugerencia, pueden escribirnos a bitsdeciencia@dcc.uchile.cl. ■



Fuzz Testing en el software de vuelo de un CubeSat:

Usando y analizando técnicas sistemáticas para mejorar la calidad de software en el ámbito aeroespacial bajo un contexto ágil



TAMARA GUTIÉRREZ

Magíster en Ciencias mención Computación por la Universidad de Chile. Actualmente se desempeña como investigadora científica en el Instituto para la Tecnología del Software del Centro Aeroespacial Alemán (DLR). Su línea de investigación está principalmente asociada al estudio y análisis de calidad de software de sistemas críticos dentro del área aeroespacial.

✉ tamara.gutierrezrojo@dlr.de



ALEXANDRE BERGEL

Doctor en Ciencias de la Computación por la Universidad de Berna, Suiza. Actualmente se desempeña como científico en RelationalAI. Fue Profesor Asociado de la Universidad de Chile hasta 2022. Sus líneas de investigación son ingeniería de software e inteligencia artificial para sistemas críticos.

🌐 <https://bergel.eu>



RESUMEN. El éxito de las misiones de CubeSats depende de su rendimiento en un ambiente extremo. El software de vuelo es un componente crítico que maneja estas operaciones. Aunque en otras áreas se incluyen técnicas de testing de software avanzadas, las soluciones de software para CubeSats dependen mayoritariamente de técnicas costosas en tiempo, mientras que los requerimientos de este tipo de misiones necesitan añadir “agilidad” al desarrollo.

En el trabajo que presentamos en este artículo, se desarrollaron y evaluaron técnicas de *fuzz testing* para facilitar las pruebas y mantener la robustez del software de vuelo de las misiones SUCHAI de la Universidad de Chile. Los resultados indican que *fuzz testing* mejoró la completitud de testing del software mediante la automatización y con muy poca interrupción en el desarrollo. Así, nuestras contribuciones muestran la diferencia en la forma en la que el software de vuelo es evaluado y las técnicas encontradas en la comunidad de ingeniería de software.

¿Qué es un CubeSat y para qué sirve?

Un CubeSat se define como un nanosatélite que tiene una forma cúbica y dimensiones estándares. La medida básica de un CubeSat, 1 unidad o “1U”, consiste en un cubo de 10 centímetros por arista. También existen CubeSats de más unidades, por ejemplo de “2U” o “3U”, dependiendo de la cantidad de subestructuras cúbicas que tenga el sistema. En la Figura 1 se muestra la imagen del CubeSat SUCHAI I, el primer satélite creado en Chile, cuya medida es de 1U.

El primer prototipo de un nanosatélite tipo CubeSat surgió hace veinte años aproximadamente. En un comienzo, los nanosatélites fueron creados con un propósito inicialmente educacional, gracias al cual los estudiantes son capaces de experimentar el desarrollo y la operación de un satélite durante el periodo que dura su carrera universitaria [1]. Hoy en día, los nanosatélites han abierto numerosas oportunidades no solo en el área educacional o científica, sino también en la industria debido, principalmente, a su bajo costo de desarrollo.

La importancia del software en un CubeSat y de su calidad

Para llevar a cabo una misión de CubeSats se requiere la participación de diversas áreas, principalmente, del campo ingenieril. El software es una de las partes fundamentales de una misión porque a través de sus instrucciones el sistema puede efectuar las distintas funciones para las que fue creado una vez en órbita. Uno de los componentes principales de un CubeSat es el computador a bordo, el cual ejecuta el software de vuelo. Este software permite al satélite realizar todas las operaciones necesarias de la misión y además realizar tareas para su mantención.

El uso y aplicaciones de los nanosatélites, y en especial, de los CubeSats, ha ido en aumento en los últimos años y aún se necesita superar múltiples desafíos para alcanzar su completo potencial [2]. Los nanosatélites cada vez requieren más atención a sus atributos de calidad para tener éxito en misiones más complejas. Específicamente, el software de vuelo de nanosatélites es un factor crítico para determinar la calidad de un satélite porque engloba toda la lógica del funcionamiento del sistema. La tasa de éxito de una misión depende altamente de la calidad de su software de vuelo [3].

¿Cuáles son las técnicas existentes para medir la calidad de software de un CubeSat?

En el campo espacial, varias técnicas de testing son usadas para asegurar la calidad del software de vuelo. Sin embargo, las técnicas más avanzadas solo son aplicables para misiones o sistemas más complejos, en términos de tiempo y costos, tales como los grandes satélites, rovers o misiones interplanetarias [4]. Dentro del estado del arte, las técnicas de testing aplicadas a software de vuelo de nanosatélites más mencionadas son *hardware in the loop simulation* (HILS) y *software in the loop simulation* (SILS) [5, 6]. Las metodologías de HILS y SILS pueden optimizar los costos totales del proceso de producción en algunas situaciones [7, 8]. Sin embargo, estas técnicas pueden ser difíciles de implementar y ejecutar, potencialmente riesgosas para el hardware cuando se ejecutan en modelos de vuelo o de ingeniería, y costosas en tiempo al preparar el ambiente de ejecución de las pruebas. Además, los casos de prueba deben estar predefinidos porque estas técnicas son

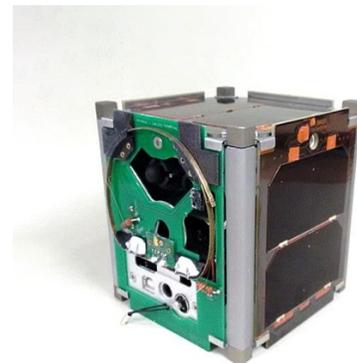


Figura 1. Prototipo del CubeSat SUCHAI I, cuya medida es de 1U.



Hasta el momento previo a la realización de este trabajo [...] las pruebas unitarias estaban basadas en las interfaces de los módulos principales del software, pero había cuatro pruebas diseñadas por módulo, a lo más.

complejas de automatizar [7]. Por otro lado, una revisión reciente de algunos frameworks relevantes de software de vuelo de nanosatélites muestra que solo tres de seis candidatos muestran el atributo de *confiabilidad*, el cual se refiere a la existencia de testing unitario con una significativa cobertura del código [9].

La habilidad de implementar diferentes técnicas de testing también recae en el diseño del software de vuelo. Los sistemas de manejo de comandos y datos están usualmente diseñados para recibir telecomandos enviados desde una estación terrena, ejecutar las acciones necesarias, y responder con datos obtenidos de la telemetría hacia la misma estación, tal y como se muestra en la Figura 2. Algunos diseños nuevos de software de vuelo explotan este concepto para implementar una arquitectura de software basada en comandos [10, 11]. Un diseño claro e interfaces bien documentadas pueden ayudar a implementar estrategias de testing que tratan al software de vuelo como una caja negra en lugar de intervenir el código con testing unitario o instrumentación.

Actualmente, las altas expectativas de los CubeSats están puestas en la posibilidad de desarrollar un gran número de satélites (megaconstelaciones) de una forma efectiva en costos [12, 13]. La efectividad del costo requiere que estas cons-

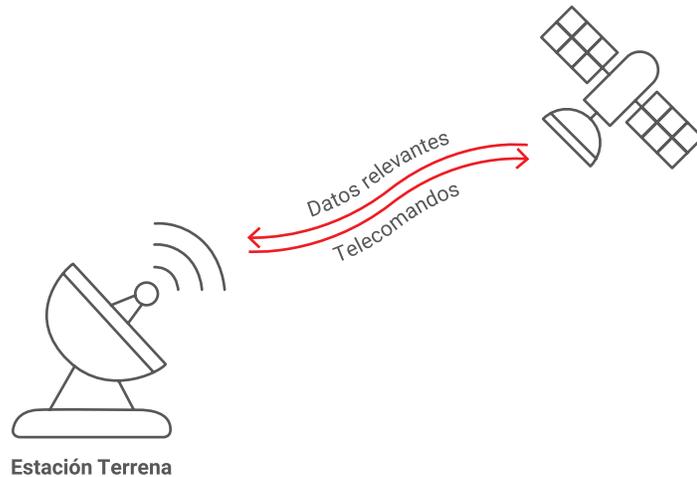


Figura 2. Operación de un nanosatélite. Envío de telecomandos desde una estación terrena hacia un CubeSat y envío de datos de telemetría de un CubeSat hacia una estación terrena.

telaciones puedan ser desarrolladas por pequeños grupos sin mucha experiencia (por ejemplo, startups) en ciclos cortos de desarrollo. Este hardware comercial tiene usualmente más capacidad de cómputo con menor consumo de energía, está más miniaturizado y actualizado con respecto a las necesidades tecnológicas. Sin embargo, generalmente el funcionamiento de este hardware y software no ha sido probado en el espacio con anterioridad, haciéndolos más riesgosos de utilizar en el espacio. La automatización de testing surge como la manera más efectiva en costo de mantener un desarrollo ágil mientras se asegura la calidad y robustez requerida en el sistema.

Las misiones SUCHAI y el software de vuelo SUCHAI Flight Software

El año 2017 fue lanzado desde el Centro Espacial Satish Dhawan, ubicado en

India, SUCHAI I¹. El satélite fue creado por un grupo de estudiantes, ingenieros e investigadores de distintas disciplinas en el Laboratorio de Exploración Espacial y Planetaria (SPEL) del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile. Esta primera misión tenía como objetivo realizar una serie de experimentos y demostraciones tecnológicas.

El software de vuelo del nanosatélite, llamado SUCHAI Flight Software, fue especialmente programado para la misión. SUCHAI Flight Software fue diseñado para ser altamente modular y flexible, y posee una arquitectura basada en comandos. De esta forma, los comandos pueden ser ejecutados automáticamente desde ciertos módulos del mismo software, o pueden ser enviados hacia la estación terrena para ejecutarse allí, tal como se muestra en la Figura 3.

Continuamente se han ido incorporando herramientas para mejorar la calidad

1 <https://www.uchile.cl/noticias/133697/suchai-i-hacia-un-programa-espacial>.

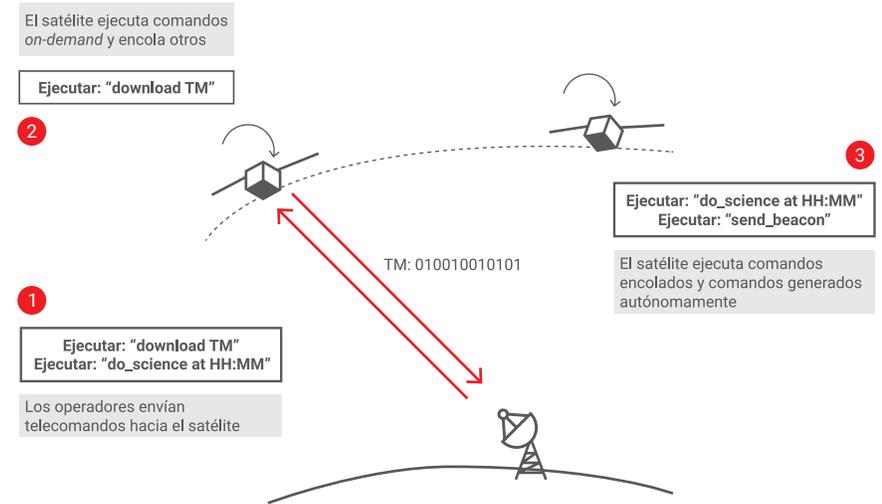


Figura 3. Operación del software de vuelo de los CubeSats SUCHAI bajo una arquitectura basada en comandos. Estos comandos pueden ser enviados directamente desde una estación terrena o ejecutarse automáticamente. Imagen obtenida de [10].

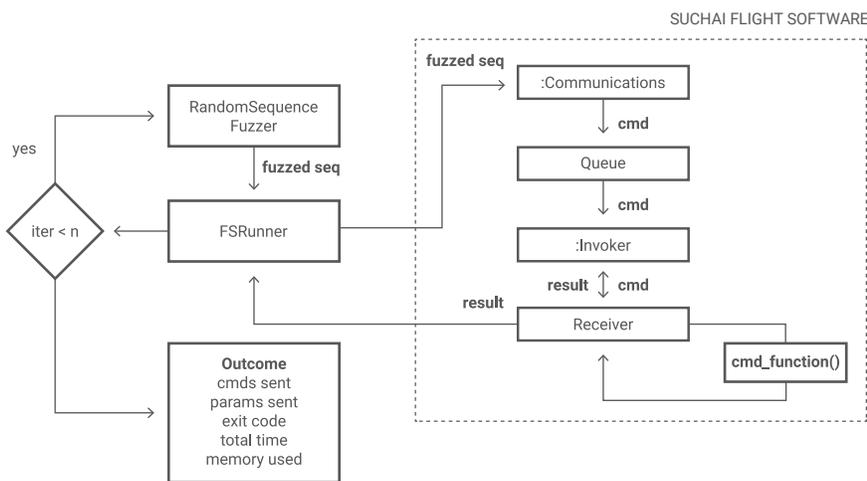


Figura 4. Diagrama lógico de la implementación de *fuzz testing* en el software de vuelo de las misiones SUCHAI. La aplicación consta de dos clases principales. *RandomSequenceFuzzer* representa el generador de secuencias y *FSRunner* ejecuta una instancia del software de vuelo y le envía las secuencias de comandos generadas. Los resultados principales a obtener tienen relación con el código de retorno del programa, el tiempo de ejecución y la memoria utilizada.

del software de vuelo [10], tales como una herramienta de visualización para evaluar su arquitectura y un sistema de integración continua, donde se incluyen

diferentes pruebas que se ejecutan cada vez que el software es modificado en el sistema de control de versiones donde se almacena.

Hasta el momento previo a la realización de este trabajo, las técnicas principales de testing aplicadas a SUCHAI Flight Software durante su desarrollo eran testing unitario, testing de integración y de simulación de hardware (*hardware in the loop simulation*). Las pruebas unitarias estaban basadas en las interfaces de los módulos principales del software, pero había cuatro pruebas diseñadas por módulo, a lo más. El sistema de testing de integración, que prueba la interacción entre los distintos módulos del sistema, consistía en ejecutar el software con una configuración específica y con casos de prueba conocidos por los operadores del satélite y desarrolladores del software. Por otro lado, las pruebas de simulación de hardware son costosas en general por el tiempo de preparación del ambiente de pruebas. Encima, estas estaban siendo ejecutadas en el mismo computador a bordo que se utiliza para la misión, lo cual requiere aún más cuidado en el diseño de las pruebas y el ambiente.

A partir de todo lo anterior, y también considerando los costos generales del proyecto para este tipo de misiones, que están basados en el tiempo y los recursos humanos principalmente, nace una necesidad de agilizar el proceso de verificación de calidad del software de vuelo para las siguientes misiones SUCHAI II, SUCHAI III y PlantSat. Estos nanosatélites fueron recientemente lanzados en abril de este año.

Fuzz testing en el software de vuelo de los nanosatélites SUCHAI

Fuzz testing es una técnica automatizada de testing que consiste en generar *inputs* aleatorios automáticamente para encontrar vulnerabilidades en un software [14]. En esta necesidad de encontrar una técnica de testing de software ágil y automatizable, estudiamos el uso



En total ejecutamos 25.760 secuencias en el software de vuelo de las misiones SUCHAI II, SUCHAI III y PlantSat.

de *fuzz testing* en el software de vuelo que se ocupa para las misiones de los nanosatélites SUCHAI [10]. Gracias a su diseño y aprovechando la arquitectura del software, este puede ser intervenido enviando comandos y observando su comportamiento. Así, la técnica fue implementada generando un conjunto de comandos aleatorios y parámetros. La aleatoriedad del número de comandos, el número de parámetros, la composición de los caracteres de los comandos, y la composición de los caracteres de los parámetros da lugar a cuatro estrategias propuestas dentro de este trabajo. En la Figura 4 se muestra y describe la lógica de esta implementación.

La ejecución de esta técnica de testing se llevó a cabo bajo un proceso sistemático que consistió en 8 *sprints*² con una duración de 1 a 2 horas cada sesión. Durante estas sesiones se entregó un reporte al equipo de desarrollo con las secuencias de comandos y parámetros que hacían que el software de vuelo terminara su ejecución debido a una falla. A partir de estos reportes, al comienzo de las sesiones se hizo una reproducción manual de las secuencias a estudiar para verificar el término del programa. De esta forma, cada una de las secuencias que producían fallas fueron reportadas en el repositorio de trabajo del equipo. Una vez que una falla era reportada, se procedía a identificar el problema específico y a resolverlo. Todas las fallas fueron caracterizadas a partir de un seguimiento a los cambios realizados al código en el sistema de control de versiones y un breve cuestionario que se le hizo al equipo de desarrollo. El cuestionario consistió en las tres preguntas base, las cuales se enumeran a continuación:

1. ¿Cuán importante es la falla?
2. ¿Cuán difícil es la falla de encontrar?
3. ¿Cuán difícil es la falla de arreglar?

Finalmente, para prevenir la ocurrencia de la misma fallas en nuevas versiones del software, las secuencias identificadas sirvieron como casos de prueba y se agregaron como tests unitarios a un servidor de integración continua utilizado para hacer pruebas automáticas.

Para cada estrategia ejecutamos secuencias de diferentes tamaños. Cada secuencia podía contener 5, 10, 50 o 100 comandos. En total ejecutamos 25.760 secuencias en el software de vuelo de las misiones SUCHAI II, SUCHAI III y PlantSat. Inicialmente, esta ejecución duró aproximadamente tres días. En una réplica de este experimento con las mismas secuencias, la ejecución duró aproximadamente dos días. La réplica de este experimento fue llevada a cabo para analizar el tiempo de ejecución en un computador con otras características, incluyendo una mayor capacidad de almacenamiento y procesamiento.

Resultados y principales conclusiones

A partir de la ejecución de *fuzz testing* en el software de vuelo de SUCHAI encontramos 12 secuencias que hacían que el programa fallara en su ejecución. Cada una de estas secuencias hacía fallar al programa debido a la ejecución de un comando específico. El equipo de desarrollo identificó 10 comandos en particular que producían fallas. La

Figura 5 muestra la frecuencia de ocurrencia de los comandos que aparecen en las secuencias que hicieron que fallara la ejecución del software, clasificados por cada uno de los módulos del programa, los cuales están representados por un cierto color. Si un comando está escrito en color rojo en el eje X, significa que se identificó una falla con ese comando. De la misma figura se pueden identificar los comandos que hicieron fallar la ejecución del software de vuelo. Siete de los 10 comandos identificados aparecían con más frecuencia en las secuencias.

Las principales conclusiones de la caracterización de fallas indican que 11 de las 12 fallas fueron consideradas fáciles de encontrar por el equipo de desarrolladores y que 8 de las 12 fallas fueron consideradas fáciles de solucionar. Sin embargo, 8 de los 10 comandos encontrados fueron considerados críticos para el software porque se ejecutan en el computador a bordo directamente. El máximo número de líneas de código y de funciones modificadas para arreglar una falla fue 375 y 10, respectivamente.

El trabajo que realizamos [15] presentó el impacto de utilizar *fuzz testing* para verificar la correcta operación de un software de vuelo de nanosatélites. La evaluación fue llevada a cabo en una serie de tres nanosatélites que en ese momento estaban siendo desarrollados en la Universidad de Chile (SUCHAI II, SUCHAI III y PlantSat). De esta forma se presenta una metodología que hemos desarrollado para aplicar *fuzz testing* al software de vuelo de nanosatélites como parte de un proceso ágil de desarrollo de software de vuelo de CubeSats. Además se destaca y discute los desafíos que enfrentamos y describe los principales requerimientos para implementar esta técnica en proyectos similares, y presenta un estudio de caso convincente aplicando técnicas modernas de testing a un software embebido crítico lo cual, creemos, abre un nicho en

2 Periodos definidos donde un equipo trabaja para completar una cierta cantidad de trabajo. Corresponde a la metodología ágil Scrum.

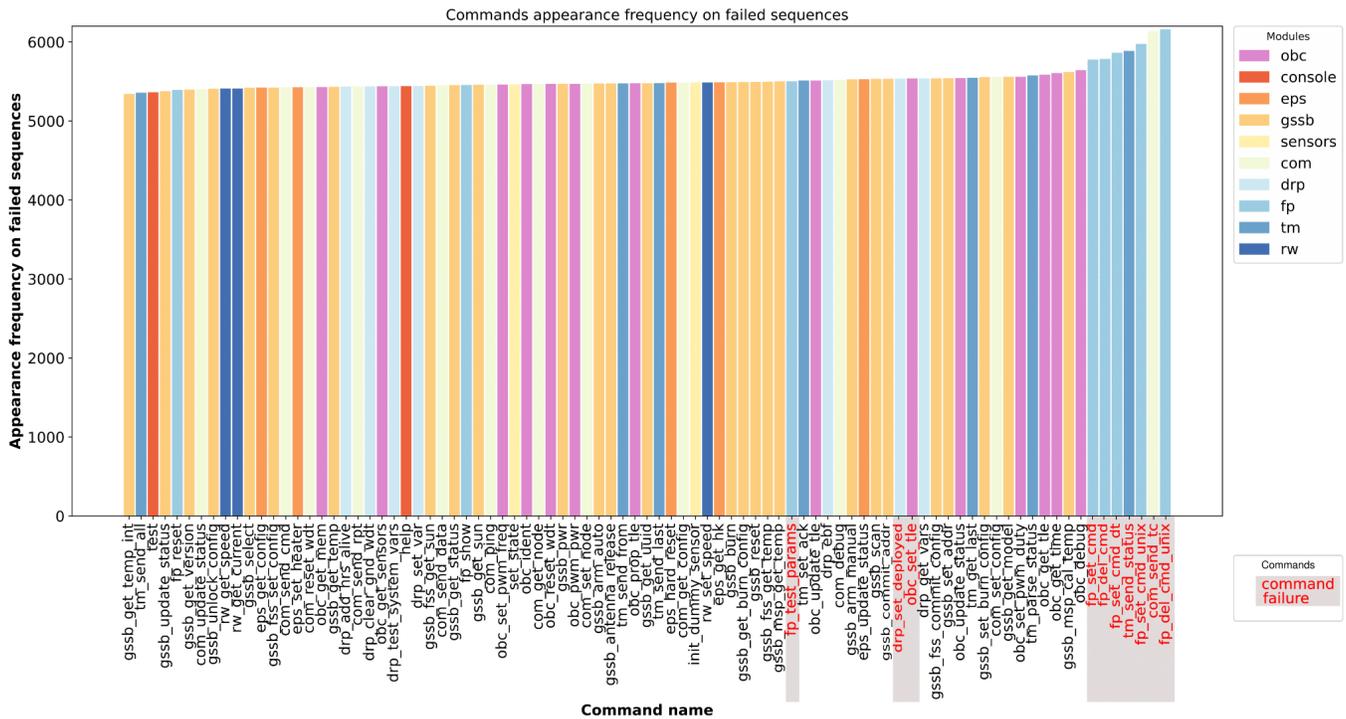


Figura 5. Frecuencia de aparición de los comandos en las secuencia que hicieron fallar la ejecución del software, clasificados por tipo de comando (módulo). Los comandos que hicieron fallar la ejecución del software de vuelo de las misiones SUCHAI están escritos en rojo en el eje X (*identified command failure*).

el campo de testing de software de vuelo de nanosatélites.

La experiencia de este trabajo nos indica que preparar el software de vuelo para líneas de montaje más grandes puede ser desafiante y requiere agilidad y automatización con respecto al testing para alcanzar la robustez deseada. Sin embargo, el testing de software de vuelo es aún un área incipiente. Actualmente, solo han sido reportadas experiencias esporádicas, y, hasta el momento, se han propuesto prácticas de testing de bajo costo no dedicadas. Un software de vuelo es un componente altamente valioso, y las técnicas para mejorar su robustez merecen ser cuidadosamente estudiadas y diseminadas.

Mientras el área de ingeniería de software ha producido muchas técnicas, in-

cluyendo *fuzz testing*, no hay un reporte público de su uso en software de vuelo de CubeSats. En ese sentido, nuestras contribuciones mejoran las prácticas de testing de software de vuelo, las cuales actualmente son llevadas a cabo de una forma no automatizada. Nuestras observaciones desde diferentes agencias de investigación que desarrollan software de vuelo dejan ver una brecha entre la forma en que el software de vuelo es desarrollado y las técnicas propuestas por la comunidad de ingeniería de software.

En el trabajo de tesis “Systematic Fuzz Testing Techniques on a Nanosatellite for Agile Mission Development” [16] también se presenta un análisis de esta aplicación a otros software de vuelo, un caso de estudio para el software de vuelo “FPrime”, que fue desarrollado

A partir de la ejecución de fuzz testing en el software de vuelo de SUCHAI encontramos 12 secuencias que hacían que el programa fallara en su ejecución.

por la NASA, y el estudio de la ejecución de las mismas estrategias en otras arquitecturas de las misiones SUCHAI como una extensión de este trabajo. Los próximos pasos de esta investigación debieran incluir el estudio de estrategias más avanzadas con un enfoque en una identificación de fallas guiadas por la cobertura del código u otras métricas de análisis dinámico. ■



REFERENCIAS

- [1] T. Villela, C. A. Costa, A. M. Brandão, F. T. Bueno, and R. Leonardi, "Towards the thousandth cubesat: A statistical overview", *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2019, 2019.
- [2] E. National Academies of Sciences, Medicine, et al., *Achieving science with CubeSats: Thinking inside the box*. National Academies Press, 2016.
- [3] D. L. Dvorak, "NASA Study on Flight Software Complexity", in *AIAA Infotech@Aerospace Conference and AIAA Unmanned...Unlimited Conference*, (Reston, Virginia), p. 264, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [4] J. Finnigan, "A scripting framework for automated flight sw testing: Van allen probes lessons learned", in *2014 IEEE Aerospace Conference*, pp. 1–10, 2014.
- [5] J. Kiesbye, D. Messmann, M. Preisinger, G. Reina, D. Nagy, F. Schummer, M. Mostad, T. Kale, and M. Langer, "Hardware-In-The-Loop and Software-In-The-Loop Testing of the MOVE-II CubeSat", *Aerospace*, vol. 6, p. 130, 2019.
- [6] J. Schoolcraft, A. T. Klesh, and T. Werne, "MarCO: Interplanetary Mission Development On a CubeSat Scale", in *SpaceOps 2016 Conference*, *SpaceOps Conferences*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [7] J. A. Ledín, "Hardware-in-the-loop simulation", *Embedded Systems Programming*, vol. 12, pp. 42–62, 1999.
- [8] S. Jeong, Y. Kwak, and W. J. Lee, "Software-in-the-loop simulation for early-stage testing of autosar software component", in *2016 Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pp. 59–63, IEEE, 2016.
- [9] D. José Franzim Miranda, M. Ferreira, F. Kucinskis, and D. McComas, "A Comparative Survey on Flight Software Frameworks for 'New Space' Nanosatellite Missions", *Journal of Aerospace Technology and Management*, p. e4619, 2019.
- [10] C. E. González, C. J. Rojas, A. Bergel, and M. A. Díaz, "An Architecture-Tracking Approach to Evaluate a Modular and Extensible Flight Software for CubeSat Nanosatellites", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 126409–126429, 2019.
- [11] S. Nakajima, J. Takisawa, S. Ikari, M. Tomooka, Y. Aoyanagi, R. Funase, and S. Nakasuka, "Command-centric architecture (c2a): Satellite software architecture with a flexible reconfiguration capability", *Acta Astronautica*, vol. 171, pp. 208–214, 2020.
- [12] C. Boshuizen, J. Mason, P. Klupar, and S. Spanhake, "Results from the planet labs flock constellation", in *Proc. AIAA/USU Conf. Small Satell.*, pp. 1–8, 2014.
- [13] I. F. Akyildiz and A. Kak, "The Internet of Space Things/CubeSats", *IEEE Netw.*, vol. 33, no. 5, pp. 212–218, 2019.
- [14] P. Godefroid, "Fuzzing: hack, art, and science", *Communications of the ACM*, vol. 63, pp. 70–76, 2020.
- [15] T. Gutiérrez, A. Bergel, C. E. González, C. J. Rojas, & M. A. Díaz. Systematic Fuzz Testing Techniques on a Nanosatellite Flight Software for Agile Mission Development. *IEEE Access*, 9, pp. 114008-114021, 2021.
- [16] T. Gutiérrez Rojo, Systematic fuzz testing techniques on a nanosatellite flight software for agile mission development, 2022.



Premio Turing 2021:

Jack J. Dongarra, el héroe de la ciencia e ingeniería computacional

K
C K
C K
A C K
P A C K
N P A C K
I N P A C K
L I N P A C K

L A P A C K
L -A P -A C -K
L A **P A** -C -K
L -A **P -A** -C K
L A -P -A **C K**
L -A -P A **C -K**

Ganador del Premio Turing 2021



Foto: Tara Kneiser

Jack. J. Dongarra



CRISTÓBAL NAVARRO

Doctor en Ciencias de la Computación por la Universidad de Chile. Actualmente es Profesor Asociado del Instituto de Informática de la Universidad Austral de Chile. Sus líneas de investigación son la computación de alto rendimiento, en especial GPU Computing. Actualmente investiga en integrar el uso de núcleos regulares, de tensor, y de ray-tracing para acelerar aplicaciones que están fuera del marco de inteligencia artificial y computación gráfica. Lidera el grupo de investigación Temporal (<http://temporal.uach.cl>) y es el coordinador del supercomputador Patagón (<https://patagon.uach.cl>).

✉ cristobal.navarro@uach.cl



NANCY HITSCHFELD KAHLER

Profesora Titular del Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Chile. Doctora en Technischen Wissenschaften por la ETH-Zurich, Suiza. Líneas de investigación: mallas de polígonos y poliedros, algoritmos paralelos (computación en GPU), algoritmos en ciencia e ingeniería computacional y educación en computación. Participa activamente en comisiones y actividades para atraer mujeres a STEM. Miembro del React Lab (Rethinking Education by Advancing Computational Thinking) y del CEMCEN (CEnter for Modern Computational ENgineering). En este último, lidera el +Lab, Meshing for Applied Science.

✉ nancy@dcc.uchile.cl

RESUMEN. Para apreciar de manera más clara las contribuciones de Dongarra, en este artículo describimos, primero, brevemente las dos estrategias más usadas para abordar la solución de un problema de manera paralela y los desafíos existentes en la programación de computadores de alto rendimiento. A continuación, presentamos a Dongarra y detallamos sus principales contribuciones, tanto en la creación de bibliotecas de software de álgebra lineal numérica, de acceso abierto, para el desarrollo de aplicaciones en ciencia e ingeniería, como en las estrategias computacionales creadas para optimizar y hacer el uso más eficiente posible del hardware disponible, con impacto no solo en el ámbito que motivó su creación. Finalmente, concluimos resumiendo sus aportes y el impacto que han tenido.

Paralelismo: un pilar para la computación de alto rendimiento

Desde las últimas décadas, el rendimiento computacional crece principalmente por el aumento en la cantidad de núcleos de procesamiento que se alojan en un chip [1], y no tanto por la velocidad (GHz) de cada núcleo (los límites térmicos del silicio impiden progresar significativamente en esta dirección). Este aumento de núcleos incrementa el paralelismo de un procesador. La programación de un procesador paralelo en general no es automática, es decir, el programador debe pensar en cómo dividir el trabajo, comunicar las partes, asignar recursos a cada subproblema, balancear trabajo, hacer uso de la jerarquía de memoria (registros, *caché*, RAM, almacenamiento) eficientemente, entre otras cosas, para poder lograr que el software pueda escalar su ren-

dimiento ante la presencia de hardware paralelo. En términos generales, existen dos tipos de paralelismo; el paralelismo de datos (*data parallelism*) y el paralelismo de tareas (*task parallelism*) (ver Figura 1) [2, 3]. El primero, es el paralelismo que emerge cuando se dividen los datos para que puedan ser trabajados simultáneamente por alguna función replicada en los núcleos del procesador, así esta función actúa simultáneamente en las distintas regiones de datos. Ejemplos de problemas *data-parallel* son las operaciones de álgebra lineal, como operaciones con vectores (suma, resta, producto) o las operaciones con matrices (producto, suma, resta, valores propios, etc.). Por otro lado, el paralelismo de tareas consiste en dividir la funcionalidad en vez de los datos, es decir una función se subdivide en distintas funciones menores que puedan ser ejecutadas de forma simultánea por los núcleos del procesador, sobre un conjunto común de datos. Ejemplos de problemas *task-parallel*

son los sistemas de monitoreo redundantes en aviones o naves espaciales, un algoritmo para romper una clave de seguridad o una sucesión de funciones sobre datos que fluyen (más conocido como *pipeline*). En la práctica, un problema puede exhibir ambos tipos de paralelismo mencionados, sin embargo en la ciencia computacional podemos encontrar que predominan los problemas *data-parallel*, en gran parte debido a que la mayoría son planteados con álgebra lineal, es decir en base a operaciones de vectores y matrices.

La programación de las soluciones paralelas a estos problemas es lo que tradicionalmente se conoce como hacer computación de alto rendimiento o High Performance Computing (HPC), la cual es un área que busca desarrollar algoritmos que hagan un uso eficiente de los recursos de un computador. La evolución de los procesadores centrales (CPU) hacia la flexibilidad los han hecho los candidatos a solucionar todo tipo de problemas (cualquier combinación de *data* o *task parallel*), mientras que la evolución de los procesadores gráficos (GPU) al paralelismo masivo y recientemente a la inclusión de núcleos de *tensor* y *ray-tracing*, los ha convertido en ideales para acelerar aplicaciones *data-parallel*, como álgebra lineal, simulaciones de partículas, inteligencia artificial y computación gráfica, entre otras.

El desafío de programar CPUs y GPUs en paralelo (ver Figuras 2 y 3) se convierte en una tarea aún más compleja cuando se trata de supercomputadores, donde hay decenas de computadores conectados y esperando trabajar como un gran sistema. Es aquí donde las contribuciones de algoritmos y software de Dongarra han sido una herramienta clave para que desde distintas disciplinas de la ciencia, sea posible hacer ciencia computacional a gran escala empleando HPC y contestar preguntas que puedan expandir el horizonte del conocimiento científico.

Su mayor contribución ha sido en la creación de código abierto, bibliotecas de software y estándares para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales.

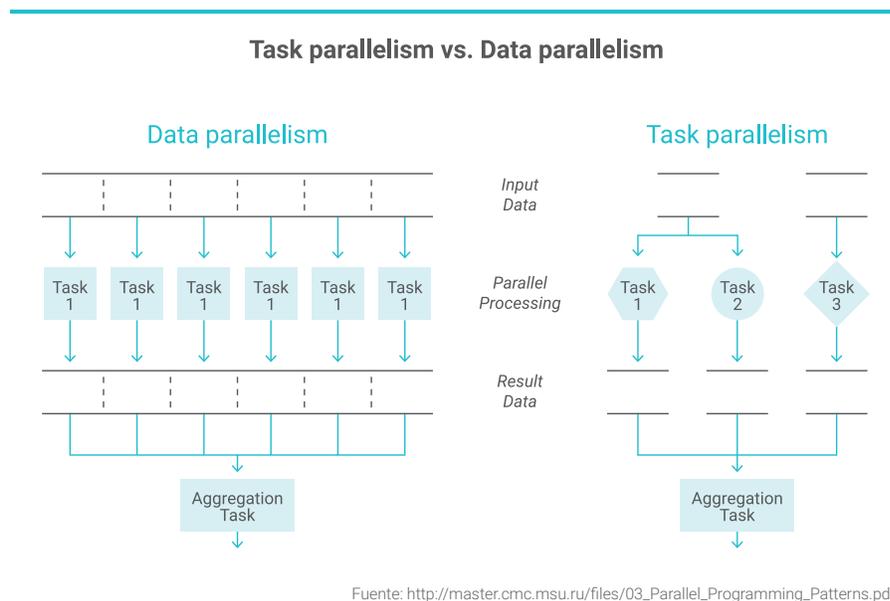


Figura 1. Paralelismo de datos versus paralelismo de tareas.

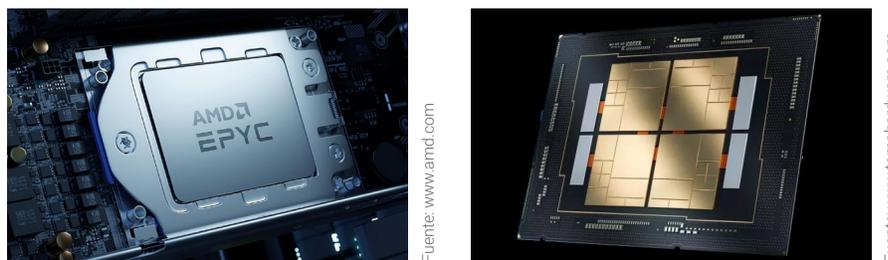


Figura 2. CPUs servidor: AMD EPYC 7773 (izquierda) e Intel Sapphire Rapids (derecha).



Figura 3. GPUs: NVIDIA H100 (izquierda) y GPU consumidor RTX 4090 (derecha).



Jack Dongarra y sus contribuciones en ciencias de la computación y en computación para la ciencia e ingeniería

Dongarra (de nacionalidad estadounidense) obtuvo una Licenciatura en Matemáticas de la Chicago State University (1972), un Máster en Informática del Instituto de Tecnología de Illinois (1973), y un Doctorado en Applied Mathematics de la University of New Mexico (1980). Su tesis de doctorado fue sobre cómo mejorar la precisión del cálculo computacional de los valores propios de una matriz. Desde esa fecha hasta el año 1989 trabajó en el Argonne National Laboratory, adquiriendo el cargo de científico senior. Tiene actualmente un nombramiento como profesor distinguido de ciencias de la computación tanto en los Departamentos de Ingeniería Eléctrica como Ciencias de la Computación de la University of Tennessee y mantiene el nombramiento de investigador distinguido en la División de Matemáticas y ciencias de la computación del Laboratorio Nacional de Oak Ridge desde 1989. También se desempeña como Turing Fellow en la Manchester University (Reino Unido) desde 2007 y es profesor adjunto del Departamento de Ciencias de la Computación de la Rice University. Es también director del Center for Information Technology Research de la University of Tennessee, el cual coordina y facilita los esfuerzos de investigación en TI dentro de la Universidad.

Dongarra se especializó en algoritmos numéricos para resolver problemas usando álgebra lineal, computación paralela, metodologías de programación y herramientas para programación paralela entre otras. Su mayor contribución ha sido en la creación de código abierto, bibliotecas de software (más conocidas como librerías por ser similar a *library*) y estándares para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. Es increíble

observar que de las más de 100.000 citas que tiene en Google Scholar, más de 40.000 citas son de las guías de usuarios de las librerías de software desarrolladas, y entre los diez documentos más citados, nueve son guías al usuario [4].

Librerías para álgebra lineal numérica

Dongarra se ha dedicado al desarrollo de estas librerías por más de cuarenta años, asumiendo un rol de principal implementador o investigador principal de las bibliotecas conocidas como LINPACK, BLAS, LAPACK, ScaLAPACK, PLASMA, MAGMA, y SLATE (ver Figura 4). Todas estas bibliotecas son para resolver problemas usando álgebra lineal numérica, y las distintas versiones muestran su evolución en el tiempo al ser reimplementaciones para optimizar el uso del potencial de la última generación de computadores de alto rendimiento. Para lograr entender la evolución en el tiempo, creemos que es interesante describir el énfasis que tiene cada una de ellas.

LAPACK (Linear Algebra Package) [5] provee rutinas para resolver sistemas de ecuaciones lineales, mínimos cuadrados lineales, problemas relacionados a valores propios y descomposición en valores singulares (ver Figura 5). Las rutinas permiten trabajar con matrices de números reales e imaginarios, usando precisión simple (*floating point 32-bits*) y doble (*floating point 64-bits*). Además, provee varias rutinas para implementar factorización de matrices. Originalmente fue implementada en Fortran 77 pero el año 2008 fue reescrita a Fortran 90. LAPACK está implementado sobre la librería BLAS (Basic Linear Algebra Subprograms) [6] para proveer portabilidad de las rutinas mencionadas anteriormente. Es interesante mencionar que LAPACK no fue la primera librería estándar desarrollada bajo el liderazgo de Dongarra. LAPACK fue diseñada como sucesora de LINPACK, que proveía rutinas para el cálculo de mínimos cuadrados y la resolución de ecuaciones lineales,



Figura 4. Logos de las bibliotecas MAGMA y SLATE.

```
#define GLAS_COMPLEX
#include <glas/toolbox/bindings/dense_matrix_bindings.hpp>
#include <glas/toolbox/bindings/dense_vector_bindings.hpp>
#include <glas/container/dense_matrix.hpp>
#include <glas/container/dense_vector.hpp>
#include <boost/numeric/bindings/lapack/gees.hpp>

...

int main () {
  int n=100;

  // Define a real n x n matrix
  glas::dense_matrix<double> matrix(n, n);

  // Define a complex n vector
  glas::dense_vector<std::complex<double>> eigval(n);

  // Fill the matrix
  ...

  // Call LAPACK routine DGEES for computing the eigenvalue
  Schur form.
  // We create workspace for best performance.
  bindings::lapack::gees(matrix, eigval, bindings::lapack::optimal_
    workspace());
  ...
}
```

Fuente: www.semanticscholar.org

Figura 5. Ejemplo de código C++ para calcular los valores propios de una matriz, usando la librería LAPACK.

de EISPACK que proveía rutinas relacionadas a valores propios. LINPACK y EISPACK fueron escritas en Fortran 77 entre los años 1970 y 1980, ambas diseñadas para correr en los computadores vectoriales modernos de aquella época. En comparación a sus antecesoras, LAPACK fue diseñada para explotar la memoria caché y el paralelismo a nivel de instrucciones de máquina, de los modernos procesadores superescalares de aquella época, y así lograr rutinas que corran varios órdenes de magnitud más rápido que las de LINPACK en esos computadores, usando una librería BLAS bien configurada. Cabe mencionar que LAPACK ha sido extendida para correr en ambientes distribuidos en bibliotecas conocidas como ScaLAPACK y PLAPACK.



Y como veremos a continuación, Dongarra no se pudo quedar atrás cuando aparecieron los procesadores multinúcleos y las GPUs (Graphics Processing Units) con su gran poder de cálculo. Es así cómo se desarrolla PLASMA [7] y MAGMA [8]. PLASMA es para abordar las deficiencias de rendimiento de las librerías LAPACK y ScaLAPACK sobre arquitecturas *multi-core*, pero no implementa todas las rutinas existentes en las librerías anteriores. PLASMA provee una nueva implementación de las rutinas en donde se logra mayor eficiencia al usar procesadores multinúcleos, pero no reemplaza completamente a LAPACK ni a ScaLAPACK. Además incorpora nuevos algoritmos y versiones mejoradas de otros. Entre sus funcionalidades están rutinas que permiten resolver sistemas de ecuaciones lineales densos, mínimos cuadrados lineales y distintos métodos de factorización de matrices, entre otras. Por otra parte, MAGMA se desarrolló con la idea de abordar los complejos desafíos de los ambientes híbridos emergentes, en donde las soluciones combinan las fortalezas de los algoritmos en distintas arquitecturas. Es así como los algoritmos para álgebra lineal fueron diseñados e implementados para correr sobre procesadores multinúcleos y GPUs explotando lo mejor de cada arquitectura.

Actualmente, en pleno proceso de desarrollo se encuentra SLATE (Software for Linear Algebra Targeting Exascale) [9], cuyo objetivo es reemplazar a todas las anteriores. La idea es que los algoritmos implementados usen todo el potencial de desempeño disponible y provean la escalabilidad máxima al correr sobre los actuales *clusters* de computadores, en donde cada nodo puede tener un gran número de *cores* y GPUs. En cuanto a eficiencia se desea lograr el peak teórico de desempeño y escalar al tamaño completo del computador, es decir, correr los algoritmos desde miles a decenas de miles de nodos. Esto debe ser provisto de una manera portable usando estándares como MPI (Message Passing Interface).

Innovaciones técnicas computacionales

La clave de la propagación casi universal del uso de las librerías de Dongarra es, por un lado, la funcionalidad que proveen, útiles por ejemplo, para resolver problemas en ciencia e ingeniería modelados con ecuaciones diferenciales parciales cuya solución numérica requiere resolver sistemas de ecuaciones lineales y, por otro lado, proveyendo versiones de sus bibliotecas que van a la par del desarrollo del hardware de alto rendimiento. Es así como estas librerías fueron evolucionando, han estado y están disponibles para procesadores individuales, computadoras paralelas, multinúcleo y varias GPU por nodo. Las bibliotecas de Dongarra no solo son importantes por su utilidad para los avances en nuevo conocimiento científico y tecnológico, sino también porque durante su desarrollo motivó innovaciones computacionales importantes en temáticas tales como, *autotuning*, aritmética de precisión mixta y cálculos *batch*, aportes que vamos a mencionar a continuación:

Autotuning: Dongarra fue pionero en desarrollar algoritmos para la generación automática y optimización de software numérico en computadores que van desde los computadores personales hasta computadores de alto desempeño [10]. Si bien BLAS le permitía generar librerías portables y eficientes para computadoras de alto rendimiento secuenciales, vectoriales y de memoria compartida, debían optimizarlas manualmente, siendo un proceso costoso y tedioso de lograr para cada arquitectura en particular. El programador debía comprender la arquitectura, la forma de usar la jerarquía de memoria para almacenar y acceder a los datos de manera óptima, manipular las unidades funcionales y los registros para generar instrucciones apropiadas en el momento correcto y la mejor manera de usar la optimización del compilador [10]. La tecnología presentada en

Estas librerías fueron evolucionando [...] están disponibles para procesadores individuales, computadoras paralelas, multinúcleo y varias GPU por nodo.

este primer artículo fue más tarde aplicada a la configuración automática de software en otras áreas. De cierta forma, si no fuese por las contribuciones de Dongarra, muchos supercomputadores habrían sido inutilizados o usados de forma muy ineficiente.

Aritmética de precisión mixta: Dongarra fue pionero en aprovechar múltiples precisiones de aritmética de punto flotante para ofrecer soluciones precisas más rápidamente [11]. La idea consiste en usar una precisión menor (menos bits) siempre donde sea posible (que no afecte el resultado final), debido a que las operaciones matemáticas que usan la mitad de bits que lo original (por ejemplo, 16 en vez de 32 bits) son al menos dos veces más rápidas. Este trabajo se ha vuelto fundamental y muy útil en los avances y desarrollo de aplicaciones de *machine learning*, como se mostró recientemente en el benchmark HPL-AI [12]. HPL-AI (High Performance LINPACK for Accelerator Introspection) benchmark permite el uso de aritmética de precisión mixta para resolver sistemas de ecuaciones lineales. A la vez, esta biblioteca resalta la reciente convergencia entre inteligencia artificial y HPC.

Subdivisión del trabajo: Dongarra fue pionero en el paradigma de dividir la forma de operar sobre matrices densas grandes, que se usan comúnmente en simulaciones, modelación y análisis de datos, en muchos cálculos de tareas pequeñas que se pueden calcular de forma independiente y simultánea. Para mostrar que esto era posible,



Dongarra dirigió y diseñó la reingeniería de la librería BLAS para que sus rutinas, en particular la multiplicación de matrices pueda ser hecha por muchos *threads* que corren en paralelo multiplicando pedazos pequeños de la matriz usando las GPUs [13].

Diseño de interfaces: Otras contribuciones incluyen MPI, el estándar de facto para el paso de mensajes portátiles en arquitecturas informáticas paralelas y distribuidas, y la API de rendimiento (PAPI), que proporciona una interfaz que permite recopilar y sintetizar el rendimiento de los componentes de un sistema heterogéneo. Los estándares que ayudó a crear, como MPI, LINPACK Benchmark y la lista Top500 (www.top500.org) de supercomputadoras, la cual es una referencia mundial, han permitido alcanzar logros computacionales desde la predicción del clima en tiempo real hasta el cam-

bio climático, el desarrollo de curas para múltiples virus, análisis de datos de experimentos físicos y simulaciones a escalas interestelares.

Epílogo

Las contribuciones de Dongarra, base fundamental de las bibliotecas numéricas más utilizadas del mundo, han aportado profundamente en cada área de la computación científica, estableciendo un marco a partir del cual *l@s científic@s* e *ingenier@s* han podido hacer importantes descubrimientos e innovaciones en áreas que incluyen las energías renovables, predicción meteorológica y cambio climático, genómica, el descubrimiento de fármacos, la ingeniería aeroespacial, economía, diseño y fabricación de nuevos semiconductores, y análisis de grandes

volúmenes de datos, por nombrar algunas. Con el desarrollo de sus librerías de álgebra lineal numérica ha permitido que la comunidad científica y profesional, sin la necesidad de conocimientos computacionales y de hardware profundos, pueda usarlos de manera óptima y avanzar en sus investigaciones y desarrollos para generar más tecnología y conocimiento.

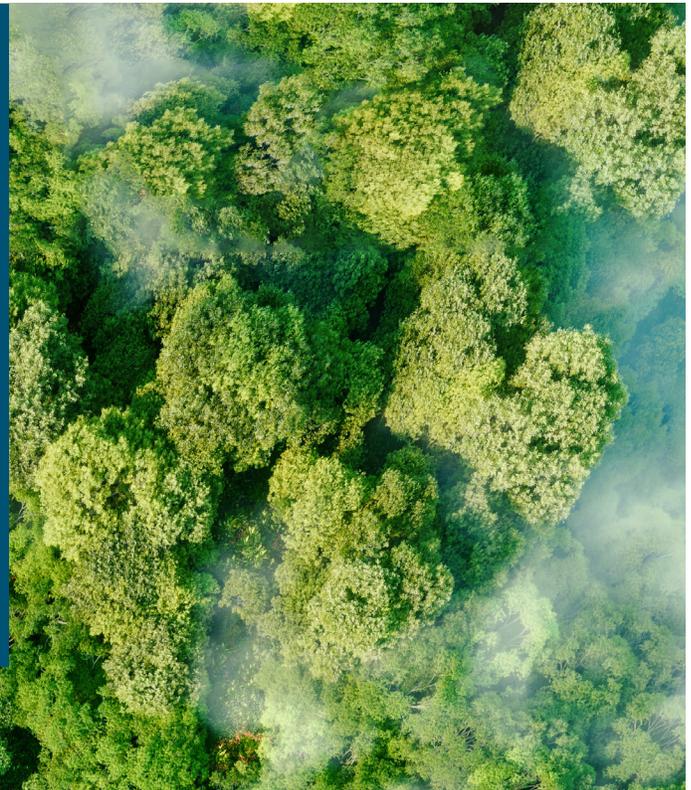
Su trabajo pionero se remonta a 1979 y sigue siendo uno de los líderes más destacados y activamente comprometidos en la comunidad HPC. Su carrera ciertamente ejemplifica el reconocimiento del Premio Turing a las “grandes contribuciones de importancia duradera”. Sin duda para la realización de los trabajos anteriores, Dongarra ha colaborado internacionalmente con muchas personas y ha dirigido y formado a muchas personas en su calidad de supervisor de tesis de magister y doctorado. ■

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hockney RW, Jesshope CR. *Parallel Computers 2: architecture, programming and algorithms*. CRC Press; 2019.
- [2] Navarro C A, Hitschfeld-Kahler N y Mateu L. A survey on parallel computing and its applications in data-parallel problems using GPU architectures. *Communications in Computational Physics*. 2014; 15(2):285-329.
- [3] Kirk DB y Wen-Mei WH. *Programming massively parallel processors: a hands-on approach*. Morgan Kaufmann; 2016.
- [4] Jack J. Dongarra. [Link Google Scholar](#).
- [5] LAPACK. <https://netlib.org/lapack/> y <https://en.wikipedia.org/wiki/LAPACK>.
- [6] Blackford LS, Petitet A, Pozo R, Remington K, Whaley RC, Demmel J, et al. An updated set of basic linear algebra subprograms (BLAS). *ACM Transactions on Mathematical Software*. 2002;28(2):135–51.
- [7] PLASMA. <https://icl.utk.edu/projectsfiles/plasma/html/doxygen/>.
- [8] MAGMA. <https://icl.utk.edu/magma/>.
- [9] SLATE. <https://icl.utk.edu/slate/>.
- [10] R. Clint Whaley y Jack J. Dongarra. Automatically tuned linear algebra software. *Proceedings of the 1998 ACM/IEEE conference on Supercomputing*. 1988. pp: 1–27.
- [11] Julie Langou, Piotr Luszczek, Jakub Kurzak, Alfredo Buttari y Jack Dongarra. Exploiting the performance of 32 bit floating point arithmetic in obtaining 64 bit accuracy (revisiting iterative refinement for linear systems). *Proceedings of the 2006 ACM/IEEE conference on Supercomputing*. 2006. pp 113–es.
- [12] HPL-AI. <https://www.r-ccs.riken.jp/labs/lpnctr/projects/hpl-ai/index.html>.
- [13] Abdelfattah A, Haidar A, Tomov S y Dongarra J. Performance, Design, and Autotuning of Batched GEMM for GPUs. 2016 International Conference on High Performance Computing. LNCS.



La huella de carbono del aprendizaje profundo



IVAN SIPIRÁN

Profesor Asistente del Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Chile. Obtuvo su Doctorado en Ciencias de la Computación en la Universidad de Chile el año 2014. Posteriormente realizó una estancia postdoctoral en la Universidad de Konstanz en Alemania. Sus áreas de investigación son procesamiento geométrico y análisis de formas, visión computacional 3D y computación gráfica aplicada a la herencia cultural.

✉ isipiran@dcc.uchile.cl

🐦 [@isipiran](https://twitter.com/isipiran)



RESUMEN. Los modelos de aprendizaje profundo son cada vez más ubicuos. Empresas y grupos de investigación alrededor del mundo entrenan y usan redes neuronales que requieren de una alta capacidad de cómputo y de hardware especializado para realizar procesamiento tensorial a gran escala. En este artículo abordamos el tema del costo energético y la huella de carbono que deja el trabajo en aprendizaje profundo. Para lograr el cometido, primero presentamos las definiciones que ayudan a comprender cómo se puede calcular la huella de carbono de los modelos de aprendizaje profundo. Luego, describimos aproximadamente cuánto carbono se emitió para la creación de un modelo popular de procesamiento de lenguaje natural, GPT-3. Finalmente, presentamos algunas reflexiones y líneas de acción para afrontar el potencial problema ambiental de crear y usar inteligencia artificial.

En los últimos meses hemos visto cómo han ganado popularidad los modelos de inteligencia artificial (IA) que generan imágenes fotorealistas desde una descripción textual ingresada por un usuario. Estos modelos de IA creativa, tales como DALL-E [1], Imagen [2] o Stable Diffusion [3] son entrenados para encontrar asociaciones entre una imagen y el texto que le corresponde como descripción. Para lograr este objetivo, estas redes neuronales necesitan ser entrenadas con cantidades inmensas de datos, y por lo tanto requieren de una capacidad computacional considerable para su aprendizaje. Por ejemplo, DALL-E 2 tiene alrededor de 3.5 billones de parámetros, Imagen tiene alrededor de 4.6 billones de parámetros y Stable Diffusion tiene alrededor de 890 millones de parámetros (en este artículo usamos la escala corta para representar los números grandes, ya que

DALL-E 2 [...] fue entrenado durante 18 días seguidos usando 592 GPUs.

es la escala usada en los artículos originales; de esta forma, un billón representa mil millones). Como un ejemplo para poner las cosas en contexto, DALL-E 2 se basa en el modelo CLIP [4], el cual fue entrenado durante 18 días seguidos usando 592 GPUs.

En Procesamiento de Lenguaje Natural (NLP) el panorama es todavía más extremo. El modelo GPT-3 [5] (desarrollado por OpenAI) tiene alrededor de 175 billones de parámetros y requirió de una colaboración exclusiva entre OpenAI y Microsoft para disponer de un centro de datos que tiene 285,000 núcleos de CPU y 10,000 GPUs [6]. Más aún, a principios de este año, Google hizo el lanzamiento de su modelo Switch-Transformer [7] cuya versión más grande tiene 1.6 trillones de parámetros (1600 billones de parámetros).

No cabe duda que estos modelos de inteligencia artificial adquieren capacidades sorprendentes para resolver las tareas para las que fueron diseñados. Pero hay una pregunta que no podemos pasar desapercibida: ¿Cuál es el costo energético de entrenar y usar estos modelos? E incluso más importante es la pregunta: ¿Podemos estimar la huella de carbono que dejan estos modelos? En este artículo intento condensar la información que existe a la fecha sobre la huella de carbono de la inteligencia artificial y entregar algunas reflexiones y potenciales líneas de acción para afrontar este problema.

Definiciones preliminares

Antes de empezar a soltar números y hacer cálculos, es necesario comprender algunos términos básicos. Las emisiones equivalentes de CO_2 (CO_2eq)

hacen referencia a las emisiones de cualquier gas de efecto invernadero que tiende a incrementar la temperatura de la superficie terrestre. Entre estos gases tenemos el dióxido de carbono, el metano y el óxido nítrico. La unidad de medida común de las emisiones equivalentes es la tonelada métrica que representa 1.000 kilogramos y que se abrevia como tCO_2eq .

Por otro lado, la energía eléctrica consumida en una unidad de tiempo puede medirse con un Megawatt-hora (MWh) que equivale a un millón de watts de electricidad consumidos continuamente en el lapso de una hora. Para poder relacionar el consumo eléctrico con las emisiones de CO_2eq es necesario conocer la cantidad de emisiones por Megawatt-hora en un lugar en particular. Por ejemplo, el Ministerio de Energía en Chile reporta que al año 2018 el factor de emisión del sistema eléctrico nacional es de 0.4187 tCO_2eq/MWh [8]. A este factor también se le conoce como intensidad de carbono (CI) y depende de la ubicación geográfica debido a que está íntimamente relacionado con la fuente de generación eléctrica. Un lugar en donde la energía eléctrica se genera principalmente con fuentes renovables tendrá una intensidad de carbono menor que un lugar en donde se usan combustibles fósiles como carbón o petróleo para generar electricidad. Cuando hablamos de servicios en la nube, los proveedores generalmente publican la información de la intensidad de carbono de manera regular. Por ejemplo, Google tiene esta información disponible y online [9], en donde uno puede observar que existen regiones con intensidad de carbono por debajo de 0.1 tCO_2eq/MWh y otras regiones con valores por encima de 0.7 tCO_2eq/MWh .

Finalmente, un factor importante para medir el impacto energético de una



actividad computacional es la efectividad de uso de potencia PUE (Power Usage Effectiveness). El PUE mide qué tanta potencia adicional es requerida para mantener la infraestructura que soporta el proceso de cómputo (enfriamiento o pérdida de voltaje). Este factor se define como la proporción de potencia usada por toda la infraestructura con respecto a la potencia usada para el cómputo. Por ejemplo, Google publica regularmente sus mediciones de PUE en sus diferentes centros de datos [10], con un promedio de 1.10 de PUE (un 10% de potencia extra es usada para mantener la infraestructura).

Estimación de emisiones de carbono

Una forma de estimar la cantidad de carbono que emite el entrenamiento de una red neuronal es aplicando la siguiente fórmula:

$$tCO_2eq = (MWh \text{ del entrenamiento}) \times PUE \times CI$$

Para calcular la cantidad de Megawatt-horas que toma un entrenamiento es necesario contar con información disponible acerca de los equipos que se usaron para el cómputo. Strubell, Ganesh y Callum [11] proponen extraer la información de potencia usada por CPUs, memoria RAM y GPUs con herramientas tipo interfaces RAPL (Running Average Power Limit) o nvidia-smi para registrar la potencia usada por los GPUs. Para sus experimentos, Strubell y compañía ejecutaron los entrenamientos de redes neuronales de NLP tales como Tensor2Tensor, ELMo, BERT y GPT-2 y registraron la potencia requerida para estos modelos en un proyecto que tomó seis meses y requirió aproximadamente de 27 años de tiempo de GPU.

Otra forma de calcular la cantidad de potencia usada es aproximarla multiplicando la cantidad de tiempo que

GPU	FLOPS	Potencia (W)
V100 S PCIe	130 TFLOPS	250
A6000	309.7 TFLOPS	300
A100 SXM	312 TFLOPS	400
RTX 3090 Ti	285 TFLOPS	450

Tabla 1. GPUs comunes usados en IA y sus características de cómputo y energéticas.

GPU	HORAS	Potencia (W)	MWh
V100 S PCIe	670,940	250	167.7
A6000	281,634	300	84.5
A100 SXM	279,558	400	111.8
RTX 3090 Ti	306,042	450	137.7

Tabla 2. Cantidad de horas y consumo de electricidad para entrenar GPT-3 en GPUs.

requiere el entrenamiento por la potencia específica de funcionamiento de un GPU. Esta información de potencias está disponible generalmente en las especificaciones técnicas del GPU. La Tabla 1 muestra algunas especificaciones de GPUs comunes usados en tareas de inteligencia artificial. Hay que tener en cuenta que la potencia especificada por el fabricante corresponde a la máxima potencia para el funcionamiento del equipo, por lo que la estimación podría ser mayor a la potencia realmente usada. Patterson y compañía [12] usan esta forma de cálculo para comparar las emisiones de modelos de NLP como Transformer, Evolved Transformer y GPT-3. La ventaja que tiene este método de estimación es que solo necesitamos conocer el tiempo de entrenamiento y el tipo y cantidad de GPUs usados.

Finalmente, también es posible calcular la potencia requerida para un proceso de entrenamiento si se dispone de la canti-

dad total de cómputo necesaria para la tarea. Por ejemplo, la versión de GPT-3 que tiene 175 billones de parámetros requiere de 3.14×10^{23} flops (operaciones de coma flotante por segundo) para su entrenamiento. La Tabla 2 muestra la cantidad de Megawatt-horas que se requerirían para entrenar GPT-3 con cada una de los GPUs de la Tabla 1 (usando la equivalencia de 1 teraflop = 10^{12} flops).

Si usamos estos valores de Megawatt-horas junto con un PUE e intensidad de carbono de algún lugar específico, podemos calcular la cantidad de toneladas métricas de CO_2eq que emite el entrenamiento de GPT-3. Para ejemplificar usaré la calculadora de equivalencias [13] implementada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para determinar la cantidad de emisiones provocadas por los datos obtenidos en la Tabla 2, pero en términos conocidos que podamos entender mejor (se usa una intensidad de carbono aproximada de $0.4 \text{ tCO}_2eq/MWh$).



MWh	tCO ₂ eq	Autos a gasolina por año	Kg. de carbón quemado	# de celulares cargados
167.7	72.5	15.6	36,408	8,824,695
84.5	36.6	7.9	18,345	4,446,552
111.8	48.4	10.4	24,271	5,883,130
137.7	59.6	12.8	29,894	7,246,038

Tabla 3. Equivalencias de consumo de electricidad para el entrenamiento de GPT-3.

El ciclo de vida de un modelo podría no terminar cuando este se entrena, sino que se extiende a su uso en producción e inferencia.

En el artículo original [12] en donde se experimenta con GPT-3 se obtienen valores de consumo de energía y emisiones incluso más grandes (1287 MWh y 552 tCO₂eq). Esto se debe a que ese análisis se realizó con las especificaciones del GPU V100 del año 2020. En esa versión de GPU, la cantidad de TFLOPS era menor a la de la versión más actual que usamos en la Tabla 3.

En la versión de reporte técnico de GPT-3 [14] incluso se informa de la cantidad total de flops requeridos para cada uno de los experimentos usados en comparación. En total se requirió de 4.1×10^{23} operaciones flops, incrementando en casi un 50% más de consumo de energía si usamos los GPUs de nuestra comparación. También cabe destacar que los datos informados corresponden con el trabajo de entrenamiento del modelo final, cuando es común que un modelo se entrene muchas veces antes de tener la versión definitiva. Esto se debe a que el proceso de llegar al modelo final pasa por un proceso de configuración de hiperparámetros, los cuales necesitan ser configurados haciendo el entrenamiento muchas veces. Por ejemplo, Strubell, Ganesh y Callum [11] consi-

deran en su análisis que cada modelo fue entrenado en promedio 24 veces y usan esa estimación para calcular las emisiones de sus experimentos.

Reflexión y líneas de acción

Para este artículo he usado como ejemplo los datos reportados de un solo método. Para dimensionar el impacto real de la huella de carbono necesitamos considerar algunos aspectos adicionales. Primero, el ciclo de vida de un modelo podría no terminar cuando este se entrena, sino que se extiende a su uso en producción y a la cantidad de veces que el modelo se usa para inferencia. Por ejemplo, Google usa el modelo BERT para su motor de búsquedas y la cantidad de búsquedas en Google es un número inmensamente grande. De igual forma, Facebook usa el motor DETR para detectar y analizar objetos en imágenes. Segundo, el aprendizaje profundo se gestó desde hace diez años, tiempo en el que es cada vez más grande la cantidad de modelos que se entrenan y usan, tanto en investigación como en

producción. Teniendo en cuenta estos factores, creo que es necesario que tomemos conciencia que las emisiones de carbono provenientes de actividades relacionadas a la inteligencia artificial y aprendizaje profundo podrían ya estar siendo un problema ambiental importante; y que es por lo tanto necesario poner el tema en debate y tomar líneas de acción efectivas para afrontar el problema. Aquí trataré de esbozar tres posibles líneas de acción que ayuden a visibilizar y afrontar el problema. Estas líneas de acción están relacionadas con tres aspectos: la información sobre emisiones, los métodos y algoritmos, y finalmente la práctica de la IA.

- **Información sobre emisiones.** Para poder entender mejor el problema, necesitamos más y mejor información. Henderson y otros [15] reportan que de una muestra de cien artículos de la conferencia NeurIPS del 2019, ningún artículo reporta emisiones de carbono y menos de la mitad de artículos reportan algún tipo de información que pueda ser útil para calcular las emisiones de carbono de sus experimentos. Esto debería cambiar hacia una forma más sistemática de reportar información como el tipo y cantidad de GPUs usados y el tiempo real de experimentación (tomando en cuenta configuración de hiperparámetros). Además, Henderson y compañía incluyen en su propio artículo



También es necesario pensar en mejores formas de cómo encontrar el mejor modelo para un problema dado. Si tu búsqueda de los mejores hiperparámetros requiere de muchísimos entrenamientos, es probable que tu metodología necesite revisión.



un “Carbon Impact Statement” en donde informan la cantidad de toneladas métricas de CO_2eq y la cantidad de watt-horas que tomó todos sus experimentos. Todos quienes experimentamos con modelos de aprendizaje profundo, deberíamos tomar esta iniciativa como punto de partida.

Y en la industria, el panorama es menos claro. Al mejor de mi conocimiento, no existe ningún reporte que indique la cantidad de emisiones de carbono de los modelos de IA usados en empresas como Google, Facebook o Amazon. Mucho menos existe una práctica estandarizada para reportar esta información en industrias de IA.

Finalmente, existen herramientas que han sido creadas con la finalidad de facilitar el reporte de emisiones de carbono en la comunidad de aprendizaje automático. Entre estas herramientas están Machine Learning Emissions Calculator [16], Experiment Impact Tracker [17] y Carbon Tracker [18].

- **Métodos y algoritmos.** Los modelos de aprendizaje profundo se hacen cada vez más grandes y requieren de un poder computacional gigantesco. Sin embargo, una interrogante natural es saber si es posible obtener la misma efectividad con mucho menos costo computacional. Ideas tales como la

destilación de conocimiento [19] y la compresión de redes neuronales [20] han sido útiles para reducir el cómputo de modelos grandes y ponerlos en producción, por ejemplo [21]. Sin embargo, todavía hay mucho espacio para contemplar nuevas ideas que ayuden a reducir la cantidad de cómputo que requiere un modelo neuronal.

- **Práctica de IA.** Actualmente una forma de reducir el impacto es usando GPUs eficientes (que tengan buenas tasas de TFLOPS por consumo de energía). Además, si el trabajo será realizado en la nube, la mayoría de proveedores cuentan con información sobre el impacto de carbono de sus diferentes centros de datos, por lo que podemos decidir usar aquellos centros de datos que tienen una intensidad de carbono baja. También es necesario pensar en mejores formas de cómo encontrar el mejor modelo para un problema dado. Si tu búsqueda de los mejores hiperparámetros requiere de muchísimos entrenamientos, es probable que tu metodología necesite revisión.

Consideraciones finales

Si comparamos la cantidad de información disponible para medir el impacto de las emisiones de carbono de actividades relacionadas con IA con respecto a la cantidad de información del área en general podemos darnos cuenta que estamos lejos de tener el tema sobre la mesa de discusión de la comunidad. Pero más allá de levantar una alarma y llegar a ser hasta catastróficos con respecto al tema, estamos frente a la oportunidad de tomar acciones reales y efectivas para no permitir que esto sea un problema mayor en el futuro. Cualquier forma que usemos para reducir las emisiones provocadas por modelos de inteligencia artificial sirve. ■



REFERENCIAS

- [1] Ramesh, A., Dhariwal, P., Nichol, A., Chu, C., & Chen, M.: Hierarchical Text-Conditional Image Generation with CLIP Latents. ArXiv, abs/2204.06125. 2022.
- [2] Saharia, C., Chan, W., Saxena, S., Li, L., Whang, J., Denton, E.L., Ghasemipour, S.K., Ayan, B.K., Mahdavi, S.S., Lopes, R.G., Salimans, T., Ho, J., Fleet, D., & Norouzi, M.: Photorealistic Text-to-Image Diffusion Models with Deep Language Understanding. ArXiv, abs/2205.11487. 2022.
- [3] <https://stability.ai/blog/stable-diffusion-public-release>.
- [4] Radford, A., Kim, J.W., Hallacy, C., Ramesh, A., Goh, G., Agarwal, S., Sastry, G., Askell, A., Mishkin, P., Clark, J., Krueger, G., & Sutskever, I.: Learning Transferable Visual Models From Natural Language Supervision. Int. Conf. Machine Learning. 2021.
- [5] Brown, T.B., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J., Dhariwal, P., Neelakantan, A., Shyam, P., Sastry, G., Askell, A., Agarwal, S., Herbert-Voss, A., Krueger, G., Henighan, T.J., Child, R., Ramesh, A., Ziegler, D.M., Wu, J., Winter, C., Hesse, C., Chen, M., Sigler, E., Litwin, M., Gray, S., Chess, B., Clark, J., Berner, C., McCandlish, S., Radford, A., Sutskever, I., & Amodei, D.: Language Models are Few-Shot Learners. NeurIPS. 2020.
- [6] <https://blogs.microsoft.com/ai/openai-azure-supercomputer/>.
- [7] Fedus, W., Zoph, B., Shazeer, N.: Switch Transformers: Scaling to Trillion Parameter Models with Simple and Efficient Sparsity. Journal of Machine Learning Research 23(120), pp 1-39, 2022.
- [8] <https://energia.gob.cl/indicadores-ambientales-factor-de-emisiones-gei-del-sistema-electrico-nacional>.
- [9] <https://cloud.google.com/sustainability/region-carbon>.
- [10] <https://www.google.com/about/datacenters/efficiency/>.
- [11] Strubell, E., Ganesh, A., McCallum A.: Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP. In Proc. of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, pages 3645–3650. 2019.
- [12] Patterson, D.A., González, J., Holzle, U., Le, Q., Liang, C., Munguía, L., Rothchild, D., So, D.R., Texier, M., & Dean, J.: The Carbon Footprint of Machine Learning Training Will Plateau, Then Shrink. Computer, 55(7), 18-28. 2022.
- [13] <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>.
- [14] Brown, T.B., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J., Dhariwal, P., Neelakantan, A., Shyam, P., Sastry, G., Askell, A., Agarwal, S., Herbert-Voss, A., Krueger, G., Henighan, T.J., Child, R., Ramesh, A., Ziegler, D.M., Wu, J., Winter, C., Hesse, C., Chen, M., Sigler, E., Litwin, M., Gray, S., Chess, B., Clark, J., Berner, C., McCandlish, S., Radford, A., Sutskever, I., & Amodei, D.: Language Models are Few-Shot Learners. ArXiv, abs/2005.14165. 2020.
- [15] Henderson, P., Hu, J., Romoff, J., Brunskill, E., Jurafsky, D., Pineau, J.: Towards the systematic reporting of the energy and carbon footprints of machine learning. Journal of Machine Learning Research, Vol 21(248), pp. 1-43. 2020.
- [16] <https://mlco2.github.io/impact/>.
- [17] <https://github.com/Breakend/experiment-impact-tracker>.
- [18] <https://github.com/lflwa/carbontracker>.
- [19] Hinton, G.E., Vinyals, O., & Dean, J.: Distilling the Knowledge in a Neural Network. ArXiv, abs/1503.02531. 2015.
- [20] Shen, S., Dong, Z., Ye, J., Ma, L., Yao, Z., Gholami, A., Mahoney, M.W., & Keutzer, K.: Q-BERT: Hessian Based Ultra Low Precision Quantization of BERT. AAAI. 2020.
- [21] Sanh, V., Debut, L., Chaumond, J., & Wolf, T.: DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter. ArXiv, abs/1910.01108. 2019.



¿Puede realmente blockchain ser sostenible y verde?



CLAUDIA NEGRI RIBALTA

Máster en Ciencias de la Computación mención Medios Digitales Interactivos por el Trinity College Dublin y candidata a doctora en Informática de la Universidad París 1 Panthéon-Sorbonne. Investiga sobre ingeniería de requerimientos y protección de datos personales desde una perspectiva interdisciplinaria. Es parte del directorio de la ONG Observatorio para la Transparencia Algorítmica (OptIA).

✉ claudia-sofia.negri-ribalta@univ-paris1.fr

🐦 [@csnegri](https://twitter.com/csnegri)



MARIUS LOMBARD-PLATET

Doctor en Seguridad de la Información por la École Normale Supérieure (ENS) París, postdoctorante en la Universidad de Luxemburgo en criptografía asimétrica. Sus áreas de investigación son: seguridad, estructura de datos y protocolos de criptografía.

✉ marius.lombard-platet@uni.lu



RESUMEN. *Blockchain* es una tecnología que ha sido criticada por su impacto medioambiental y falta de sostenibilidad. No es de extrañar que los sistemas de *blockchain* tengan un alto impacto ambiental, ya que utilizan algoritmos altamente intensivos en computación para abordar temas fundamentales, tales como la confianza o la seguridad. Uno de los ejemplos más famosos de este impacto es Proof of Work, el algoritmo de minería utilizado por Bitcoin y otras. Sin embargo, debido al diseño de *blockchain*, hay otros temas como la chatarra electrónica o el boom de las criptomonedas, que lo hacen contradictorio con *green computing*. Aunque se ha argumentado que *blockchain* podría ayudar a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, al permitir la transparencia y la trazabilidad, estas afirmaciones están por verse en el mundo real. Hoy en día *blockchain* parece ser contradictoria con *green computing*, pero no descartamos el desarrollo futuro de la tecnología y los cambios en componentes esenciales que la podrían hacer más sustentable.

Introducción

Hoy en día es imposible no leer u oír sobre *blockchain* o criptomonedas. O bien aparece en las noticias, ya sea por el precio de una criptomoneda o una estafa, o en el mundo de las finanzas, con el nacimiento de DeFi (Decentralized Finance), o simplemente porque Meta se aventuró a la posibilidad de tener una criptomoneda (Diem). Sea cual sea el caso, la tecnología *blockchain* está aquí, con todo lo bueno y lo malo que ello conlleva.

Blockchain ha recibido considerables críticas por sus problemas de sostenibilidad.

Las emisiones [de CO₂ originadas por Bitcoin] provocarían un calentamiento global de más de 2°C para 2050.

Hay numerosos ejemplos de artículos que destacan los impactos de *blockchain* en el medio ambiente, como [12, 5]. La mayor parte de las críticas –aunque no las únicas– se deben a las altas cantidades de energía que *blockchain* consume debido a un algoritmo de minería muy popular, Proof of Work (PoW). Sin embargo, hay otras preocupaciones sobre esta tecnología, como el uso de hardware y la duplicación de cálculo (*double computing*) que nos gustaría resaltar.

En los siguientes párrafos, pretendemos discutir algunos de los principales problemas que tiene *blockchain* con *green computing*. Debido a razones de seguridad y la descentralización, a menudo se requiere de algoritmos altamente intensivos en computación para asegurar la red. Sin embargo, hay otros retos como el uso de hardware, que también son asuntos que *blockchain* deberá abordar para la sustentabilidad y *green computing*.

¿Qué es *blockchain*?

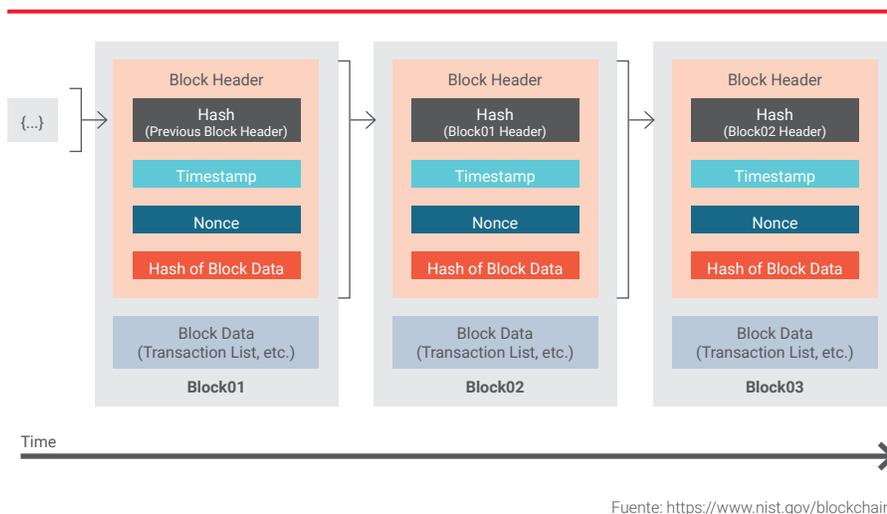
Para entender la relación entre *blockchain* y *green computing*, es necesario comprender los principales componentes de esta tecnología. *Blockchain* como tecnología apareció por primera vez en 2008, con la publicación del *whitepaper* de Nakamoto, que proponía Bitcoin [17]. El *whitepaper* de Bitcoin resolvía el histórico problema del doble gasto en las monedas digitales descentralizadas [10], diseñando un sistema sin autoridad central (como un banco) en el que la gente podría intercambiar dinero. Es así como Bitcoin fue la primera instancia de la

tecnología *blockchain*, que se conoce generalmente como la primera generación de *blockchain*.

En 2014, Buterin [9] publicó el *whitepaper* de Ethereum. El principal aporte y diferencia de Ethereum con respecto a Bitcoin, fue la implementación de contratos inteligentes (*smart contracts*). Un contrato inteligente es una aplicación o código, que permite automatizar las transacciones entre los actores. Aunque Bitcoin puede automatizar ciertas actividades a través de *scripts* [8], los contratos inteligentes de Ethereum son más flexibles y pueden manejar bucles [9]. Este tipo de *blockchain* se conoce como segunda generación de *blockchain*.

Los sistemas *blockchains* pueden dividirse en varias taxonomías. Una de las formas más populares de dividir las distintas *blockchain* es en función de su modelo de gobernanza, público o privado. Las *blockchains* públicas son aquellas que permiten que cualquiera pueda participar en la red y en las que no existe ningún usuario privilegiado, como Bitcoin o Ethereum. Por el contrario, las *blockchain* privadas están limitadas a aquellos que tienen derechos a participar en la red, como Hyperledger [4].

Los sistemas *blockchain* son más que criptomonedas y contratos inteligentes. De hecho, las criptomonedas son el caso más conocido de la tecnología, pero no son el único; hay múltiples iniciativas que tratan de encontrar otros usos. Por otra parte, los contratos inteligentes no son necesariamente contratos legales aunque su nombre diga “contrato”. Son simplemente aplicaciones que permiten automatizar ciertas acciones en la red.



Fuente: <https://www.nist.gov/blockchain>.

Figura 1. Estructura de una *blockchain*.

Una base de datos distribuida

Aunque hay varias definiciones de *blockchain*, en este documento definiremos *blockchain* como –en su núcleo– una base de datos (BD). En detalle, es una base de datos distribuida y resistente a la manipulación, que guarda una cantidad limitada de información en bloques, que están unidos a través de una primitiva criptográfica, un *hash*, vinculándolos entre sí. Por eso se llama *blockchain*, pues los bloques (*block*) generan una cadena (*chain*) (ver Figura 1).

Como se ha mencionado anteriormente, las *blockchains* públicas son descentralizadas, ya que ningún participante tiene más autoridad que otro. Sin embargo, las *blockchains* privadas están distribuidas pero no descentralizadas, ya que el acceso está controlado por unas autoridades (normalmente llamadas CA o *central authority*).

Debido a las características en el diseño de las *blockchain*, estas son resistentes a la manipulación pero no son inmutables. Existen vulnerabilidades que permiten el cambio de los datos, como el ataque Sybil y el ataque 51% [22].

Algoritmos de consenso y de minería

Si las *blockchain* están distribuidas y descentralizadas, ¿cómo se ponen de acuerdo sobre cómo actualizar la BD? La respuesta es a través de los algoritmos de minería y consenso. El algoritmo de minado se refiere a cuando los diferentes participantes (nodos mineros) pueden “construir” (minar) un bloque de información, el cual después proponen y propagan en la red y este es aceptado o no a través del consenso. Existen distintos algoritmos de minado y consenso, que se definirán en base a distintos requerimientos de la red, como seguridad, *liveness* y si los actores se conocen

entre ellos (como las *blockchains* privadas), es decir el nivel de confianza.

Debido a que muchas criptomonedas son públicas, como Bitcoin y Ethereum, no se puede confiar en que todos los actores de la red serán honestos y no vayan a realizar doble gasto. Por consiguiente, estas *blockchains* requieren que para minar un nuevo bloque, uno tenga que resolver un rompecabezas criptográfico difícil. Por ejemplo, el algoritmo de PoW de Bitcoin, Hashcash, es un puzzle que requiere gran capacidad de cálculo (*computing power*) por parte del nodo minero. Estas limitaciones impiden que un atacante pueda inundar la red: para poder reescribir una transacción, necesitaría más potencia de cálculo que el resto de la red, es decir, más del 50% de la potencia de cálculo (*computing power*) total de la red.

The elephant in the room: *blockchain* y contaminación¹

En la actualidad, si tomamos el valor de mercado de las distintas criptomonedas, las dos más importantes son Bitcoin [17] y Ethereum [9]. Por el momento, ambas criptomonedas utilizan PoW como algoritmo de minería, que –debido a la popularidad de ambas– requiere una enorme cantidad de energía.² Consecuentemente, a medida que las monedas se valorizan, minarlas se vuelve más rentable económicamente. Este fenómeno provoca que el desafío criptográfico de PoW sea más difícil, lo que conlleva que los nodos mineros deben gastar más energía para encontrar un nuevo bloque válido.

1 En inglés, *elephant in the room* es una expresión metafórica que hace referencia a una verdad evidente, pero que al mismo tiempo es ignorada por todos/as porque discutirla puede resultar controversial o (personal, política o socialmente) embarazoso. Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/Elephant_in_the_room.

2 No todas las criptomonedas utilizan PoW como algoritmo de minado, y como discutiremos más adelante, hay otros algoritmos de minado que son más sustentables.



Como consecuencia, el consumo de electricidad para minar un bloque en Bitcoin se ha estimado entre 0,88-4,38 TWh para el año 2017 [26], 87-134 TWh para 2021 (el mismo consumo energético que Argentina) pasando a 100-200 TWh en 2022 [1, 2]. Del mismo modo, se estima que Ethereum consume alrededor de 112 TWh al año [3], y se ha calculado que Bitcoin y Ethereum combinadas liberan alrededor de 150 MT de CO₂ al año [3]. De hecho, si asumimos un crecimiento continuo de Bitcoin, [16] ha estimado que las emisiones de Bitcoin por sí solas provocarían un calentamiento global de más de 2°C para 2050.

Si bien las emisiones de CO₂ son uno de los principales problemas del PoW en muchas *blockchains*, otro problema para la sustentabilidad es la chatarra electrónica o los residuos provocados por los equipos utilizados para minar. Los equipos usados para los algoritmos de minería en *blockchain* tienen una vida útil limitada, y según [12] se ha estimado que la chatarra electrónica provocada por Bitcoin –suponiendo una esperanza de vida de 1,5 años para los equipos³– es alrededor de 11.000 toneladas métricas al año. Similarmente, otro algoritmo de minería llamado Proof of Space, que se basa en el almacenamiento en disco, ha sido acusado de provocar escasez de discos duros en todo el mundo.⁴

Por lo tanto, las *blockchains* que usan PoW no solo consumen mucha electricidad, sino que también generan problemas de chatarra electrónica. El gran uso de energía y la chatarra electrónica proviene principalmente como una consecuencia de la competencia que genera PoW, aunque Proof of Space también generaría problemas con los residuos. Sin embargo, son consecuencias más bien por el uso de PoW, que por la descentralización u otros componentes de *blockchain*.

Ahora bien, podríamos argumentar que este impacto ambiental se justifica en base a la eficiencia de las *blockchains* u otros beneficios que ellas traerían. Si comparamos la criptomoneda más popular (Bitcoin) con sistemas que ya están implementados, como lo es con el dinero *fiat*, vemos que los sistemas *blockchain* tampoco son necesariamente más eficientes. VISA/Mastercard pueden realizar 4.400 transacciones por segundo, y se estima que una transacción de VISA consume 1 millón de veces menos energía que una transacción de Bitcoin [1]. En comparación, Bitcoin tiene una capacidad de procesar 7 transacciones por segundo, lo cual además crea un problema de escalabilidad [15]. Es decir, VISA/Mastercard son 600 veces más eficientes que Bitcoin en su capacidad de procesar transacciones.

Las tasa de transacciones que puede manejar una *blockchain* por segundo son fijas, no aumentan, pues están definidas por su diseño. Independientemente de la potencia de minado (*mining power*) total en la red, el número total de mineros, en Bitcoin, Ethereum u otras *blockchains*, tiene un tope de cuántas transacciones puede manejar por segundo (a pesar de que el rendimiento se puede aumentar a través de protocolos en la *Layer 2* como lo es Lightning para Bitcoin, o mejores algoritmos de consenso [15]). Sin embargo, la valorización de Bitcoin como activo o moneda provoca un aumento de la cantidad total de potencia de minado en la red [14], que provoca mayor uso de energía.

Diseño versus sustentabilidad

Ahora bien, ¿por qué las tecnologías *blockchain* utilizan habitualmente estos

Otro problema [de Proof of Work] es la chatarra electrónica [...] provocada por los equipos utilizados para minar, [estimadas en] alrededor de 11.000 toneladas métricas al año.

algoritmos altamente intensivos? Debido a una decisión de diseño, más precisamente, para resolver temas como el doble gasto, la seguridad de la red y la confianza entre los actores. Por eso se ha sugerido que la tecnología *blockchain* puede ser contradictoria con la sustentabilidad.

Haciendo la tecnología sustentable

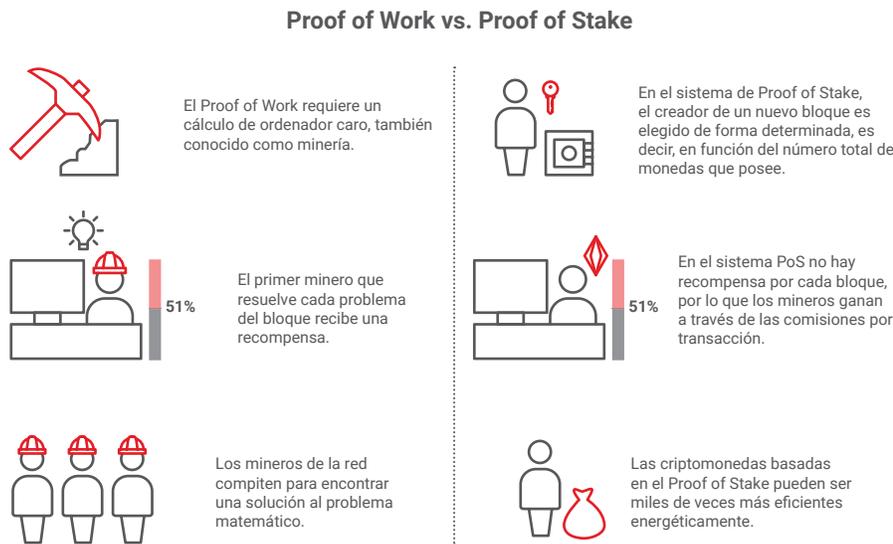
Aunque por temas de diseño parece ser que las *blockchains* más populares consumen altos niveles de energía, como también generan problemas con la chatarra electrónica, se ha argumentado que podría contribuir a la sostenibilidad y a los Objetivos de Desarrollo Sostenible [7, 25]. Algunos de los argumentos expuestos sostienen que *blockchain* podría ayudar con la sostenibilidad al proveer trazabilidad y transparencia a los consumidores, si el sistema es adecuadamente diseñado [7, 25]. En detalle, el argumento sostiene que *blockchain* puede proveer trazabilidad de un producto –como por ejemplo el origen del mismo– como también mejorar los niveles de transparencia de la información –como por ejemplo, qué tipo de pesticida se usó– lo cual permitiría que los consumidores puedan tomar decisiones informadas y preferir productos sustentables. Asimismo, se reconoce que PoW

3 Las estimaciones más optimistas dan una esperanza de tres a cinco años; ver <https://compassmining.io/education/how-long-do-asics-last/>.

4 <https://foreignpolicy.com/2021/05/23/cryptocurrency-chia-waste-resources-bitcoin/>.



Antes de implementar un sistema blockchain, hay que hacer la pregunta: ¿necesito un sistema blockchain?



Fuente: <https://es.ihodl.com/tutorials/2017-07-21/proof-work-vs-proof-stake-cambio-en-el-ethereum/>.

Figura 2. Comparación entre las técnicas Proof of Work (PoW) y Proof of Stake (PoS).

es un algoritmo de minado que no es sustentable, y se recomienda usar otros que tengan un menor impacto. Hasta donde sabemos hoy, no hay ningún proyecto –o al menos muy pocos– ampliamente adoptado que utilice *blockchain* y que sea utilizado de forma efectiva para la sustentabilidad.

Debido a los costes energéticos del PoW y su impacto ecológico, para que las *blockchains* sean más sostenibles se han propuesto otros algoritmos de minado, y existe amplia investigación sobre el tema. Una de estas soluciones es abandonar el PoW y migrar a Proof of Stake (PoS) [18]. PoS en lugar de basarse en el cálculo de una puzle criptográfico difícil, requiere –como explicación

general– que los mineros apuesten su dinero/activo en qué bloque se añadirá. Es decir, es una apuesta y por eso su nombre, *stake*. Ethereum tiene previsto pasar de PoW a PoS en el tercer o cuarto trimestre de 2022 [13], y se ha estimado que el consumo de energía de la red se reducirá en un 99,95%, con una capacidad de procesamiento de hasta 100.000 transacciones por segundo (ver Figura 2). Ciertamente una mejora.

PoS es uno de los muchos algoritmos de minado que existen y que tienen menos impacto ambiental que PoW. Por ejemplo, *blockchain* privadas como Hyperledger se basan en algoritmos de consenso bizantino, que también son más eficientes energéticamente. Igual-

mente, *blockchain* privadas no tienen necesariamente problemas de confianza y pueden usar otros tipos de minado o consenso que son eficientes energéticamente pero no necesariamente son tolerantes a la falta bizantinas, como lo es Raft [20].

Otras mejoras en la tecnología pueden reducir drásticamente la huella de carbono de una transacción. Por ejemplo, en Bitcoin la red Lightning permite multiplicar por mil su rendimiento, con un aumento insignificante de cálculos [21], aunque la escalabilidad de la red sigue siendo un tema [24].

¿Puede realmente ser sostenible?

Debido a la gran huella de carbono que tiene Bitcoin por su consumo de energía, las críticas al respecto han crecido en los últimos años. Se ha argumentado que las *blockchains* podrían depender, total o parcialmente, de fuentes de energía renovables o verdes [19, 6], lo que debería reducir la huella de carbono; mientras que otros argumentan que las energías renovables no harán que Bitcoin sea verde [11]. En la actualidad, se estima que entre el 30% y el 70% de la minería de Bitcoin⁵ depende de las energías renovables [1]. Sin embargo, se ha observado que para hacer frente al aumento de la demanda de esta energía a causa de la minería de las criptomonedas, los proveedores podrían tener que reabrir fuentes de energía no renovables para proporcionar electricidad al público general [23]. De modo que, habría que ser cuidadoso con hacer afirmaciones que digan que *blockchain* podría disminuir su huella de carbono, ya que usan energías renovables o verdes.

Como dice un refrán, “la energía más verde es la que no se usa”. En el contexto de la computación verde (*green*

⁵ La estimación del 70% es del año 2019, antes de la prohibición de la minería de Bitcoin en China, que provocó una disminución de las energías renovables en dicha red.



Cada vez que alguien lanza la ejecución de un contrato inteligente, 9.800 nodos realizan la misma ejecución en paralelo.

computing), para nosotros esto significa que la redundancia y la especulación, entre otras cosas, deben ser llevadas a su mínimo vital. Otro problema para las *blockchains*.

¿Por qué es un problema? Porque cada nodo de una *blockchain* tiene una copia de todo el *ledger*, pero lo más importante, en las *blockchains* que utilizan contratos inteligentes como Ethereum, todos tienen una copia del contrato inteligente. La idea central de la ejecución de los contratos inteligentes, es que el mismo código debe ser ejecutado por todos los nodos en la red, lo cual es un

poco contrario con el refrán que acabamos de comentar. Al momento de escribir este artículo, por ejemplo, Etherscan⁶ estima que la cantidad de nodos de Ethereum es de unos 9.800, lo que significa que cada vez que alguien lanza la ejecución de un contrato inteligente, 9.800 nodos realizan la misma ejecución en paralelo. ¿Es necesaria esta redundancia, cuando en muchos casos un único servidor central podría haber hecho el trabajo? Dejamos abierta la pregunta a discusión.

Conclusiones

Los sistemas *blockchain* que dependen de PoW tienen problemas con la computación verde. Si se utilizan otros algoritmos de minería, el impacto que tienen los sistemas *blockchain* podría reducirse. Sin embargo, y como hemos intentado transmitir en este artículo, hay

otros problemas que surgen con el uso de *blockchain* para *green computing*, como la duplicación de cálculo (*double computing*), la eficiencia de la red, o la chararra electrónica.

Una última cosa que nos gustaría destacar es que, antes de implementar un sistema *blockchain*, hay que hacer la pregunta: ¿necesito un sistema *blockchain*? Las *blockchains* son difíciles de implantar y mantener, y cumplen una lista muy específica de requerimientos que no siempre son necesarios. Aunque no se puede descartar que las *blockchains* puedan utilizarse para *green computing*, hay otros temas importantes a tener en cuenta. Por ejemplo, si un sistema requiere de un CA que defina quién puede participar y cómo, ¿por qué sería necesario usar *blockchain* en ese contexto, si el sistema es centralizado? Por lo mismo, recomendamos el artículo “Do you need a *blockchain*?” de [27] y revisar el diagrama, para analizar si se necesita una *blockchain*. ■

REFERENCIAS

- [1] Bitcoin energy consumption index - digiconomist. <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption/>.
- [2] Cambridge bitcoin electricity consumption index (cbeci). <https://ccaf.io/cbeci/index>.
- [3] Ethereum energy consumption — ethereum.org. <https://ethereum.org/en/energy-consumption>.
- [4] Androulaki, E., Barger, A., Bortnikov, V., Cachin, C., Christidis, K., De Caro, A., Enyeart, D., Ferris, C., Laventman, G., Manevich, Y., et al.: Hyperledger fabric: a distributed operating system for permissioned blockchains. In: Proceedings of the thirteenth EuroSys conference. pp. 1–15 (2018)
- [5] Badea, L., Mungiu-Pupăzan, M.C.: The economic and environmental impact of bitcoin. IEEE Access 9, pp. 48091–48104 (2021).
- [6] Bastian-Pinto, C.L., de S. Araujo, F.V., Brandão, L.E., Gomes, L.L.: Hedging renewable energy investments with bitcoin mining. Renewable and Sustainable Energy Reviews 138, 110520 (2021).
- [7] Boucher, P., Nascimento, S., Kritikos, M.: How blockchain technology could change our lives. Tech. rep., European Parliamentary Research Service (2017). [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2017/581948/EPRS_IDA\(2017\)581948_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2017/581948/EPRS_IDA(2017)581948_EN.pdf).
- [8] Brakmić, H.: Bitcoin Script, pp. 201–224. Apress, Berkeley, CA (2019).
- [9] Buterin, V.: Ethereum: A next-generation smart contract and decentralized application platform (2014). White-Paper. <https://github.com/ethereum/wiki/wiki/>.
- [10] Chohan, U.W.: The double spending problem and cryptocurrencies. Available at SSRN 3090174 (2021).

6 <https://etherscan.io/nodetracker>.



- [11] De Vries, A.: Bitcoin's growing energy problem. *Joule* 2(5), pp. 801–805 (2018).
- [12] De Vries, A.: Renewable energy will not solve bitcoin's sustainability problem. *Joule* 3(4), pp. 893–898 (2019).
- [13] Ethereum Foundation: The merge – ethereum.org. <https://ethereum.org/en/upgrades/merge/>.
- [14] Fantazzini, D., Kolodin, N.: Does the hashrate affect the bitcoin price? *Journal of Risk and Financial Management* 13(11), 263 (2020).
- [15] Li, C., Li, P., Xu, W., Long, F., Yao, A.C.: Scaling Nakamoto consensus to thousands of transactions per second. CoRR abs/1805.03870 (2018).
- [16] Mora, C., Rollins, R.L., Taladay, K., Kantar, M.B., Chock, M.K., Shimada, M., Franklin, E.C.: Bitcoin emissions alone could push global warming above 2°C. *Nature Climate Change* 8(11), pp. 931–933 (Nov 2018).
- [17] Nakamoto, S.: Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system (Dec 2008), <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [18] Nguyen, C.T., Hoang, D.T., Nguyen, D.N., Niyato, D., Nguyen, H.T., Dutkiewicz, E.: Proof-of-stake consensus mechanisms for future blockchain networks: Fundamentals, applications and opportunities. *IEEE Access* 7, pp. 85727–85745 (2019).
- [19] Niaz, H., Shams, M.H., Liu, J.J., You, F.: Mining bitcoins with carbon capture and renewable energy for carbon neutrality across states in the USA. *Energy Environ. Sci.* (2022).
- [20] Ongaro, D., Ousterhout, J.: In search of an understandable consensus algorithm. In: 2014 USENIX Annual Technical Conference (Use-nix ATC 14). pp. 305–319 (2014).
- [21] Poon, J., Dryja, T.: The bitcoin lightning network: Scalable off-chain instant payments. (2016).
- [22] Saad, M., Spaulding, J., Njilla, L., Kamhoua, C., Shetty, S., Nyang, D., Mohaisen, D.: Exploring the attack surface of blockchain: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22(3), pp. 1977–2008. (2020).
- [23] Schinckus, C.: Proof-of-work based blockchain technology and anthropocene: An undermined situation? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 152, 111682 (2021).
- [24] Tikhomirov, S., Moreno-Sánchez, P., Maffei, M.: A quantitative analysis of security, anonymity and scalability for the lightning network. In: 2020 IEEE European Symposium on Security and Privacy Workshops (EuroS&PW). pp. 387–396 (2020).
- [25] UNCTAD team: Harnessing blockchain for sustainable development: prospects and challenges. Tech. rep., United Nations Conference on Trade and Development (2021). https://unctad.org/system/files/official-document/dtlstict2021d3_en.pdf.
- [26] Vranken, H.: Sustainability of bitcoin and blockchains. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 28, pp. 1–9 (2017).
- [27] Wüst, K., Gervais, A.: Do you need a blockchain? In: 2018 Crypto Valley Conference on Blockchain Technology (CVCBT). pp. 45–54 (2018).



Los costos de estar conectados:

Datacenters y el consumo hídrico



**RODRIGO VALLEJOS
CALDERÓN**

Estudiante de Derecho en la Universidad Diego Portales, integrante de la organización Resistencia Socioambiental Quilicura.

✉ rodrigo.vallejos1@mail.udp.cl



RESUMEN. En el presente artículo se expondrá el impacto hídrico de los *datacenters* en la Región Metropolitana, así también como sus consecuencias socioambientales y los desafíos que se deben afrontar para un avance tecnológico sustentable con el medio ambiente.

Chile el “HUB digital de Latinoamérica”

“Queremos convertir a Chile en un HUB digital para que las grandes empresas del mundo nos vean como mercado para conectar a toda la región” fueron las declaraciones de la ex subsecretaria de Telecomunicaciones, Pamela Gidi, en el año 2020. Intenciones del Estado de Chile que fueron confirmadas por el presidente de la Comisión Desafíos del Futuro, Ciencia, Tecnología e Innovación del Senado, el Senador Guido Girardi Lavín, que en agosto del 2021, señaló: “Prospectar cómo la instalación de *datacenters* y nubes, junto con otras ventajas nacionales en el ámbito digital y geopolíticas, impactarán en varias industrias y sectores científicos de clase mundial que tiene Chile y nos abrirán nuevas industrias en el mundo digital de servicios globales y nuevas posibilidades para transformar a Chile en un actor relevante a nivel global, entregando una visión nacional en la materia”.

Un *datacenter* es una instalación que alberga servidores de procesamiento y seguridad de datos digitales, los que para funcionar necesitan un sistema de refrigeración que puede utilizar agua, aire, líquidos refrigerantes u otros. Estas instalaciones resultan indispensables para la conectividad digital, por lo que ha resultado ser un negocio en rápido crecimiento dentro de los últimos años, especialmente en Chile, que a septiembre del 2021 ya mostraba un

total de 4.300 millones de inversión proyectados para el 2025, con anuncios de Google, Microsoft, Amazon, Huawei, Oracle, Ascenty, EdgeConneX, entre otras empresas con presencia en más de treinta países.

Esta gran inversión se ha concretado principalmente en la Región Metropolitana que se ha transformado en el punto neurálgico del país de los datos digitales, negocio que a simple vista resulta inocuo, pero resulta ser problemático en cuanto al consumo del agua, por lo que revisaremos los principales proyectos de *datacenters* desarrollados en la región.

Región Metropolitana, el lugar elegido

El acuífero del Maipo ha sido el lugar elegido por las grandes empresas de datos digitales para instalar sus centros de servidores, especialmente en comunas como Colina, Lampa, Quilicura, San Bernardo-Cerrillos, Puente Alto o Padre Hurtado.

En Colina, al norte de la Región Metropolitana (RM) se encuentra el *datacenter* de EdgeConneX que funciona con equipos Vertiy DA250 y Vertiy PDX para enfriar los servidores, los que utilizan el aire exterior para suministrar dentro de las instalaciones, este aire es enfriado con refrigerante, no usa agua. En febrero del 2022, se presentó ante el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) la Declaración de Impacto Ambiental “Data Center SCL02-SCL03”, para la instalación de dos nuevos *datacenters*, los que utilizan el mismo sistema de refrigeración anterior, siendo de los centros de datos con menor impacto hídrico en la RM.

En Lampa, al lado de Colina, se encuentran funcionando los *datacenter* de Odata y Scala Chile, el primero utiliza

sistemas de enfriamiento con circuitos cerrados donde el agua recircula, pero debe ser repuesta producto de las pérdidas que se presentan a lo largo del tiempo. Es por esto que el sistema funciona con cuatro tanques de reposición abastecidos por la red pública de agua potable, los que acumulan un total de 116.000 litros.

En el caso de Scala Chile, su sistema de refrigeración también funciona por recirculación del agua, los que extraen de un pozo de extracción con derechos de aprovechamiento por un volumen total anual de 5.235.000 litros para el llenado del sistema, el cual es llenado por proveedores contratados por la empresa.

En Quilicura, cercano a las dos comunas anteriores, se concentran los *datacenters* de mayor magnitud de todo el país, como son los casos de los *datacenters* de Sonda, Google, Ascenty y el proyecto de Microsoft que se encuentra en proceso de evaluación ambiental, siendo así, la capital nacional de centros de datos digitales, y una de las capitales a nivel latinoamericano.

En el año 2012 ingresó el primer *datacenter* en Quilicura, a cargo de la empresa Sonda, a través de una consulta de pertinencia para evitar ser evaluada ambientalmente por el SEA. Su sistema de refrigeración utiliza 640.813 litros de agua diarios que son reutilizados para mantener en óptimas condiciones el Club de Golf Aconcagua.

Luego, en el 2013 con una nueva consulta de pertinencia fue ingresado el *datacenter* PARAM, de Google, el más grande de Sudamérica hasta ese momento y que cuenta con derechos de aguas inscritos para extraer 50 litros de agua por segundo del acuífero del Maipo.

Los últimos *datacenters* instalados en Quilicura, y los únicos sometidos al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental del SEA son Ascenty 1 y 2 (ambos aprobados en 2021), que utilizan un



Comuna	Empresas	Sist. de refrigeración	Consumo de agua
Colina	EdgeConneX	Con aire	0 L
Lampa	Odata y Scala Chile	Con agua cerrado	5.351.000 L
Quilicura	Sonda, Google, Ascenty y Microsoft	Con agua cerrado y por evaporación directa	1.578.650.813 L
Cerrillos - San Bernardo	Google y Odata	Con aire y con agua cerrado	240.000 L
Puente Alto	Amazon	Con evaporación directa	5.775.000 L
Padre Hurtado	Amazon	Con evaporación directa	5.775.000 L
Total Anual Aprox.			1.595.791.813 L

Figura 1. Cálculo aproximado del total de agua consumida por año por los diferentes datacenter (la información en ciertas Declaraciones de Impacto Ambiental no es clara y homogénea, lo que hace imposible generar un cálculo preciso).

sistema *chiller* de recirculación de agua, para los que se necesitan aproximadamente 600.000 litros de agua al año.

Actualmente es la multinacional Microsoft, que se encuentra en proceso de evaluación ambiental para instalar su primer datacenter en Sudamérica, el que utilizaría un sistema de refrigeración que funciona a través de evaporación directa, que consiste en evaporar directamente el agua en el aire, reduciendo así su temperatura y humectándolo, mediante un sistema que impulse el aire entre el exterior y el interior de las salas donde se encuentren los servidores. Esta refrigeración solo debería funcionar en los casos en que la temperatura del aire exterior sea superior a los 29,44°C, lo que la empresa estima que sería 25 días al año, para lo cual se requeriría el consumo de más de 610.000 litros de agua al año, considerando que esto fuera solo una recarga, lo que no está claro en la presentación del proyecto.

En Cerrillos y San Bernardo, se encuentran los datacenters de Google y Odata. En el caso de Google, logró instalarse con un cuestionado proyecto que en un

principio comprometía el consumo de 169 litros por segundos de agua para la refrigeración, en su máxima capacidad operativa, equivalente a consumir en 24 horas la demanda domiciliar anual de agua potable de los más de 80 mil habitantes de Cerrillos, lo que fue modificado producto de la presión ciudadana, obligando a Google a presentar un nuevo sistema de refrigeración por aire, el que no utiliza agua.

En el caso de Odata, funciona con 32 sistemas cerrados con agua (*chiller*), para lo que se requieren 240.000 litros de agua para ser llenados completamente, con una estimación de pérdida de 50 litros al año. El agua no proviene de pozos de extracción, sino de proveedores autorizados.

En Puente Alto se ha presentado el último proyecto de datacenter en Chile, a cargo de la gigante digital Amazon, la que pretende usar un sistema de enfriamiento por evaporación directa, para el cual señala que necesitaría en su máxima capacidad operativa solo el 3% de hasta 5.775.000 litros anuales, información que es poco clara en

la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) presentada por el titular. Este mismo proyecto también se pretende instalar en la comuna de **Padre Hurtado**, con el mismo sistema de refrigeración, que esperamos que aclare su consumo real de agua en el proceso de evaluación ambiental.

De los antecedentes revisados podemos concluir que el gasto total de agua anual entre los diferentes proyectos de datacenters mencionados, y según lo declarado en las Resoluciones de Calificación Ambiental, es que se consumiría un aproximado de mil seiscientos millones de litros anuales (ver Figura 1).

Alto impacto socioambiental para comunas vulnerables

La progresiva instalación de los datacenters en la Región Metropolitana, está resultando en una gran carga hídrica para la cuenca del Maipo, la que no se tenía contemplada hace algunas décadas y es



un gran problema para algunas comunas que ya se encuentran saturadas de industrias. El avance tecnológico de Chile, está trayendo altos costos que muchas veces son invisibilizados, un claro ejemplo es lo que sucede en Quilicura, donde se concentran los datacenters de mayor magnitud del continente, lo que ha traído conflictos de desabastecimiento de agua para las personas que viven cerca del lugar (en la calle Caupolicán), los que han visto como se ha reducido el nivel de los pozos de extracción de agua en la última década, llevándolos a la situación de tener que abastecerse con camiones aljibes, mientras solo a algunos metros, el datacenter de Sonda mantiene vivo el Club de Golf Aconcagua (ver Figura 2), de la que ninguna de estas familias afectadas, ni las propias personas de Quilicura pueden disfrutar, por el costo económico que esto representa.

Sorprende el historial que ha tenido Google en Chile, que siendo una de las empresas más ricas del mundo, no ha cumplido con los estándares mínimos de mitigación ambiental de forma voluntaria, por lo que ya fueron expuestos en el año 2020 por el grupo periodístico CIPER, a través de la publicación del artículo *Las zonas oscuras de la evaluación ambiental que autorizó "a ciegas" el megaproyecto de Google en Cerrillos¹*, que ayudó a exponer las deficiencias en la evaluación ambiental del proyecto de la empresa en Cerrillos-San Bernardo, donde la comunidad, encabezada por la organización socioambiental MOSACAT, se manifestó en contra del impacto hídrico del proyecto original, motivando a la empresa para que no utilizara agua.

Algo similar sucedió con Google en Quilicura, donde el datacenter PARAM, el más grande de Sudamérica se instaló sin someterse a evaluación de impacto ambiental alguna, ya que el Servicio de Evaluación Ambiental aprobó la consulta de pertinencia ingresada en el año

[La instalación de datacenters] ha traído [severos] conflictos de desabastecimiento de agua. [Por ejemplo, en Quilicura ha llevado a] tener que abastecerse con camiones aljibes.



Fuente: www.golfaconcagua.cl

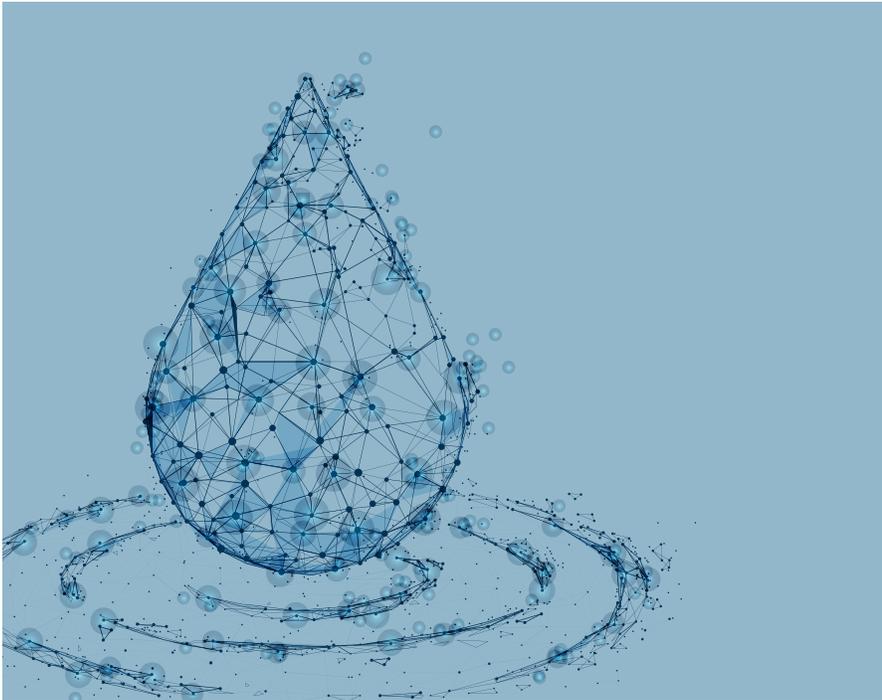
Figura 2. Club de Golf Aconcagua y Datacenter de Sonda en Quilicura.



Fuente: es:la.facebook.com/municipiquilicura/posts/1087565024766501

Figura 3. Inauguración del Bosque Urbano de Google en Quilicura.

1 <https://www.ciperchile.cl/2020/05/25/las-zonas-oscuras-de-la-evaluacion-ambiental-que-autorizo-a-ciegas-el-megaproyecto-de-google-en-cerrillos/>.



2013 para que el proyecto no tuviese que someterse a Declaración de Impacto Ambiental, ni tampoco a Estudio de Impacto Ambiental, que son las formas de ingreso al Sistema de Evaluación Ambiental chileno. Este gigante datacenter se encuentra a vista y paciencia de las quilicuranas y los quilicuranos que ingresan a la comuna a través de la Estación Intermodal del Metro Los Libertadores de la Línea 3, y que no ha traído ninguna compensación ambiental real a la comuna, a pesar, de que la empresa había prometido la instalación de un Bosque Urbano en la ladera norte del Cerro Renca, el cual se inauguró (ver Figura 3), pero al día de hoy se encuentra sin mantención y sin un uso efectivo por parte de la comunidad.

El caso del proyecto de Microsoft, se repite la misma lógica

“Así como los ferrocarriles, las centrales eléctricas, las carreteras y los aeropuer-

tos ayudaron a Chile a avanzar en el futuro, los datacenters se han convertido en la infraestructura de vanguardia del siglo XXI. Nuestros datacenters cerca de Santiago harán que la computación sea más accesible a velocidades aún más rápidas, proporcionando una plataforma nueva y segura para cada parte de la economía y apoyando la ambiciosa agenda digital de Chile”, fueron las palabras del presidente Brad Smith, que junto al gerente general de Microsoft Chile, Sergio Rademacher, y al expresidente Sebastián Piñera anunciaron el 9 de diciembre de 2020, desde La Moneda, el plan “Transforma Chile #ReactivaciónDigital” que implica la inversión de 500 millones de dólares para la instalación del primer datacenter de la empresa en el país.

En su llegada a Chile, Microsoft prometió que su plan de inversiones estaría basado en cuatro pilares fundamentales:

1. Habilitar la transformación digital, a través de la creación de una nueva región de datacenters Azure, que incluye los servicios de Microsoft 365, Dynamics 365 y Power Platform.

2. Empujar la recuperación económica, generando alianzas con el Centro de Innovación UC Anacleto Angelini, la CORFO y otras empresas, con el fin de “acelerar su transformación digital”.
3. Fomentar la capacitación y mejorar la empleabilidad, anunciando junto a SENCE el compromiso para capacitar en habilidades digitales a más de 180.000 chilenos para 2025 y la promesa de generar unos 51.000 nuevos puestos de trabajo en los próximos cuatro años.
4. Crear impacto social y sustentabilidad, impulsando el uso de inteligencia artificial para aumentar la capacidad de investigación astronómica. Además, de los compromisos de cambiar al 100% el suministro de energía renovable en los centros de datos de Microsoft para 2025, ser una empresa con carbono negativo para el 2030 y retirar toda su huella de carbono para el 2050.

La base principal de esta propuesta se centra en la instalación del datacenter Azure, centro de procesamiento y protección de datos digitales consistente en una instalación de servidores que funcionan bajo un sistema de refrigeración por inmersión en líquido dieléctrico, eliminando el consumo de agua. En este sistema se utiliza la menor cantidad de espacio, compactando los servidores y colocándolos dentro de un sistema cerrado de refrigeración donde recircula de forma constante el líquido, recapturando el líquido que se evapora para que vuelva al sistema.

Otras de las innovaciones tecnológicas del modelo Azure se encuentra en el suministro de energía, al proponer el reemplazo de los motores a combustión por celdas de combustible de hidrógeno que brindan otra opción para la energía de emergencia, mucho más ecológica. Otra opción planteada es el reemplazo de combustibles fósiles por gas natural o diésel sintético en los generadores



La Declaración de Impacto Ambiental del proyecto [de Microsoft] describe un datacenter totalmente diferente al modelo Azure [mucho más amigable con el medio ambiente,] prometido por la empresa en su llegada a Chile.

de emergencia, el primero ofrece la reducción entre un 30% y 40% menos de emisiones totales que los combustibles tradicionales, mientras que el diésel sintético se obtiene de la biomasa, como el papel y residuos de pulpa, produciendo menores emisiones de carbono en comparación con los generadores de emergencia actuales.

Este es el sistema prometido por Microsoft al llegar a Chile: datacenter Azure, un sistema de servidores que según la página oficial de la empresa, no utiliza agua y reduce considerablemente la huella de carbono al utilizar las últimas innovaciones en tecnología con el fin de ser amigables con el medio ambiente.

Pero las promesas de Microsoft de instalar un datacenter de última tecnología en Chile fueron falsas, ya que el 13 de diciembre del 2021 la sucursal chilena de la empresa presentó ante el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) del proyecto "Microsoft SCL03", que describe un datacenter totalmente diferente al modelo Azure prometido por la empresa en su llegada a Chile.

Según lo presentado en el proyecto, el datacenter no implementaría un sistema de refrigeración por inmersión en líquido dieléctrico, sino que se enfriaría a través de evaporación directa, que consiste en evaporar directamente el agua en el aire, reduciendo así su temperatura y humectándolo, mediante un sistema que impulse el aire entre el exterior y el interior de las salas donde se encuentren los servidores. Esta refrigeración solo debería funcionar en los casos en que la temperatura del aire exterior sea superior a los 29,44°C, lo que la empresa estima que sería 25 días al año, para lo cual se requeriría el consumo de más de 610.000 litros de agua diarios. Esto sin considerar que el territorio donde se emplazará el proyecto se encuentra afectado por un proceso de desertificación acelerado por el calentamiento global.

Otra inconsistencia de Microsoft entre el proyecto prometido y el datacenter presentado consiste en el combustible utilizado para los generadores de emergencia, ya que los generadores contemplados en Microsoft SCL03 funcionan a través de petróleo diésel y no con una alternativa más ecológica que busque

eliminar la huella de carbono al 2050, como lo expresa la empresa públicamente en su página oficial.

Llama profundamente la atención que una empresa con tanta reputación como lo es Microsoft exponga un discurso amigable con el medio ambiente de forma pública, pero que en la realidad no cumpla con los estándares de innovación a nivel mundial en un país tercermundista como Chile, dejando en claro que Latinoamérica es un pueblo al sur de Estados Unidos.

Conclusiones

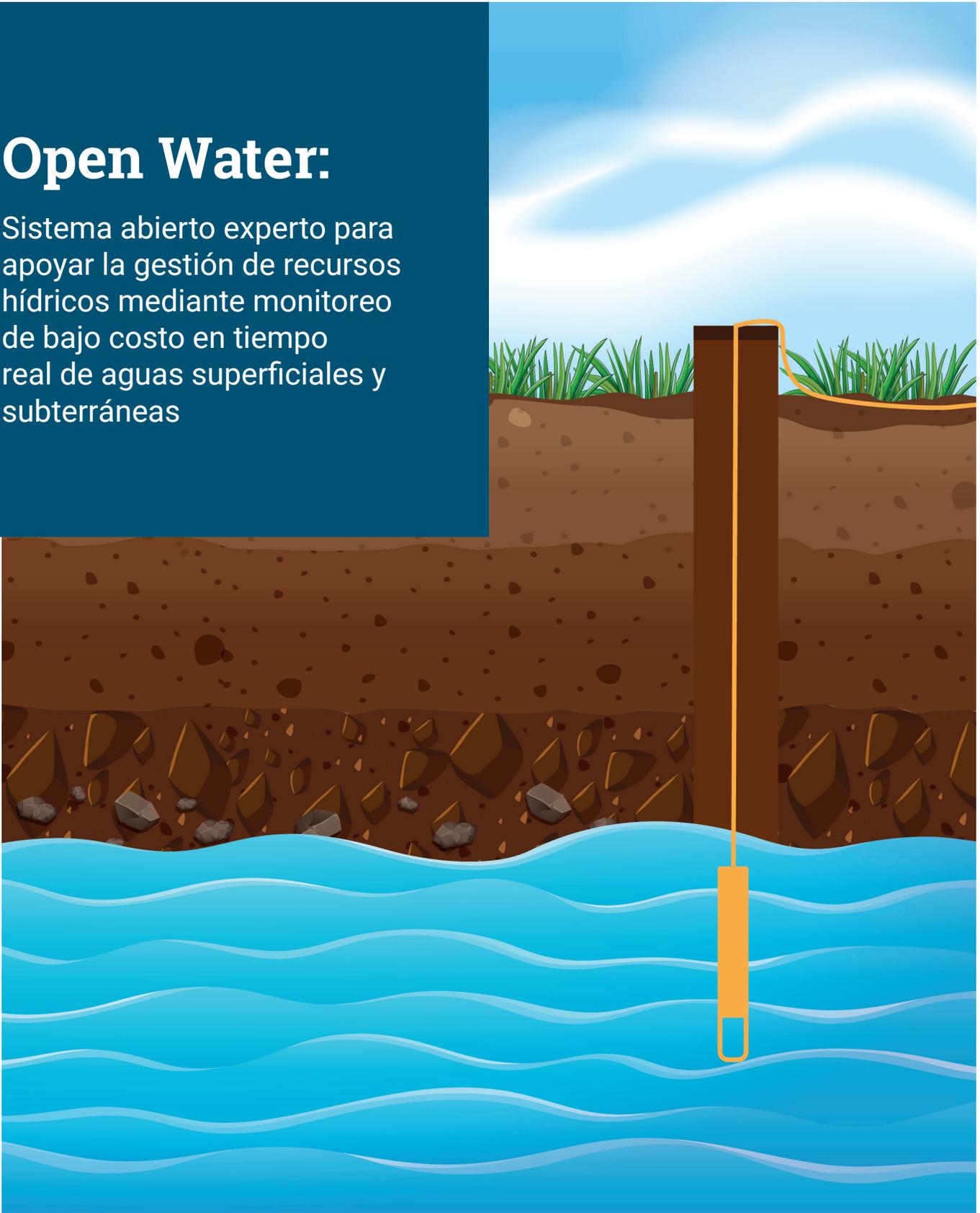
De lo expuesto podemos concluir que el impacto hídrico de los datacenters es realmente significativo para el acuífero del Maipo, sin que exista una responsabilidad social y ambiental por parte de las multinacionales que se instalan en el territorio. No ha existido ninguna política ambiental que mitigue de forma justa el consumo de agua que requieren las empresas. Así también, resulta alarmante que empresas que tienen acceso a la más alta tecnología sigan consumiendo agua para los sistemas de refrigeración de sus servidores.

Es un desafío urgente, que se cree legislación y estándares mínimos de sustentabilidad para los datacenters en Chile para una instalación consciente con los ecosistemas y el agua. ■



Open Water:

Sistema abierto experto para apoyar la gestión de recursos hídricos mediante monitoreo de bajo costo en tiempo real de aguas superficiales y subterráneas





SANDRA CÉSPEDES

Profesora Asistente del Departamento de Ciencias de la Computación e Ingeniería de Software, Concordia University (Canadá). Profesora Asociada, jornada parcial, del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile. Investigadora Asociada de NIC Labs Chile y del Centro Avanzado de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (AC3E).

✉ sandra.cespedes@concordia.ca



LINDA DANIELE

Profesora Asociada del Departamento de Geología, Universidad de Chile. Investigadora del Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes - CEGA, del Núcleo Milenio Trazadores de Metales y Directora alterna del Centro Avanzado para Tecnologías del Agua (Consortio CAPTA).

✉ ldaniele@ing.uchile.cl



DORIS SÁEZ

Profesora Titular del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile. Directora del Programa de Pueblos Indígenas de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

✉ dsaez@ing.uchile.cl



JAVIER BUSTOS

Director de NIC Labs, laboratorio de investigación de NIC Chile. Profesor Adjunto del Departamento de Ciencias de la Computación (DCC), Universidad de Chile.

✉ jbustos@niclabs.cl

RESUMEN. En enero del 2020, bajo el marco del proyecto FONDEF IDeA ID19110363, se unieron NIC Chile Research Labs, el Departamento de Ingeniería Eléctrica y el Departamento de Geología de la Universidad de Chile, junto con las entidades asociadas Arcadis SPA, University of Illinois at Urbana-Champaign, Esva y la Dirección General de Aguas para diseñar y desarrollar un prototipo experimental de un sistema de medición multiparamétrico abierto de bajo costo, con el cual se pueda masificar el monitoreo de la calidad de agua tanto superficial como subterránea. Este artículo da cuenta de los resultados finales del proyecto, los aciertos y desafíos en su implementación y los siguientes pasos para llevar esta tecnología hacia un producto final.

Dadas las evidencias del cambio climático, el crecimiento de la población mundial y un mayor consumo generalizado de agua, la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos han tomado una relevancia vital. Ejemplos a nivel global muestran que la disponibilidad de agua ha disminuido a niveles críticos o reducido su calidad. En el caso de Chile, existen reportes de escasez de agua y ha sido identificado que la mitad del país no tiene los niveles mínimos de agua para un desarrollo sostenible. Un primer paso hacia ese desarrollo sostenible está en la implementación de sistemas de monitoreo de las aguas, tanto subterráneas como superficiales, que permita a través de los datos recolectados comprender un sistema hidrogeológico, con el fin de proponer una planificación y el manejo sustentable de los recursos hídricos.

Si bien en Chile existe una Red Hidrométrica Nacional que entrega datos de niveles y de calidad química básica del agua, esta todavía no logra cubrir a cabalidad las cuencas mayores identificadas en el Banco Nacional de Aguas, ni en las áreas



declaradas de restricción. En la red actual, muchos de los datos se toman manualmente, causando variaciones en la periodicidad de las lecturas y en su consiguiente publicación, sumado a que los puntos de medición son muy discretos espacialmente, lo cual en muchos casos no permite observar y detectar a tiempo eventuales alteraciones de las aguas. La Contraloría General de la República confirmó en su Informe de Auditoría 265/2021 [1], que la ausencia de una red extensa de monitoreo conlleva al desconocimiento de los acuíferos que están en explotación, a la falta de datos que permitan caracterizar la disponibilidad y calidad del agua, y a la imposibilidad de generar información y estadísticas relevantes para la gestión del recurso hídrico. Los problemas de acceso y calidad de información sobre aguas ya asignadas también impiden la implementación de estrategias medioambientales que permitan adaptarse al cambio climático [2].

Sin embargo, las deficiencias que se encuentran en la obtención y análisis de información de recursos hídricos no se deben a la inexistencia de tecnologías avanzadas de monitoreo. Los equipos existentes, altamente especializados, permiten integrar medición en continuo y el almacenamiento local de las mediciones. El mayor inconveniente es su alto costo, el cual oscila entre USD \$1.000 y USD \$8.000 por equipo. A esto se suma la imposibilidad de tener

acceso a los datos en tiempo real puesto que el difícil o retirado acceso a algunos puntos de medición, implica que la recuperación de los datos termine con altas dispersiones temporales y retraso en su procesamiento de entre 1 hasta 6 meses.

Plataforma Open Water

Para abordar esta problemática, el equipo del proyecto Open Water en el año 2019 se propuso como meta construir un prototipo para la recolección de datos en tiempo real a partir de dispositivos de monitoreo de bajo costo; una vez recibidos los datos, se debía contar con un sistema de información que incorporara conocimiento experto para detectar eventos y anomalías de forma automática, además de contar con una interfaz de visualización que permitiera la (des)agregación espacial y temporal de los datos y eventos, para facilitar la toma de decisiones. El componente “open” del proyecto consistiría en que la guía de construcción del dispositivo quedaría de uso libre para fines no comerciales, también conocido como *open hardware*. Por otro lado, la base de datos para almacenamiento y extracción posterior de los mismos, así como de los eventos detectados, también serían de uso público, en busca de mejorar el acceso a información de nuestras fuentes hídricas.

A partir de enero de 2020 se dio inicio oficial al proyecto apoyado por el programa FONDEF IDeA 2019, con la participación de NIC Chile Research Labs, el Departamento de Ingeniería Eléctrica y el Departamento de Geología de la Universidad de Chile, y en asociación con las entidades Arcadis SPA, the University of Illinois at Urbana-Champaign, Esval y la Dirección General de Aguas. Las etapas principales que se definieron para el prototipo fueron:

1. La construcción de nodos sensores (módulo de captura) usando o adaptando tecnologías existentes de bajo costo, para medición de nivel y cuatro parámetros fisicoquímicos del agua: conductividad, pH, temperatura y turbiedad.
2. La integración de un sistema de comunicaciones (módulo de comunicación) con tecnologías para Internet de las Cosas (IoT).
3. La creación de un sistema con conocimiento experto que combine técnicas de procesamiento de datos y entrenamiento, para la detección de eventos y anomalías.
4. El diseño de un componente de visualización de datos, en la forma de un tablero de control interactivo que permita la interpretación, filtrado y lectura intuitiva de los datos.

En la Figura 1 se observa el diagrama de bloques de la solución.

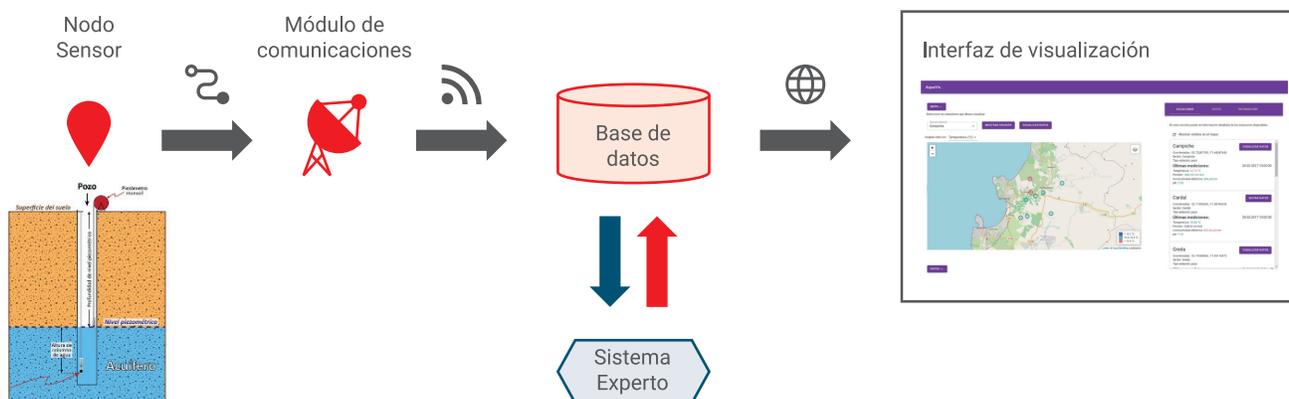


Figura 1. Diagrama de bloques Plataforma Open Water.



Construcción del Nodo Sensor

Para el desarrollo del dispositivo de monitoreo se realizó una preselección de los sensores de bajo costo que cumplirían un conjunto de requisitos mínimos, como profundidad máxima de operación, temperatura máxima, entre otros. Con este conjunto de sensores se realizó un estudio para verificar su precisión mediante comparaciones con sensores de rango alto, de uso comercial y científico. En la Figura 2 se observan algunos de los laboratorios de pruebas, que en periodo de pandemia se tuvieron que improvisar en las casas de los miembros del equipo.

En la Figura 3 se muestran ejemplos de los resultados de mediciones de los sensores de temperatura y presión y su comparación con el sensor de referencia. Además de corroborar su precisión, se realizaron experimentos que permitieran observar su comportamiento en el tiempo, para detectar posibles descalibraciones al sumergir los sensores de bajo costo por largos periodos. A partir de los experimentos se logró determinar que los sensores de temperatura, presión y pH cumplían con los requisitos de operación, arrojando errores menores a 0.5°C , 1 cm , y 1 , respectivamente, en comparación con los sensores comerciales de referencia. Por su parte, los resultados de los sensores de conductividad eléctrica y turbidez dieron cuenta de la necesidad de estudios adicionales por periodos más extendidos y con condiciones particulares para la toma de los datos.

De forma paralela se inició el desarrollo del componente electrónico que permitiría la lectura de los sensores, el empaquetamiento de los datos con su marca temporal y su envío a través de una red inalámbrica para su posterior almacenamiento en la nube. Se trató de la selección de microcontroladores y de componentes de fácil adquisición, así como el diseño de

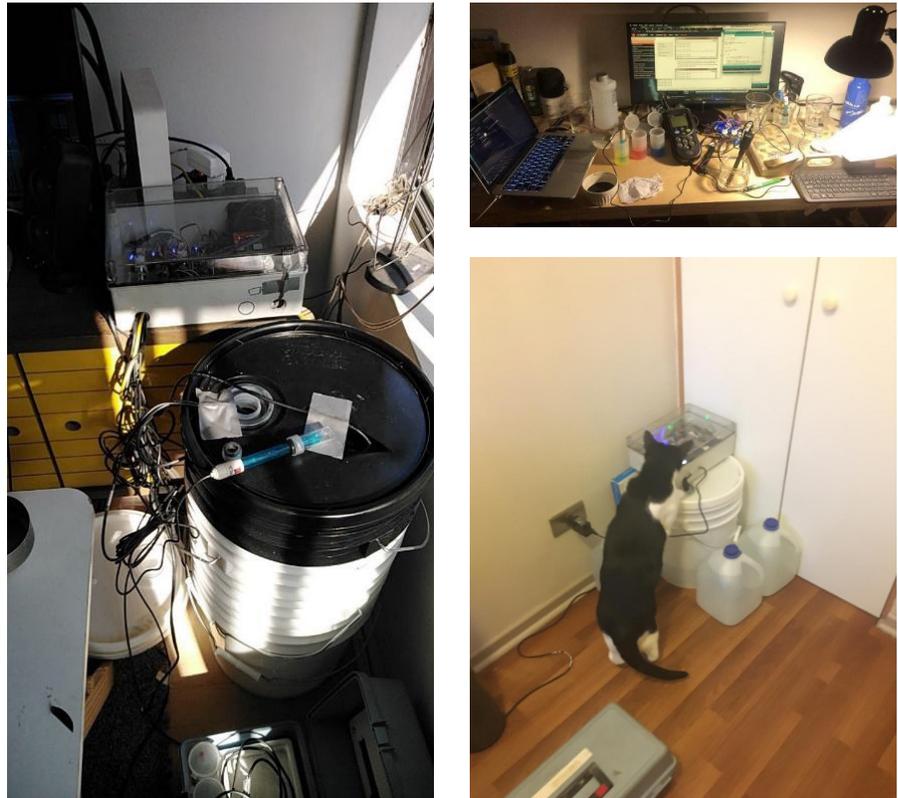


Figura 2. Laboratorios de prueba de sensores de bajo costo.

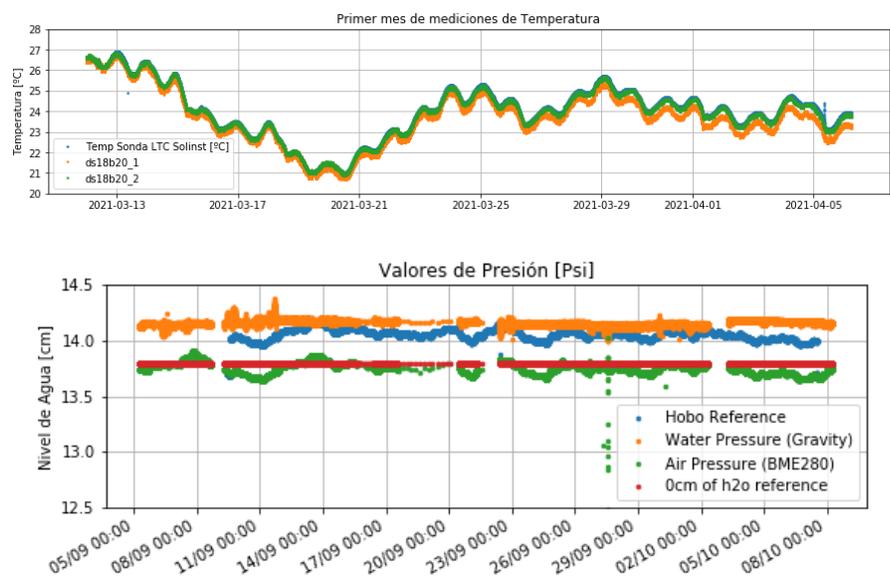


Figura 3. Ejemplo de estudios comparativos de sensores de bajo costo versus sensores de referencia.



a. Integración de componentes en tarjeta de desarrollo.



b. Versión final del prototipo con integración en PCB.

Figura 4. Evolución de la electrónica del dispositivo sensor.



a. Versión final prototipo carcasa y cable de datos.



b. Pruebas de inmersión en terreno.

Figura 5. Dispositivo sensor con carcasa y cable de datos sumergibles.

una tarjeta de circuito impreso (PCB) para la integración de todos los componentes. El diseño electrónico fue mejorando en varias iteraciones, en búsqueda de reducir su consumo energético, aligerar su carga de procesamiento y mantener los requisitos de tamaño, dadas las restricciones que se tenían en cuanto a las dimensiones del dispositivo para hacer posible su inmersión en pozos de observación. En la Figura 4 se muestra la evolución del prototipo desde su primera integración en una tarjeta de prototipado hasta su versión final con la PCB y los sensores conectados.

Para el empaquetamiento de la electrónica se trabajó en el diseño de una carcasa sumergible que mantuviera el

dispositivo en condiciones correctas de operación y soportara la presión de estar a 40 metros de profundidad. El diseño debía cumplir dos exigencias: usar materiales de fabricación de bajo costo y fácil acceso, y tener las dimensiones apropiadas para inmersión en pozos donde hubieran no más de 7 centímetros de diámetro disponibles para introducir el dispositivo. La carcasa también pasó por varias iteraciones en su diseño, selección de materiales y construcción. Finalmente se llegó al diseño mostrado en la Figura 5-a, el cual se sometió a validaciones exitosas en laboratorio a 5 metros de profundidad y pruebas iniciales en terreno (ver Figura 5-b), con inmersiones hasta 40 metros de profundidad.

Las deficiencias [...] en la obtención y análisis de información de recursos hídricos se deben al alto costo de los equipos de monitoreo y a la imposibilidad de tener acceso a los datos en tiempo real.

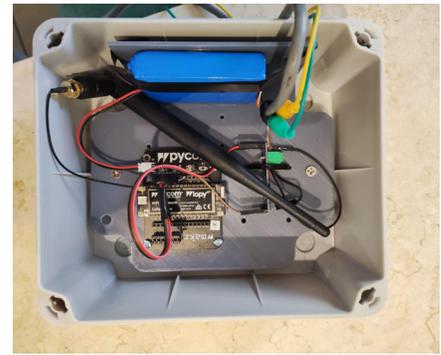


Figura 6. Módulo de conectividad del prototipo con tecnología LoRaWAN.

En cuanto al módulo de comunicación del dispositivo sensor, se realizaron estudios de tecnologías de bajo costo para verificar su cobertura y conectividad exitosa a largas distancias. Finalmente se seleccionó un módulo de prototipado con tecnología LoRaWAN que permitía distancias de más de 5 kilómetros y un despliegue de bajo costo con un punto de acceso que puede conectarse a Internet mediante diversas opciones: WiFi, LTE, Ethernet, etc. En la Figura 6 se observa la versión final del módulo de conectividad a instalar en la superficie y que se conecta al dispositivo sensor mediante un cable de datos sumergible desarrollado por el equipo de ingeniería y diseño del proyecto.

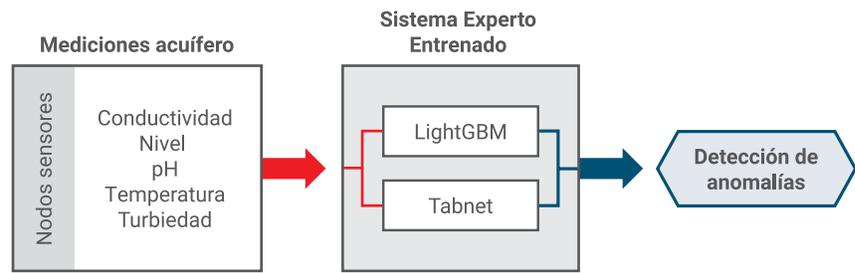


Construcción del Sistema Experto

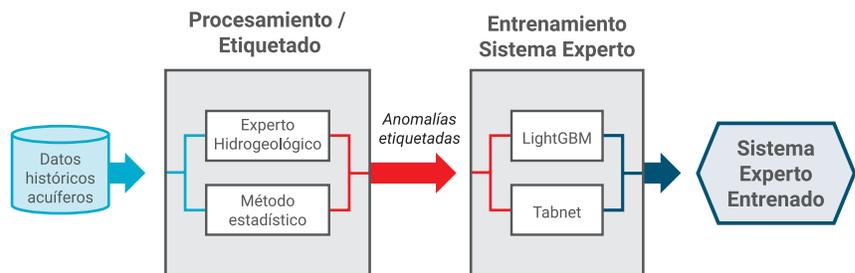
El monitoreo continuo es esencial para comprender el funcionamiento de un sistema hidrogeológico. El análisis de los datos recolectados permite que experto/as en recursos hídricos logren entender el funcionamiento natural de dicho sistema y distinguirlo de aquellos comportamientos anómalos. Algunos ejemplos de anomalías en los sistemas hidrogeológicos pueden ser los periodos de sequía, donde la disponibilidad, así como también la calidad del recurso hídrico, pueden verse afectados notablemente. Otro ejemplo también son los eventos de contaminación, donde la composición química del agua se ve afectada. De este modo, una rápida detección ante instancias anómalas es crítica para la planificación y toma de decisiones, pero esta tarea se torna compleja para el/la experto/a en sistemas de monitoreo continuo donde hay una gran cantidad de datos almacenados. Debido a esto, se propuso la implementación del *sistema experto*, que incorpora un *software* capaz de analizar los datos obtenidos desde los acuíferos de forma automática.

El diseño consta de la integración de dos herramientas (o modelos) de *machine learning* entrenadas para trabajar en paralelo, y cuyas salidas son fusionadas mediante una estrategia determinada. Las herramientas de *machine learning* escogidas para el prototipo fueron LightGBM [3] y TabNet [4]. La Figura 7-a ilustra los componentes del sistema con sus entradas y sus salidas. Es importante mencionar que el Sistema Experto no se limita solamente a utilizar los modelos LightGBM y TabNet, ya que por su diseño flexible se pueden incorporar otros tipos de modelos para trabajar en paralelo juntos a los ya propuestos.

Para la incorporación de conocimiento experto humano en el sistema, este se



a. Entradas y salidas del sistema en línea.



b. Esquema de entrenamiento del sistema.

Figura 7. Componentes del sistema experto en operación.

incluyó en la etapa de preprocesamiento de los datos históricos para ser utilizados en el entrenamiento de los modelos de *machine learning*, proceso que es ilustrado en la Figura 7-b. Este preprocesamiento corresponde al etiquetado de datos realizado por el/la experto/a y a la selección del conjunto de datos históricos más adecuado para el entrenamiento de los modelos de detección de anomalías. De manera adicional, y con el fin de tener un etiquetado robusto, el preprocesamiento de los datos incluye un método estadístico que permite obtener datos etiquetados mediante otro criterio, y que pueden utilizarse como complemento a los datos previamente etiquetados por el/la experto/a.

Al realizar la evaluación del sistema implementado con una base de datos histórica y debidamente etiquetada por expertos/as, se determinó que los dos modelos, por separado, tienen un desempeño por sobre un 75% en prácticamente todas las métricas usadas: *Accuracy*, *F1-Score*, *Precision*, *Recall*, ex-

cepto el *Recall* que registró un 73% para Tabnet. Sin embargo, al fusionar ambos modelos, todas las métricas propuestas sobrepasan el 75% y, considerando solo el *Accuracy*, este logró alcanzar cerca del 95%. La Figura 8 muestra de forma gráfica la efectividad de la detección usando una base de datos de validación y comparando las anomalías reales (etiquetadas) a las anomalías detectadas automáticamente mediante la fusión de los modelos LightGBM y TabNet a través de la función lógica OR.

La última parte del sistema de información corresponde a la interfaz de visualización. El diseño de la interfaz gráfica se delineó bajo tres ejes principales: estructura de la interfaz gráfica, usabilidad, y experiencia de usuario. Estos ejes apuntan a desplegar la mayor información de interés para el usuario, permitiéndole interactuar con los datos medidos desde los acuíferos de una manera intuitiva y similar a otras plataformas existentes que cumplan los mismos propósitos. El diseño fue propuesto por el investigador



Juan Salamanca de la Universidad de Illinois (Urbana, Champaign, Estados Unidos), institución asociada del proyecto. El diseño se adaptó en diversas iteraciones con clientes potenciales del sistema. Finalmente, la funcionalidad de la interfaz fue desarrollada 100% *in-house* por el equipo de desarrollo del proyecto.

El *front end* fue desarrollado en React, biblioteca de JavaScript que ayuda a crear interfaces de usuario interactivas. Se utilizaron las librerías Leaflet para visualizar e interactuar con el mapa, y Plotly.js para mostrar los gráficos con sus interacciones. React se renderizó usando Node. Por otro lado, en el *back end*, la obtención de los datos de los sensores instalados en los acuíferos se realizó a través de una *interfaz de programación de aplicaciones* (API, por sus siglas en inglés) desarrollada en Flask. La API se conecta con las bases de datos: influx-DB para las series temporales y MySQL para todo lo demás, y genera rutas de acceso que son posteriormente utilizadas en la interfaz web para obtener los datos solicitados. Esto permite que el *front end* pueda tener acceso a los datos cuando sea necesario, y de este modo, dejarlos a disposición del cliente.

Para verificar el funcionamiento de la interfaz gráfica implementada, a la cual se le llamó AquaVis (Aqua Visualization), se generaron datos sintéticos que se relacionaron a nueve acuíferos artificiales (puntos geográficos que representaban de manera ficticia la existencia de un acuífero en ese lugar). Esto permitió realizar una simulación de la interacción de la interfaz gráfica con la base de datos que contiene los datos medidos en los pozos monitoreados.

En la Figura 9 se observa la pantalla principal de la interfaz gráfica implementada. Además, se visualizan los tres paneles principales que componen la interfaz. En (1) aparece el mapa interactivo para que el usuario pueda buscar los acuíferos en los cuales se encuentra un dispositivo de monitoreo. En (2) se

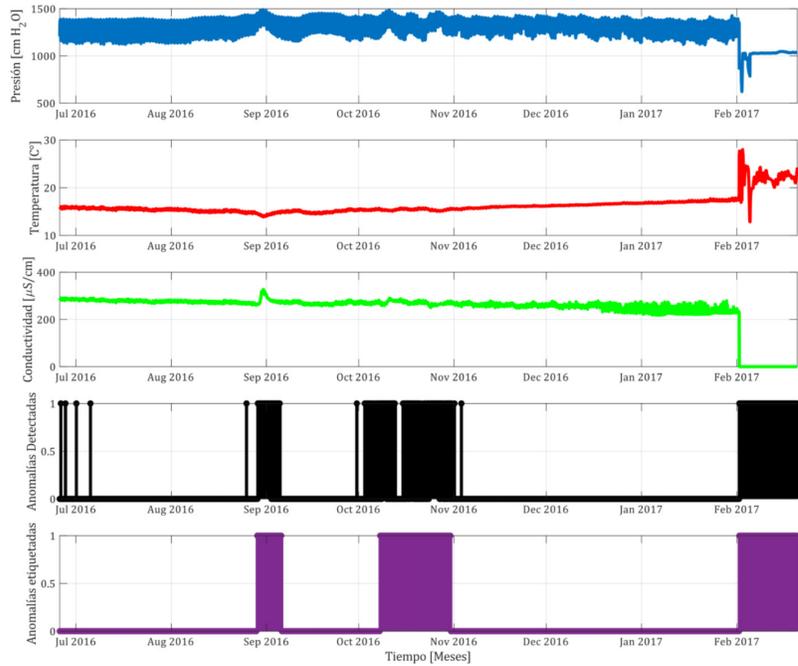


Figura 8. Base de datos de validación junto con las anomalías detectadas por la fusión de LightGBM y TabNet (color negro) y las anomalías previamente etiquetadas (color morado).

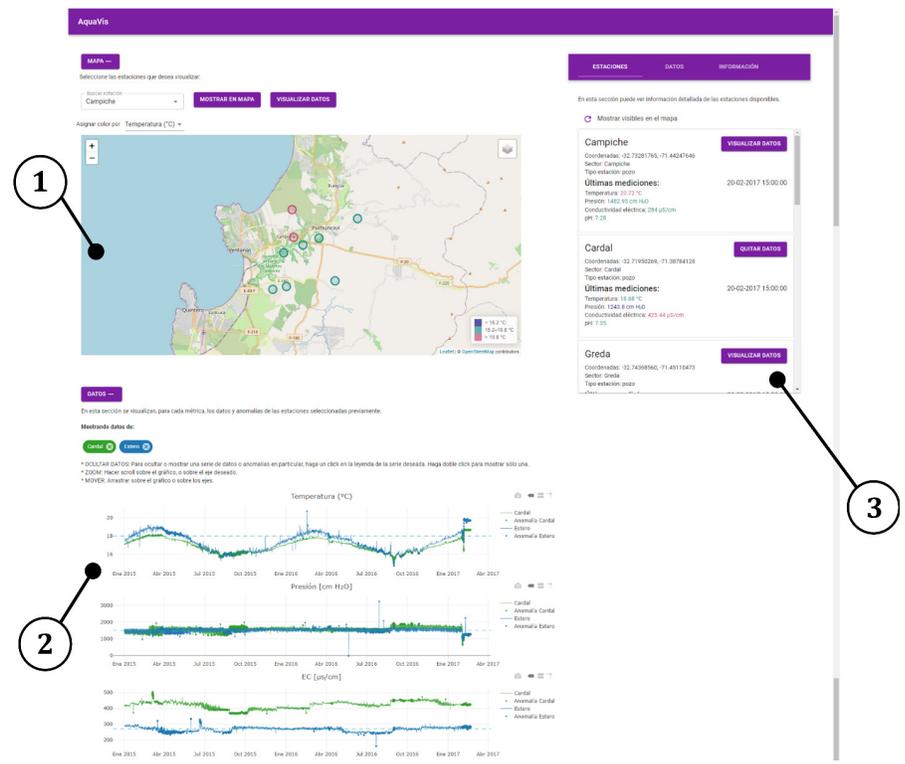


Figura 9. Pantalla principal de AquaVis.



El diseño electrónico [del nodo sensor] fue mejorando en varias iteraciones, en búsqueda de reducir su consumo energético, aligerar su carga de procesamiento y mantener los requisitos de tamaño.

despliegan las series de tiempo de las variables que son medidas en los pozos monitoreados. Por último, en (3) se presenta un panel de información de los pozos que son visualizados en el mapa interactivo. La interfaz se encuentra disponible para su uso con datos de prueba en <http://agua.niclabs.cl:3001/>.

Siguientes pasos

El diseño, implementación y pruebas del prototipo de la Plataforma Open Water tuvieron grandes aciertos, pero también muchos desafíos. El desarrollo durante la pandemia de COVID-19 obligó al trabajo colaborativo de forma remota durante el total del tiempo del proyecto. Los laboratorios de pruebas tuvieron que trasladarse a casas y en contadas ocasiones se logró acceso a pruebas en terreno, debido a las múltiples restricciones durante las cuarentenas y desplazamientos controlados fuera de la Región Metropolitana. Sin embargo, la motivación del equipo fue grande y así se logró tener un prototipo 100%

funcional con un costo inicial unitario, sin producción en volumen, de aproximadamente USD \$500. El prototipo muestra la operación de la plataforma desde el punto de medición en la fuente hasta el procesamiento y visualización de los datos en una plataforma interactiva y de alta usabilidad para los usuarios gestores del recurso hídrico. En los próximos pasos, el equipo de investigación y desarrollo planea continuar con pruebas de los sensores que mostraron un menor desempeño (i.e., conductividad eléctrica y turbidez), así como ajustes al diseño de la carcasa sumergible. La placa electrónica se adaptará para cumplir funciones acotadas que nos permitan jugar con dispositivos sensores que contengan sensores para medir solo un subconjunto de los parámetros, tratando de atender necesidades de proyectos que requieren mediciones puntuales. En cuanto al sistema de información y visualización, esperamos abordar los retos de escalabilidad para soportar la incorporación de un número alto de dispositivos, pero también la conexión de estaciones diferentes a la nuestra, para aquellas iniciativas que

busquen poner a disposición sus datos en la plataforma abierta de Open Water.

Este proyecto contó con el arduo trabajo y compromiso de un equipo multidisciplinario de investigación y desarrollo conformado por Matías Taucare, Francisco Jaramillo, Benoit Viguier y Miguel Solís (postdocs), Rodrigo Muñoz, Matías Macaya y Felipe Lalane (ingenieros de investigación y desarrollo), Gabriela Mendoza, Gabriel Flores, Sebastián Cifuentes, Maximiliano Jones y Carlos González (memoristas y tesisistas), María Jesús Ugarte, Maite González, Michael Alan Acevedo, Pablo Martín, Amilcar Aravena y Gonzalo Maureira (asistentes de investigación y practicantes). También hicieron parte Felipe Astaburuaga (propiedad intelectual) y Patricia Martínez (asistente administrativa), y el equipo de +D en el diseño de la carcasa. Las empresas asociadas tuvieron una comprometida participación a través de Juan Salamanca (University of Illinois at Urbana, Champaign), Ernesto Ramírez y Nicolás Ramírez (Arcadis SpA), Mariela Vicencio, Bárbara Zurita y Daniel Velásquez (Esval), y Andrea Osses y Mauricio Lorca (DGA). Partes de este artículo están basados en los reportes de hitos elaborados por el equipo y por la/os investigadora/es para presentación ante FONDEF. Este proyecto fue financiado por ANID FONDEF Concurso IDeA I+D 2019 Folio ID19110363 y recibió apoyo del Centro Avanzado en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, AC3E, Proyecto Basal FB0008, ANID. ■

REFERENCIAS

- [1] Contraloría General de la República de Chile. "Informe final 265-2021 Auditoría a las acciones desarrolladas por la DGA del MOP", 2022. <https://www.contraloria.cl/pdfbuscador/auditoria/57a62247294b58c216d729f456e2987c/html>.
- [2] P. Barría, M. Rojas, P. Moraga, A. Muñoz, D. Bozkurt, and C. Álvarez, "Anthropocene and streamflow: Long-term perspective of streamflow variability and water rights," *Elem Sci Anth*, vol. 7, no. 1, p. 2, Jan. 2019.
- [3] G. Ke et al., "LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree," in *31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017)*, pp. 3146-3154. 2017.
- [4] A. Shafi, "TabNet: The End of Gradient Boosting?," in *Towards Data Science*. 2021. <https://towardsdatascience.com/tabnet-e1b979907694>.



Ciencias de la computación "al rescate" para renovar la tierra



JÉRÉMY BARBAY

Profesor Asistente del Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Chile. Doctor en Computación por la Universidad de París XI, Orsay, Francia. Sus intereses de investigación incluyen teoría de la computación, sistema de apoyo al aprendizaje (<https://teachingislearning.cl>) e interacciones computacionales para animales (<https://incalab.cl>).

✉ jeremy@barbay.cl



RESUMEN. Desde la deriva climática, el agotamiento de varios tipos de recursos energéticos y materiales, hasta la emergencia de cambios sociales importantes a través del mundo, estamos viviendo "tiempos interesantes". El desarrollo exponencial de dispositivos computacionales es definitivamente parte del problema, y cualquier solución a largo plazo deberá reducir el costo e impacto de tales dispositivos computacionales sobre el medio ambiente. ¿Hasta cuánto habría que reducir el uso de herramientas computacionales? ¿Existen aplicaciones de la computación que compensan su costo en energía y en recursos? Varias aplicaciones computacionales podrían ser claves en la implementación de las transiciones necesarias en los próximos años.

Introducción

Por bueno o por malo que sea, estamos viviendo tiempos "interesantes". El clima parece enganchado en una deriva imposible de parar (pero que aún podemos evitar acelerar). Esto cae justo en una época en la cual las fuentes más fáciles de explotar de varios tipos de recursos se agotan una tras otra. Y todo eso se combina con transformaciones sociales importantes, que los movimientos migratorios impulsados por los cambios climáticos influenciarán y amplificarán.

El desarrollo exponencial de los dispositivos computacionales en la sociedad humana es definitivamente parte del problema general, considerando tanto el costo energético como el costo material. Por un lado, el crecimiento exponencial de los consumos energéticos asociados a la construcción y al uso de tal material no puede continuar indefi-

nidamente, ya sea con o sin energías fósiles [1]. Por otro lado, los materiales que componen los equipamientos electrónicos están, por definición, presentes en cantidades finitas en el planeta, por lo cual no pueden seguir un desarrollo exponencial sin fin, y llegarán muy pronto a sus límites sin técnicas de reciclaje (aún por inventar e implementar). Para cualquier sociedad que se proyecta en una escala de largo plazo, una "cultura permanente" deberá renunciar (dentro de otras cosas) a algunos aspectos del desarrollo computacional que hemos conocido en los últimos cincuenta años.

Nací y crecí en el campo, donde pude ver tanto la magia de la realidad, celebrando varias noches de navidad con el nacimiento de cabras bebés y llorando por la matanza de dichas cabras para comerlas en algunas celebraciones... dos aspectos de los varios ciclos de "la vida". Pero también me enamoré de la tecnología en general, y de la computación en particular, las cuales se sienten como tener poderes sobrenaturales, extensiones físicas (ser más fuerte, más rápido) y cognitivas (tener mejor memoria, ser más preciso) del ser humano. Me enamoré de los dos, pero no estoy seguro que estos dos amores sean compatibles: a veces las noticias parecen apuntes una y otra vez de que la tecnología lo está destruyendo todo. Trabajar en tecnología me genera algo de disonancia cognitiva: creo que tenemos que mantener un ecosistema favorable al ser humano, ¡pero mi trabajo usa recursos cuya extracción participa en la destrucción de tal ecosistema!

¿Puede existir una sociedad que se sostenga de mejor manera en el tiempo, y que aproveche los superpoderes de la tecnología? La podemos imaginar sin apostar en desarrollos tecnológicos que tengan más de milagro que de ciencia? Han existido sociedades humanas "limpias" que preferían energías sustentables como el viento (e.g. naves a velas, molinos) en vez de energías fósiles (e.g. carbón, petróleo) y materiales radiacti-

vos) no renovables (o, al menos, no renovables a escalas de tiempo humanas). Tales sociedades usaban los principios de la "computación" de forma limitada, por ejemplo en relojes mecánicos y máquinas para tejer. Construir una sociedad sostenible en el tiempo implica limitarse a tales tecnologías, o ¿existen aplicaciones de la computación que compensen suficientemente su costo en energía y en recursos para mantener un nivel alto de desarrollo en tal área?

Soy de la opinión que mantener alguna forma de capacidad computacional avanzada tiene ventajas que sobrepasan parcialmente los inconvenientes de su costo, incluido en una sociedad que pretende mantenerse en el tiempo en un ámbito finito como un planeta, por escalas de tiempo largas. Sin pretender dar una solución global y simple a los problemas sociales y climáticos que enfrenta la humanidad (es probable que tal solución no exista), describo a continuación algunos ejemplos de proyectos en cuyo desarrollo creo que las ciencias de la computación pueden ser clave, al punto de compensar su alto costo energético y material.

El mundo virtual al servicio del mundo real

Una de las raíces de los problemas que la humanidad enfrenta en el tiempo presente, es la dificultad de proyectarse en tiempos futuros más o menos lejanos. Como individuos, se documentó la dificultad de planificar a más de diez años, pero las sociedades humanas no parecen tener una visión de futuro a un horizonte mucho más lejano. Si los científicos predijeron algunos de los problemas actuales hace más de cincuenta años (usando herramientas informáticas ya), y lograron influir en algunas de las políticas de desarrollo social, no pudieron evitar tales problemas, en gran parte por la dificultad de comunicar y convencer sobre el resultado de sus estudios.



La computación puede ayudar a resolver dicho problema de comunicación, además de tener un rol en llegar a tal conclusión. Una simulación en un entorno virtual permite *acelerar el tiempo* para poder visualizar el futuro lejano, permite *cometer errores sin pagar su costo* para poder visualizar las consecuencias de sus acciones y, de manera más general, *experimentar a costo más bajo* que en el mundo real.

En el proyecto “Easy-Permaculture”, se propone diseñar, desarrollar y validar un simulador simplista que entregue a un estudiante de permacultura, una etapa intermedia entre la adquisición de conocimientos en cursos teóricos (viendo cápsulas de videos o leyendo textos) y poner en práctica tales conocimientos en el mundo real, en un terreno real y con condiciones geográficas reales. Aparte de decidir si el costo de tal simulación es más bajo o no que el de experimentar en un terreno real, el hecho de recurrir a una simulación tiene algunas ventajas claves como poder controlar el paso del tiempo y reducir o suprimir el costo de cometer errores.

El control del tiempo en una simulación se puede usar de varias maneras, tanto para acelerar las cosas como para hacerlas más lentas. Mostrar de manera más lenta mecanismos físicos como el movimiento del agua, permite entender mejor sus turbulencias y desarrollar mejores sistemas de riesgos. Acelerar el tiempo permite mostrar a un estudiante las consecuencias de decisiones de diseño años después de su implementación, o los efectos acumulados de acciones recurrentes sobre un periodo de tiempo prolongado. En el mundo real, el éxito o fracaso de un diseño de permacultura se puede observar después de varios meses en el mejor caso, y años (plantas), decenas (plantaciones de árboles) o centenarios (establecimiento de poblaciones animales) ¡en muchos casos!

El entorno virtual reduce tanto el costo de cometer errores, que permite en

algunos casos pedirle a un estudiante que los cometa a propósito, de manera de visualizar las consecuencias, en vez de confiar en el conocimiento teórico al respecto. Existen muchos ejemplos de prácticas que ahora sabemos se deben evitar, y que no se permiten repetir a alumnos y alumnas. Por ejemplo, algunas civilizaciones regaron sus plantaciones con agua de mar: tal estrategia resultó exitosa a corto plazo, pero dejó el suelo inutilizable para el cultivo a largo plazo. Se argumenta que la deforestación intensiva permitió aumentar la producción agrícola desde la revolución industrial, una ventaja cierta al corto tiempo, pero con el costo de una destrucción catastrófica de los suelos. Quizás las civilizaciones futuras pedirán a sus estudiantes reproducir los errores del pasado en un entorno virtual, para que eviten repetirlos en el mundo real...

Una razón particular para buscar mejorar la docencia en permacultura, es que en la época previa al uso masivo de energías fósiles, la agricultura necesitaba mucha mano de obra (2/3 de la población activa). Si la sociedad humana dejara de usar tales energías fósiles, mientras intenta mantener una población de un tamaño comparable al tamaño presente, se necesitaría no solamente un tipo de agricultura más eficiente (que utilice menos energía) y menos dependiente de los abonos externos (cuyas reservas se están acabando), sino también formaría de manera urgente una proporción importante de población para el trabajo en el campo, y sin depender de un cambio generacional demasiado lento por las circunstancias presentes.

Ciencias de la información al servicio de la comunicación

Aunque puede parecer contraintuitivo, la especie humana es una de las especies animales más colaborativas del planeta.

Mientras varios mamíferos viven y colaboran en rebaños de centenas de individuos y diversas especies de insectos viven en sociedades de miles de individuos, solamente los humanos interactúan en colaboraciones que involucran a millones de personas en lugares opuestos del planeta: desde el simple hecho que individuos no relacionados “colaboren” en compartir una autopista sin chocarse, hasta los millones de humanos involucrados en el envío de naves a otros planetas del sistema solar, tales colaboraciones resultan impresionantes.

Un nivel de cooperación más alto aún será necesario para resolver los desafíos presentes, y necesitará un gran nivel de comunicación, el cual no se podrá lograr sin automatizar una gran parte de las interacciones entre individuos y grupos de individuos, a través de herramientas computacionales. En el contexto de la agronomía en particular, la deriva climática necesitará mucho intercambio de recursos y de información entre zonas geográficas distintas, de una manera mucho más rápida de lo que ocurrió históricamente en sociedades humanas previas.

Bancos distribuidos de material genético

Los procesos con crecimiento exponencial son nada más que herramientas. No son sustentables de manera infinita en un mundo finito, pero se pueden usar de manera controlada para implementar cambios masivos en poco tiempo. El daño causado por crecimientos exponenciales (de consumos de materiales, consumos de energía, producción de materiales contaminantes, poblaciones), quizás, se podrá compensar o reparar, de forma parcial o completa, con otros procesos exponenciales. Unas pocas semillas son suficientes para “plantar” un nuevo ecosistema en el ámbito adecuado, a condición de saber cuáles semillas usar en cuál ámbito: manejar bancos de semillas y la información asociada sería muy difícil de realizar sin usar herramientas computacionales.



Además, en un entorno mucho menos estable de los que ha favorecido el crecimiento de las civilizaciones humanas previas, (re)construir ecosistemas resilientes a choques climáticos y ecológicos requiere maximizar su diversidad genética. Cuando la diversidad genética crece muy lentamente por procesos naturales, solo modelos computacionales avanzados pueden acelerar tal proceso, guardando trazas del origen de cada semilla o individuo y sugiriendo nuevas combinaciones para maximizar la diversidad resultante.

Para terminar, en un contexto donde el clima de cada región cambiará de manera muy rápida, el humano tiene un rol que cumplir en la diseminación de especies animales y vegetales de manera más consciente y más rápida de lo que pasa “naturalmente”. Tal tarea necesitará recursos computacionales para recolectar los datos disponibles e indexarlos, y necesitará simular los efectos de varias estrategias de manera de poder sugerir las estrategias de diseminación más efectivas [2].

Difusión de técnicas de Permacultura

Cuando los europeos intentaron invadir el continente africano, trataron de cultivar los cereales tradicionalmente exitosos en Europa, siendo un gran fracaso en las zonas ecuatoriales de África debido a que el clima no era apto.

Solamente en la zona sur del gran continente se logró cultivar tales cereales, y con ello las poblaciones humanas de ascendencia europea. De una manera similar, el especialista en Permacultura, Andrew Millison, describe la simetría de condiciones climáticas entre Oregón, en Estados Unidos, y la Región del Biobío en el sur de Chile, y la esperanza de poder traspasar técnicas de cultivo exitosas de una región a otra, que sean tradicionales o modernas.

Tradicionalmente, el traspaso de técnicas de cultivo ocurre de manera relativamente lenta: algunos individuos viajan de una región a otra, aprenden algunas técnicas, vuelven a su zona geográfica de origen y adaptan tales técnicas a las condiciones locales. En un contexto de cambio climático acelerado, sistemas informáticos para listar e indexar tanto las técnicas de cultivo como las condiciones geográficas en las que han tenido éxito serán esenciales para evitar un colapso completo de los sistemas de producción agrícola.

Conclusión

Desde los materiales utilizados para la construcción de los equipamientos computacionales, hasta la energía requerida para hacerlos funcionar [3, 4], las herramientas computacionales a las cua-

les nos acostumbramos en los últimos treinta años tienen un impacto grande sobre el planeta, que se deberá reducir en el futuro, “por la razón o la fuerza”, de manera autocontrolada si la sociedad implementa las políticas apropiadas, o de manera “natural” si las consecuencias negativas de tal desarrollo terminan de destruir los ecosistemas que sustentan a las sociedades humanas, las que tendrán que detener su desarrollo debido a las circunstancias.

Pero incluso antes de las amenazas de catástrofes y derivas climáticas, las sociedades humanas han desarrollado técnicas de colaboración a gran escala, dentro de las cuales las herramientas computacionales son claves. Desarrollar colaboraciones a escalas más grandes aún será clave para mantener civilizaciones en un planeta con un clima inestable. En el contexto de una deriva climática acelerada, este desarrollo se hace más urgente, y difícil de imaginar sin los recursos computacionales modernos.

Hemos descritos solamente algunos ejemplos de aplicaciones en los que tales desarrollos serán importantes o incluso claves: es nuestra esperanza que esto sirva de inspiración para que varios expertos en computación encuentren cómo aportar su “piedra” al edificio de una civilización humana más resiliente respecto a los cambios por venir, y capaz de proyectarse en el futuro en un periodo de tiempo grande. ■

REFERENCIAS

- [1] Makonin, S., Marks, L.U., Przedpelski, R., Rodríguez-Silva, A., and EIMallah, R. 2022. Calculating the Carbon Footprint of Streaming Media: Beyond the Myth of Efficiency. Eighth Workshop on Computing within Limits 2022, LIMITS.
- [2] Colliaux, D., Minchin, J., Goelzer, S., and Hanappe, P. 2022. Computational Agroecology: Should we bet the microfarm on it? Eighth Workshop on Computing within Limits 2022, LIMITS.
- [3] Aslan, J., Mayers, K., Koomey, J. G., & France, C. (2018). Electricity intensity of internet data transmission: Untangling the estimates. *Journal of Industrial Ecology*, 22(4), 785-798.
- [4] Shift Project (2018). Lean ICT- Pour une sobriété numérique. <https://theshiftproject.org/article/pour-une-sobriete-numerique-rapport-shift/>.



Entrevista a Reynaldo Cabezas y Pablo Garrido

Encargados de la Oficina de
Ingeniería para la Sustentabilidad
FCFM



Reynaldo Cabezas

Pablo Garrido

POR ANA MARTÍNEZ Y
FEDERICO OLMEDO



La Oficina de Ingeniería para la Sustentabilidad (OIS) de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile se creó el 2013, como un espacio de planificación, gestión y discusión de temáticas relacionada con la sostenibilidad dentro del quehacer de la FCFM. En la siguiente entrevista conversamos con Reynaldo Cabezas, jefe de la OIS,¹ y Pablo Garrido, ingeniero de proyectos de la Oficina, sobre algunas de las iniciativas que llevan adelante.

Presentación de la Oficina

Para quienes no conocen la Oficina, cuenténnos ¿cuándo nace, con qué propósito y cuáles son los principales ejes de acción?

Pablo: La Oficina de Ingeniería para la Sustentabilidad (OIS) se creó el 2013 en el contexto de suscripción a la certificación Acuerdo de Producción Limpia (APL). Su objetivo es, en síntesis, inculcar la cultura de sustentabilidad, y para ello trabajamos en cuatro líneas: fomentar la docencia enfocada en la sustentabilidad al igual que la investigación en sustentabilidad, vincularnos externamente, teniendo como punto de referencia el desarrollo sustentable y, finalmente la gestión del campus, que es donde más nos dedicamos.

En esa línea, ¿qué se entiende por “campus sustentable” y cuáles son sus principales desafíos?

Pablo: Cuando hablamos de campus sustentable, nos referimos a un campus que reduzca sus impactos y sea amigable con las condiciones futuras y presentes. En este sentido podemos pensar, por ejemplo, en la carbono-neutralidad, en disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, en fomentar la eficiencia energética y uso de energías renovables no convencionales, y en adaptar los espacios que tenemos para los efectos del cambio climático. Ejemplos

concretos de esto último serían adaptar la flora de tal manera que fuera de bajo consumo hídrico, o disminuir el impacto asociado a los residuos, reciclando o eliminando plásticos de un solo uso.

Reynaldo: Cuando uno habla de campus, normalmente piensa solo en la infraestructura, pero las personas que están en ese espacio —su cultura y buenos hábitos— también están consideradas en este concepto. No es solamente lo físico, sino que también incluye la parte humana.

¿Cómo ha influenciado su labor en la formación de los estudiantes?

Reynaldo: En los planes de estudios, se logró incorporar una competencia genérica nueva de sustentabilidad, que se trabajó desde el Área para el Aprendizaje de Ingeniería y Ciencias (A2IC) de la Escuela de Ingeniería, y después llegó a los departamentos. Ahora hay un trabajo de ver cómo bajarla en las distintas mallas e implementarla en los cursos.

Pablo: El giro de esta casa de estudios es la educación y, por lo tanto, debemos preparar a los estudiantes para el contexto actual de crisis climática y ecológica. Esto requiere acercarnos a docentes y a quienes planifican el foco de las distintas carreras. Por ejemplo, que ahora haya espacio para un minor en sustentabilidad es súper relevante. Y esto último es un trabajo que tiene sus propios desafíos porque no es fácil acercarse a un docente que lleva años haciendo su ramo de cierta manera para que incorpore estas problemáticas tan “nuevas”.

¿Cómo ha sido el rol de la comunidad al interior de la Facultad para construir esta cultura de sustentabilidad?

Reynaldo: Lo entretenido es que el impulso viene ¡ya! de los mismos estudiantes, de decir “queremos tener más de esto, hemos averiguado estas cosas y nos gustaría que se empiecen a implementar”. El desafío ahora es cómo llegar a los/as académicos/as, y los/as funcionarios/as.

Pablo: Han pasado algunos años desde que estudié acá, y en ese entonces derechamente no existían ramos relacionados con sustentabilidad; había un par sobre medioambiente en el Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología, pero éramos dos personas y en la Facultad no se hablaba del tema. Ver la cantidad de cursos que ahora están relacionados con el desarrollo sustentable y cómo se ha incorporado el tema es un cambio impresionante.

¿Existe algún tipo de colaboración con el resto de la Universidad?

Reynaldo: Hasta ahora, cada facultad ha venido avanzando por su línea. Las oficinas que partieron originalmente fueron en la Facultad de Economía y Negocios (FEN) y en Beauchef, y se han sumado otras, por ejemplo, en Veterinaria y en Agronomía. Sin embargo, en 2018 se creó el Comité por la Sustentabilidad a nivel Universidad de Chile, y se está generando una estructura de sustentabilidad a nivel de toda la Universidad; de hecho, el secretario ejecutivo original

¹ Nota de la redacción: Al momento de realizar esta entrevista, Reynaldo Cabezas se desempeñaba como jefe de la OIS (FCFM). El 1 de septiembre dejó ese cargo para asumir como secretario ejecutivo del Comité por la Sustentabilidad de la Universidad de Chile.



se fue y en septiembre asumo yo ese cargo. Entonces ahora sí hay esfuerzos para que la sustentabilidad vaya a nivel Universidad de Chile y para que todas las facultades vayamos trabajando al mismo tiempo.

Algunas iniciativas emblemáticas

¿Pueden contarnos más acerca del APL?

Reynaldo: La Universidad en sí tiene varios acuerdos y la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas se ha sumado a algunos, entre ellos el Acuerdo de Producción Limpia (APL) que partió en enero de este año. Estos APLs se gestionan a través de la Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático, y para ello normalmente se conforma una especie de “gremio” que solicita una certificación que diga “yo produzco de forma limpia”. En instituciones de educación superior suena algo extraño decir “producir”, porque no estamos en una fábrica, pero sí se genera, por ejemplo, producción científica. En nuestro caso este APL se lo llevó la Red Campus Sustentable —gremio que nuclea diferentes instituciones de educación superior—, y tiene diferentes líneas de trabajo: vinculación, gestión, cultura, academia y gobernanza. Este primer año es más que nada de diagnóstico para ver cómo estamos en temas de gestión, y el objetivo para los próximos años es diseñar los planes, implementarlos y trabajar en otras líneas como programas de inducción y formación de académicos y académicas en temas de sustentabilidad.

¿Tienen alguna otra iniciativa relevante que nos quieran contar?

Pablo: Todas las iniciativas que les voy a mencionar están de alguna manera ligadas al APL. La primera tiene que ver con fomentar las energías renovables no convencionales, y consistió en



Crédito: Comunicaciones FCFM

Figura 1. Terraza solar ubicada en el Edificio Oriente del campus Beauchef de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.



Figura 2. La campaña "Sustentabilidatos" comprendió 100 publicaciones relacionadas con cambio climático, biodiversidad y energías renovables, entre otros temas.



Figura 3. Uno de los proyectos más importantes impulsados por la OIS es la gestión de residuos a nivel de Facultad, iniciativa conocida como ReBeauchef.

la construcción de una terraza solar en el Edificio Oriente de Beauchef 851 (ver Figura 1), utilizando una tecnología de energía fotovoltaica integrada al edificio (BIPV en inglés). Básicamente es una terraza de dos aguas —piensen en un invernadero—, donde las dos aguas en el techo son los mismos paneles que generan la electricidad. Los paneles cumplen una doble función: generar electricidad y ser parte de la misma estructura.

Otra iniciativa tiene que ver con lo que hacemos a nivel de comunicación científica y vinculación. Durante la pandemia realizamos la campaña “Sustentabilizados” en redes sociales (ver Figura 2). La idea fue tomar publicaciones o documentos del Estado que se veían complejos de entender, y traducirlos a un lenguaje común y corriente, para llegar a más gente. La campaña fue todo un éxito, llegando a cien publicaciones relacionadas con

cambio climático, biodiversidad, energías renovables, impacto asociado al transporte y a sistemas alimentarios, etc.

Por último, otra gran iniciativa que tenemos acá es la gestión de residuos. Consistió en estudiar, diseñar e implementar un sistema de gestión de residuos a nivel Facultad, el cual ahora se conoce como ReBeauchef (ver Figura 3). Para que se hagan una idea, a la fecha llevamos alrededor de 145 toneladas de residuos valorizados, clasificándolos en distintas categorías. La más masiva, que genera el 40% de los residuos totales, son los llamados residuos no peligrosos (papel, cartón, vidrios, latas, aluminio, tetra pack, plásticos, etc.). Dada la naturaleza de la Facultad, las corrientes principales dentro de esta categoría son el papel y el cartón. Luego le sigue la familia de los residuos orgánicos, con alrededor del 30% de la valorización histórica. Ahí trabajamos en distintas subcampañas: con el casino, las cafeterías, el área de Jardines y Paisajismo y, por último, el programa domiciliario de segregación de residuos orgánicos. El tercer grupo lo forman los residuos electrónicos, que corresponden a alrededor del 20% del total, y el último grupo es el de los residuos peligrosos, que trabajamos principalmente con unidades como Infraestructura, Mantenimiento, que hacen el recambio de, por ejemplo, luminarias y aire acondicionado.

Volviendo a la parte de residuos electrónicos, el 20% de esta valorización histórica lo hemos acopiado en doce días, en las reciclaciones e-Waste que organizamos hace ya unos años.

Reciclaciones e-Waste

¿Pueden contarnos sobre las reciclaciones?

Pablo: Llevamos ya cuatro reciclaciones (2016, 2017, 2018 y 2021). La del año



pasado fue la más exitosa en términos de la gente que participó y de los kilogramos que recolectamos, superando las 10 toneladas en tres días. Entre las cuatro llevamos alrededor de 30,5 toneladas (ver Figura 4).

Reynaldo: Son los días jueves, viernes y sábado. El sábado está pensado para la gente “externa”, gente que durante la semana está trabajando y el fin de semana puede venir y dejar sus cosas. El sábado es bonito porque llegan muchas personas y comienzan a preguntar “*tengo esto en la casa*” y empezamos a ver “*esto no, esto sí*” y se realiza todo un trabajo más en detalle.

Para contextualizar mejor estos números, ¿tienen cifras de cuánto residuo electrónico estamos generando (y reciclando) a nivel mundial?

Pablo: En el mundo se generan, en promedio, 7 kilos de basura electrónica per cápita por año. A nivel regional, en Latinoamérica, Chile es el tercer generador de basura electrónica per cápita, detrás de Costa Rica y Uruguay, con —creo— 11 kilos. Y esto no es coincidencia dado que la tasa de generación de residuos está correlacionada con el PIB per cápita: a mayor PIB, mayor consumo, y a mayor consumo, mayor generación de residuos.

De la chatarra electrónica generada a nivel mundial, cerca del 20% es aprovechada. Este es un tema súper curioso, porque hoy en día se hacen inversiones gigantes a nivel de minería (abrir la tierra, mover maquinaria pesada, refinar los minerales, etc.) y, sin embargo, en los mismos desechos electrónicos tenemos una fuente de minerales súper valiosa. A esta extracción de minerales a partir de desechos se la conoce como “minería urbana”, y por supuesto, tiene un montón de ventajas a nivel ambiental (y económico también).



Figura 4. Más de 30 toneladas de residuos electrónicos se han recibido en las recicladores e-Waste.

Volviendo a las reciclaciones, ¿qué hacen con los residuos electrónicos que reciben?

Pablo: Para empezar, hay una parte, por ejemplo, baterías de plomo-ácido, pilas y toners, que son residuos especiales y van a rellenos de seguridad. Pero la mayor parte de lo que recibimos va a reciclaje o a reacondicionamiento. El que lleva a cabo estas tareas es nuestro partner Chilenter, una fundación perteneciente al Estado que se encarga de fomentar la economía circular.²

¿Y qué es lo que hacen con los artículos electrónicos? Si están de cierta manera “buenos”, se formatean, se les instala software, se cambian componentes como la memoria RAM, y se donan a instituciones a lo largo de Chile, generalmente colegios o establecimientos educacionales aislados o en zonas rurales, centros de adultos mayores, centros de emprendimiento, etc. Si los equipos no están en buen estado, se separan los distintos componentes: los

que tienen metales u otros compuestos peligrosos van a rellenos de seguridad, y los que tienen algún tipo de valor (por ejemplo, por contener cobre o plata, como las tarjetas madres) se van a reciclar. Dependiendo del componente en cuestión, ellos tienen sus propios *partners* con los cuales reciclan. De esta manera se van recuperando estos materiales y se van incluyendo nuevamente en ciclos de vida.

Reynaldo: Ellos están preocupados, de alguna manera, de valorizar todo el material que reciben: si llegan cajas, estas se van también a reciclar, si llegan cosas con plumavit, también están viendo un acuerdo para gestionar la plumavit. El enfoque que tienen no es solo en los equipos electrónicos, sino del ciclo completo.

El reciclaje puede verse como una medida “reactiva”, es decir, se realiza cuando la chatarra electrónica ya está ahí. ¿Hay algo que se pueda hacer de manera más “proactiva”, para evitar o

2 Ver artículo “Fundación Chilenter y la ruta que busca la circularidad de los electrónicos con fin social”.



disminuir la producción de chatarra en sí? Por ejemplo, los fabricantes de celulares podrían diseñarlos pensando en facilitar su reparación.

Pablo: Soy de la idea de que lo que mencionas tiene que ver finalmente con la economía circular, con tener la opción de que si algo se te echa a perder, poder repararlo o reutilizarlo. Acá hay otro concepto bien interesante, que es el de la migración de los productos a los servicios: yo lo que quiero es *hablar* por celular, no *necesito* un celular. De la misma manera, no necesito que haya una lavadora en cada departamento de mi edificio, necesito un servicio lo suficientemente organizado para que yo siempre pueda tener mi ropa limpia. Pero para que esto funcione tiene que haber una infraestructura y tiene que haber, sobre todo, acceso a servicios que sean capaces de integrar conceptos como la reparación, el reacondicionamiento, y el reciclaje. En clase siempre doy el mismo ejemplo: si uno camina por la calle —digamos el centro— la manera que tenemos de adquirir un producto es muy fácil, hay mucha infraestructura para ello, pero no hay infraestructura para ver qué hago con esos productos, dónde los entrego.

A nivel personal, también se pueden hacer esfuerzos: si mi celular no está tan malo, no es necesario que lo cambie por completo, lo puedo reparar o cambiar solamente una pieza, o de repente simplemente no necesito cambiarlo.

Reynaldo: Hay que darle también más oportunidades a los equipos reacondicionados. Cuando uno quiere comprarse algo, suelen estar “el nuevo” y “el reacondicionado”, y de repente el reacondicionado es harto más barato, pero a uno le da ese miedo de “¿me durará lo mismo?”, “¿vendrá bien?”, “¿fallará al tiro?”. Yo tuve uno y nunca me di cuenta que era reacondicionado. Hay un tema de cultura que tenemos que cambiar...

¿Qué evaluación hacen de la reciclación?

Pablo: Es harta pega, agotadora, pero es un evento al que le tenemos un tremendo cariño, nos motiva bastante... trabajamos con las y los estudiantes, y la pasamos muy bien. Es un evento que ha ido escalando, en la primera reciclación recolectamos 9,8 toneladas y eso fue por una situación bien particular de que en la Facultad aprovecharon de vaciar las bodegas de todos los equipos viejos que estaban almacenando.

Reynaldo: Se podía hacer un museo con todas las cosas que llegaron.... Las siguientes reciclaciones fueron un poquito menos, pero cada vez es menos lo interno y más lo externo.

¿Qué tan a la par o atrás estamos en comparación con otros países en temas de manejo de residuos?

Pablo: Han habido ciertos avances, por ejemplo, está la Ley de Responsabilidad Extendida del Producto (Ley REP) que se aprobó en el segundo Gobierno de Michelle Bachelet. Su concepto es simple: quien contamina, paga. Estamos apuntando directamente a quienes producen o importan ciertos residuos. ¿Qué residuos? Hay varias categorías: una tiene que ver con aceite y lubricantes, otra con neumáticos, otra con envases y embalaje, y otra con artículos eléctricos. Cada categoría está reglamentada por diferentes decretos. Todavía no está publicado el de los artículos electrónicos, pero finalmente las empresas que importen o generen artículos electrónicos a nivel de residuos van a tener que financiar sistemas de gestión que se hagan cargo de la correcta valorización de los residuos.

Reynaldo: Para comentar un tema entretenido... con lo electrónico seguro va a pasar algo similar a lo que está pasando con los neumáticos, que las empresas que venden autos dijeron “yo no me hago cargo, si yo vendo autos, no neumáticos”.

Pero como no puedes vender un auto sin neumáticos, entonces los obligaron a hacerse cargo también.

Reflexiones finales

Finalmente, ¿qué pequeñas acciones les recomendarían a las personas para transitar hacia el camino de ser una sociedad más sustentable?

Reynaldo: Una acción transversal es informarse y capacitarse, entender cuáles son los impactos de las cosas que uno realiza día a día. Esto está muy relacionado con lo que les decía antes: no creo que la gente quiera hacer las cosas mal por hacerlas mal, sino porque desconoce que lo está haciendo mal y no sabe cómo hacerlo mejor.

Pablo: A nivel personal, una de las grandes medidas que uno puede tomar tiene que ver con la planificación, por ejemplo de cómo nos alimentamos... hay dietas que son más o menos intensas a nivel climático, y también más o menos intensas respecto al uso de espacio. También estoy hablando de la planificación de cómo nos desenvolvemos en el día a día: cómo nos transportamos, cómo utilizamos la energía, y cosas así. Esas son algunas de las acciones que me gustaría mencionar más allá de reciclar.

¿Algo más que quieran destacar?

Reynaldo: Contarles cómo está conformada la Oficina. Yo estoy a cargo hasta el 31 de agosto; Pablo es responsable de la gestión de residuos y la parte de proyectos en general; está Nathalie Viedma que es asistente administrativa; Macarena Cerda que es diseñadora gráfica y nos apoya con la parte de comunicaciones, y Jessica Cabello que es la responsable del reciclado en el centro de acopio. ■



Fundación Chilenter y la ruta que busca la circularidad de los electrónicos con fin social



MATÍAS GONZÁLEZ PACHECO

Ingeniero Comercial por la Universidad de Chile. Actualmente es Director Ejecutivo de la Fundación Chilenter. Posee experiencia en el sector público, privado y académico. En el sector público, durante el segundo Gobierno de la Presidenta Michelle Bachelet, se desempeñó como coordinador de Marca País en la Fundación Imagen de Chile. En el ámbito privado ha trabajado en empresas chilenas y transnacionales, ocupando cargos gerenciales; los últimos años trabajó en empresas especializadas en tecnología y logística tales como Equifax y FedEx. Como académico, ha impartido clases en la Universidad San Sebastián y Universidad de las Américas. Además, se ha dedicado a la consultoría en temáticas relacionadas con gestión de empresas, gestión de personas y comunicación.

✉ matias.gonzalez@chilenter.cl

🐦 [@mati_gonzalez](https://twitter.com/mati_gonzalez)



RESUMEN. Durante los últimos tres años el término *economía circular* ha tomado considerable relevancia dado las legislaciones con respecto al tratamiento de residuos que se han ido presentando y estableciendo dentro y fuera del país. ¿Pero, entendemos realmente en qué consiste la economía circular y cómo los residuos electrónicos toman un rol relevante?

Los procesos de economía lineal quedaron obsoletos y en el contexto actual que vivimos es sumamente importante entender que el diseño de producción tradicional ya no es una opción. El pretratamiento que consiste en la valorización, reacondicionamiento y reciclaje de electrónicos para fomentar procesos de economía circular que se han convertido en el presente, es la opción real para crear un entorno más sustentable. Sin olvidar, que casos de éxito como el de Fundación Chilenter demuestran que sí es posible crear procesos circulares que tengan un real impacto social en las comunidades.

Todos somos generadores de residuos electrónicos

Seguramente la mayoría de los lectores que están en este momento revisando este artículo, son acumuladores de distintos tipos de residuos eléctricos y electrónicos sin tan solo tener la más mínima idea del porqué lo son.

Ese primer computador donde dieron sus primeros pasos en el mundo de la tecnología, esos cables acumulados, esa primera consola de videojuegos con la que se creó un lazo afectivo por los especiales e interactivos momentos vividos, la



Crédito: Chilenter.

Figura 1. Todos somos generadores de distintos tipos de residuos electrónicos.



Crédito: pixabay.com.

Figura 2. Es importante hacer la diferencia entre los aparatos eléctricos y los electrónicos para tener claro qué tratamiento se les debe dar a la hora que caduque su vida útil.

colección de celulares (desde ese primer modelo hasta el último teléfono inteligente que salió al mercado), o ese televisor antiguo que un día dejó de encender pero que no tienen certeza de qué hacer con él, porque basura convencional no es...

Pues todas estas señales, querido lector, lo integran a usted junto a millones de chilenos, en la alarmante cifra que indica que cada habitante del país produce anualmente 7,9 kilogramos de residuos electrónicos al año (ver Figura 1). Más adelante indagaremos en cifras de índole local y cómo desde Chilenter proponemos alternativas para transformar este material despreciado en tecnología apreciada y útil.

Artículos eléctricos versus artículos electrónicos. ¿Cuál es la diferencia?

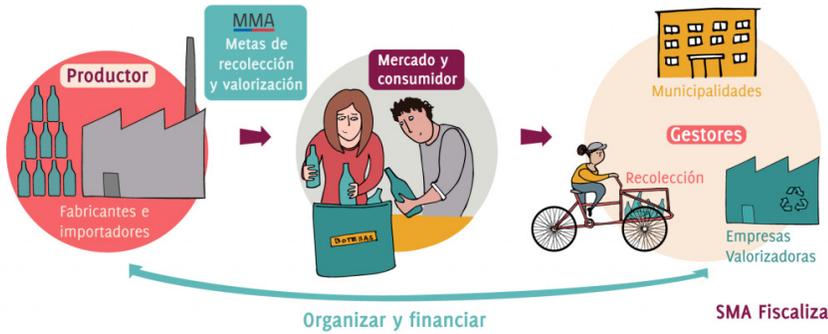
Aunque la mayoría de las personas tienden a referirse a los artículos eléctricos y electrónicos de la misma manera, hay una diferencia importante entre ellos que es fundamental tener en cuenta (ver Figura 2).

Se puede definir como *aparatos eléctricos* a todos aquellos que, para cumplir sus tareas, se aprovechan de la energía



ASÍ FUNCIONA LA LEY DE RECICLAJE

Ministerio del Medio Ambiente



Crédito: Ministerio del Medio Ambiente.

Figura 3. Así es el esquema de la Ley REP.

que aporta la corriente eléctrica. El ejemplo más claro de un aparato eléctrico es una lámpara, que transforma la energía de la corriente en luz y calor a través de una ampolla. También podríamos poner como ejemplos las estufas que transforman la energía en calor o, en el mismo caso, un refrigerador.

Mientras que los *aparatos electrónicos* son aquellos que, formados y contruidos por múltiples circuitos electrónicos, utilizan la corriente eléctrica para realizar operaciones con un nivel más alto de complejidad. Los aparatos electrónicos también pueden servir como baterías para funcionar durante cierto tiempo sin estar conectados a la corriente. Un ejemplo de estos puede ser un notebook, una tablet o un celular.

Todos estos Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE) cuando dejan de funcionar, culminan su vida útil o simplemente son desechados por su dueño, pasan de ser AEE a transformarse en Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE). Un porcentaje importante de los RAEEs contienen, tanto residuos peligrosos como también residuos que pueden ser valorizados posteriormente mediante economía circular.

Cifras y marco normativo: un diseño real para apoyar políticas medioambientales

Según cifras de la Universidad de las Naciones Unidas publicadas en el Monitoreo Regional de Residuos Electrónicos para América Latina 2022 o "Regional E-Waste Monitor", anualmente llegan al mercado local 251.000.000 kilogramos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos, lo que se traduce a 13,4 kilogramos de estos aparatos por habitante.

De estos, se recogen 7.000.000 kilogramos al año, lo que es igual a 0,4 kilogramos por habitante. Apenas un 4,7% de los residuos generados.

Todo esto llega a una cifra de 149.000.000 kilogramos de Residuos Eléctricos y Electrónicos producidos al año, lo que equivale a decir que cada habitante del país produce 7,9 kilogramos de RAEE al año.

Y gran parte de estos componentes y RAEEs se encuentran en nuestros hogares. En cajoneras, bodegas y hasta de-

bajo de la cama. Acumulando espacio y no teniendo ningún aporte medioambiental. Esto sin contar el gran porcentaje de elementos que terminan en destinos desconocidos y que dependiendo de las condiciones de acopio en que se encuentren, pueden dañar gravemente el entorno que los rodea.

Sin olvidar, ni devaluar que un manejo inadecuado de los residuos electrónicos puede generar la liberación de sustancias peligrosas como metales pesados que puede ocurrir durante su transporte, desarme, trituración, almacenamiento, bodegaje o disposición final inadecuada. Algunos de estos residuos electrónicos también contienen Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPs).

Ley N° 20.920 de Responsabilidad Extendida al Productor y Fomento al Reciclaje (Ley REP)

El principal marco legal normativo en Chile que incorpora a la gestión y tratamiento responsables de los Residuos Electrónicos es la Ley N° 20.920 o Ley de Responsabilidad Extendida al Productor y Fomento al Reciclaje (Ley REP), que en 2016 entró en vigor.

Esta Ley impone las reglas del juego para una correcta gestión ambiental de distintos residuos (ver Figura 3).

La Ley REP define seis productos que se consideran prioritarios y los mismos serán sometidos a regulación. Estos productos son los siguientes: aceites lubricantes, baterías de automóvil, Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE), neumáticos, baterías pequeñas, y envases y embalajes.

Esta Ley tiene por objeto "disminuir la generación de residuos y fomentar su reutilización, reciclaje y otro tipo de



valorización, a través de la instauración de la responsabilidad extendida del productor y otros instrumentos de gestión de residuos, con el fin de proteger la salud de las personas y el medio ambiente”, según explica la propia Ley.

Con respecto a los AEE, se estima que durante 2024 entre en vigencia para estos componentes y que para 2026 comiencen a regir las metas de recolección.

Economía circular como un proceso de necesidad actual

Al principio de este texto dejamos claro que el diseño tradicional de *economía lineal* ya está obsoleto. Ser sustentables medioambientalmente implica más que la producción tradicional, sino comenzar a pensar en la reutilización de recursos. Y antes de explicar ambos modelos, daremos un claro ejemplo de por qué es necesario comenzar a implementar procesos de economía circular para todo tipo de componentes.

El 28 de julio de este año se celebró el *Overshoot Day* o Día del Sobregiro, y tal como lo explica el Fondo Mundial para la Naturaleza (nombre oficial en Estados Unidos y Canadá es *World Wildlife Fund* –WWF–), esa fue la fecha en la que agotamos todos los recursos naturales que estaban destinados a cumplir la necesidad de todo un año.

Al nivel de producción versus el consumo que tenemos hoy en día, bastaron tan solo 208 días para consumir todos estos recursos. *Global Footprint Network*, organización encargada de contabilizar la huella ecológica, midiendo el impacto de nuestro estilo de vida en el planeta, aseguró que este año igual que en 2018 han sido los periodos en los que de manera más rápida hemos consumido los recursos de todo un año.

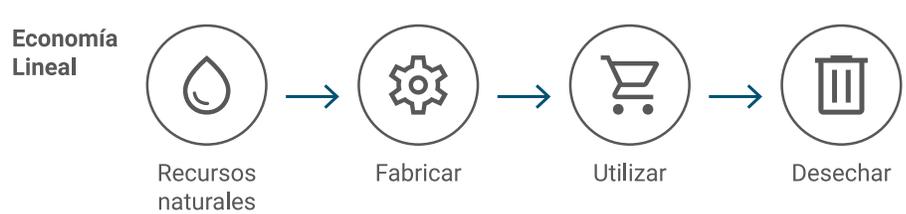


Figura 4. Así funciona el modelo clásico de la economía lineal.



Figura 5. Diseño de economía circular que utilizamos en Fundación Chilenter.

Ahora que sabemos por qué existe urgencia en el tema, podemos pasar a explicar en qué consisten los modelos de economía lineal y circular.

El proceso de *economía lineal* (ver Figura 4), el cual consideramos que se encuentra discontinuado y en obsolescencia, es un procedimiento en el que se utilizan distintos elementos para fabricar un producto, y después del uso o fin de la vida útil de este, se desechan algunas partes, por ejemplo, los envases o el embalaje en el que recibimos algunos de nuestros productos.

El destino final de algunos de estos productos en economía lineal es la incineración o vertederos. Por lo mismo, el diseño de economía lineal además de estar obsoleto no es nada amigable con el medio ambiente.

Economía circular: la vía de la reutilización

El *diseño o proceso de economía circular* (ver Figura 5) se basa en las famosas



tres erres (3R) medioambientales: reducir, reutilizar y reciclar.

Para este diseño se tiende a minimizar el uso de recursos (reducir), se maximiza la reutilización de productos y piezas (reutilización) y, por último, pero no menos importante, las materias primas se reutilizan (reciclan) con un alto estándar. A diferencia de la economía lineal, el diseño circular es medioambientalmente amigable.

Para materializar procesos de economía circular hay que tomar en cuenta qué actores individuales son tan importantes como los empresariales, públicos o corporativos. Es decir, un generador común o persona individual puede aportar con los productos que consume. Desde una separación por residuos hasta la entrega de las mismas empresas que se encarguen de reutilizar los mismos y de ofrecer un destino final seguro y sustentable.

Fundación Chilenter: el diseño de economía circular que da vida a los RAEEs

Un caso de éxito en Chile que pone en práctica el diseño de Economía Circular basado directamente en los residuos electrónicos es el que se ha encargado de hacer durante los últimos veinte años Fundación Chilenter.

Chilenter es una Fundación de derecho privado, sin fines de lucro, creada en el año 2002, que nació de la necesidad de acortar la brecha digital en Chile y apoyar la apropiación tecnológica a lo largo del país.

En un principio, la misión de la Fundación consistía en recibir electrónicos computacionales desde escuelas y corporaciones para refaccionar equipos y enviarlos nuevamente a escuelas y or-

El 28 de julio de este año se celebró el Overshoot Day [...] Esa fue la fecha [...] en la que agotamos todos los recursos naturales [...] destinados a cumplir la necesidad de todo un año.



Crédito: Chilenter

Figura 6. Fundación Chilenter recibe electrónicos computacionales para darles una segunda vida útil.

ganizaciones sociales que tuviesen la necesidad de tecnología.

En 2009, la labor de la Fundación muta y se crea la línea de Valorización y Pretratamiento de Residuos Electrónicos. Esto por una necesidad sencilla. Una cantidad importante de RAEEs acumulados en planta que tienen la necesidad de ser tratados, valorizados y reciclados bajo condiciones seguras y con procedimientos que cumplieran el marco legal establecido hasta la época.

La circularidad de los electrónicos en Chilenter

A diferencia de la economía lineal, Chilenter plantea un diseño de economía circular puro. El diseño y el proceso que

ha ido afinando la Fundación consiste en la recepción de residuos electrónicos computacionales por parte de empresas privadas, organizaciones públicas y personas particulares (ver Figura 6).

Luego que los componentes llegan a Chilenter se ingresan en sistema y se dividen en dos líneas: los reacondicionables y los reciclables.

La línea de residuos reacondicionables va destinada a la revisión y recuperación de pantallas, desktops, notebooks y CPUs. Cada uno de estos componentes son separados, etiquetados y revisados para luego hacer seguimiento sobre su estado. Mientras que los que van a la línea de reciclaje los valorizamos a nivel nacional y también internacional donde realizan procesos de *minería urbana* para la extracción de metales preciosos desde circuitos electrónicos.



El proceso de economía circular se basa en las famosas tres erres medioambientales: reducir, reutilizar y reciclar.

Los procesos propios de Chilenter en torno al reacondicionamiento consisten en la recuperación, o mejor dicho ensamblaje de computadores, partiendo por la utilización de partes y piezas de equipamiento computacional desechadas por los actores ya mencionados (ver Figura 7).

Todos estos componentes pasan a un Laboratorio de Electrónica donde son utilizados para armar un nuevo computador. Esta línea también incluye un proceso propio de Destrucción Segura de Activos Estratégicos o Borrado Seguro de Información.

Para dar valor al concepto de reutilización y poder reutilizar discos duros entregados a Chilenter se tuvo que idear un proceso utilizando un software que destruye la información inicial del disco duro, dejándolo totalmente saneado para incluirlo en un equipo (desktop, notebook o *all in one*) que será destinado a un establecimiento educacional u organización social.

Otro aspecto instalado en Chilenter y que toma relevancia con respecto a la circularidad de los residuos es el concepto de *trazabilidad*.

Cada nuevo equipo ensamblado y que tendrá como destino una escuela en cualquier parte de Chile, tiene el atractivo y singularidad que es ensamblado por partes y piezas de hasta ocho empresas distintas, es decir, las partes, piezas y componentes entregadas por distintas organizaciones son utilizadas en esta parte del proceso para armar este producto final.



Crédito: Chilenter.

Figura 7. Línea de valorización y desarme de Fundación Chilenter.



Crédito: Chilenter.

Figura 8. Director ejecutivo de Chilenter y Karol Labrín del equipo Chilenter, hacen entrega de computadores reacondicionados a colegios rurales de Melipilla.

Cuando hablamos de economía circular es fundamental que se conozca el destino final de lo que se promete será utilizado en la línea de “reutilización” del proceso. Dado esto, bajo un sistema propio, utilizamos este concepto de trazabilidad donde podemos asegurar

qué pasó con los residuos reutilizados y cuál fue su destino final.

Para Chilenter la economía circular es un diseño que forma parte de su ADN, al cual ha ido sumando aristas para cumplir con su misión. El *impacto social* es



una de ellas. En veinte años de vida la Fundación Chilenter ha entregado más de 113 mil computadores reacondicionados a escuelas y organizaciones sociales de todo Chile (ver Figura 8), lo que se traduce también en 99.979 toneladas de CO₂ Equivalente que dejan de emitirse al medio ambiente.

Con el fin lograr un diseño de economía circular completo, Fundación Chilenter incluyó en sus líneas de trabajo una gama de propuestas que no solo incentivan la correcta gestión de residuos, sino también impulsa mediante algunas de ellas, políticas educativas para normalizar y sensibilizar sobre temas medioambientales aún desconocidos. Algunas de estas políticas son:

- **Retiro de residuos electrónicos.** Desde Chilenter gestionamos y coordinamos el retiro de los residuos electrónicos (RAEEs) en las dependencias de los usuarios. La Fundación se encarga de toda la gestión logística y coordinación para el correcto retiro de los residuos y su posterior recepción y acopio. Eso incluye la correcta gestión y tratamiento de los residuos.
- **Instalación de puntos verdes.** Si una organización quiere comenzar a crear políticas de economía circular desde Chilenter los apoyamos. Podemos entregarles puntos verdes para ser insta-

En veinte años de vida la Fundación Chilenter ha entregado más de 113 mil computadores reacondicionados a escuelas y organizaciones sociales de todo Chile.

lados en sus dependencias para que cada colaborador pueda depositar o entregar sus productos o componentes electrónicos dados de baja, por ejemplo audífonos, cargador, celular, notebook, tablet, cables, entre otros.

En Chilenter también nos encargamos del retiro periódico de los componentes que van acumulando para darle el tratamiento adecuado.

- **Laboratorios digitales.** Este servicio consiste en que cualquier empresa u organización puede optar a adquirir computadores reacondicionados por Chilenter, los cuales cuentan con tests de calidad con los más altos estándares y garantía de seis meses, para que estos se entreguen o redireccionen a colegios u organizaciones sociales ubicados en cualquier lugar del país.

Con esto no solo se colabora con la comunidad en cuanto a disminuir brechas digitales, sino que también se genera un impacto medio ambiental que potencia la gestión sustentable de las empresas u organizaciones.

- **Talleres medioambientales.** La economía circular es un término que ha estado en boga en los últimos años y probablemente se tomará las agendas públicas, privadas y de gobiernos los próximos cien años.

En esta línea Chilenter ofrece diversos talleres con variadas temáticas donde se ahonda todo lo relacionado a economía circular y reciclaje de electrónicos.

Se exponen los procesos que se realizan en Chilenter y se complementa con una charla donde se aclaran todas las dudas de los participantes.

Este taller es adaptable a cualquier público (alumnos de colegios, colaboradores de empresa, etc).

El eslogan de la Fundación –Economía Circular con Fin Social– es solo una frase que demuestra que hacer y poner en práctica procesos circulares en el país es posible. Además de sumar distintos impactos, entre ellos, el apoyo social que para nosotros es fundamental. ■





Estudiantes DCC



En esta sección de la Revista estudiantes recientemente graduados del Departamento de Ciencias de la Computación (Universidad de Chile) nos cuentan, junto a sus profesores guías, sobre sus trabajos de memoria y/o tesis.



Tesis de doctorado

A Structural Analysis of Dictionaries as Semantic Networks

Estudiante: Camilo Garrido

Profesor guía: Claudio Gutiérrez



Después de titularme de ingeniero civil en computación en la Universidad de Chile y trabajar dos años en la industria, principalmente como ingeniero de software, no lograba sentirme cómodo siguiendo ese camino en el futuro. Buscando alternativas fui a conversar con Claudio Gutiérrez, quién fue mi profesor guía en el pregrado. Le mencioné mi intención de hacer un postgrado y me contó las diferencias entre un magíster y un doctorado, entre estudiar en Chile o el extranjero, las proyecciones y oportunidades después de terminar, entre otros datos que podrían ayudarme en mi decisión. Finalmente, sin estar del todo seguro, decidí aventurarme en hacer un doctorado.

Mi investigación se enfocó en el estudio de las redes de diccionarios lingüísticos. En los diccionarios, por ejemplo el *Diccionario de la Lengua Española* de la RAE, la definición de una palabra utiliza otras palabras y, recursivamente, estas otras palabras utilizan otras más para definirse. De esta manera, un diccionario puede ser visto naturalmente como una red. El objetivo principal fue analizar esta estructura de red para respaldar la hipótesis que las redes léxicas subyacentes son buenas fuentes de material para estudiar lenguaje natural y obtener valiosos resultados. Este trabajo apunta a formar parte de la base de cualquier teoría estructural de diccionarios y esperamos que este tipo de enfoque, como se sugiere en algunos ejemplos, ayude a los lingüistas a estudiar la relación semántica de las palabras. Es una guía de cómo abordar este tipo de redes: describe algunas de sus propiedades comunes, cómo se miden y por qué se cree que son importantes. Entre las características más relevantes de los diccionarios está que comparten una estructura de red común y que es distinta a otros tipos de redes como redes sociales, biológicas u otras. Además, analizando la evolución del dic-

cionario español a través de los años, desde 1925 al 2014, observamos que la incorporación y eliminación de palabras no afectan la estructura de la red. Los cambios son detectables en pequeñas vecindades, dándole a cada palabra una red de significados de sutil evolución. Estos dos puntos muestran que si en un diccionario reemplazamos las palabras por otros símbolos, podríamos darnos cuenta de que lo que estamos viendo es un diccionario pero no podríamos determinar cuál es el idioma original y menos el año de publicación.

Hacer un doctorado fue una gran experiencia y un vaivén de emociones que me permitió aprender mucho. Obviamente uno aprende mucho del área de investigación, pero lo que más rescató de la experiencia fueron las habilidades transversales que fui desarrollando en el camino. Por ejemplo, manejar mis tiempos y aprender a focalizar esfuerzos. Siempre van saliendo nuevas ideas que muchas veces hay que dejar de lado para poder avanzar. Otro ejemplo es lidiar con el rechazo y mantener la motivación. Seguir trabajando en un paper que te rechazaron después de estar meses preparándolo es duro. Como han dicho otros compañeros en esta revista, transmitir tus ideas y presentarlas de forma concisa y clara no es fácil. Es algo que se va ejercitando durante todo el doctorado, ya sea de forma escrita en un paper o de forma oral en una presentación.

Luego de haber terminado el doctorado, decidí no seguir un camino académico, pero no por ello alejado de la investigación. Ingresé a trabajar en la Dirección de Innovación y Transferencia del Instituto Milenio Fundamentos de los Datos, cuyo objetivo es generar y fortalecer lazos con organizaciones públicas y privadas que tengan requerimientos urgentes en materias relacionadas con datos.



Tesis de magister



Detección temprana de anomalías de un proveedor de plataformas de telecomunicaciones

Estudiante: Juan Andrés Calvo Rodríguez

Profesor guía: Nelson Baloian

Las herramientas de monitoreo son un gran apoyo a los equipos de Operaciones, ya que permiten vigilar la salud del sistema, detectando anomalías y realizando acciones que sin ellos solo dependerían del reclamo de algún cliente final. Cuando se producen reclamos por parte de clientes finales por algún producto o servicio, generalmente el problema que los provoca viene afectando la operación comercial por un tiempo considerable, lo que se traduce en una mala evaluación de la compañía de telecomunicaciones. Esto deriva en pérdida de tiempo y dinero para corregir la anomalía, arreglar información distorsionada por el problema, y por último también realizar acciones para recuperar la buena percepción de la compañía. Para evitar esto, en una compañía que brinda servicios de telecomunicaciones se diseñó una herramienta de monitoreo, de manera de alertar a un especialista para que revise la anomalía y realice las acciones correctivas o paliativas con anticipación.

Primero se revisaron implementaciones de monitoreo en el mercado, se realizaron entrevistas con especialistas y usuarios. El diseño incorporó indicadores necesarios para tener una idea de la salud general del sistema, muchos de estos indicado-

res sugeridos por los especialistas, que calculan manualmente cuando se reporta una incidencia y otros fueron considerados a partir de otras soluciones revisadas, como por ejemplo los indicadores de los servidores (CPU, ocupación de memoria, etc.). En el análisis del sistema se detectó concentración de datos en la dispersión de duración por cantidad de transacciones, lo que permitió verificar que es posible utilizar la distribución normal. Modelando los datos se observó concentración de valores no anómalos y también se advirtió que los datos anómalos se sitúan en el extremo de la gráfica. Se recolectaron datos y casos de incidencias (anomalías), algunas reportadas por los usuarios y otras que fueron encontradas por el Equipo de Soporte durante la preparación de informes cuando se buscó la causa raíz de un problema.

Se realizó análisis de estos datos calculando los indicadores de manera manual para validar que es posible encontrar anomalías a partir de dichos indicadores, se seleccionaron casos y luego, se implementó el algoritmo de detección temprana basado en distribución normal utilizando dos variables: cantidad de transacciones y duración promedio de dichas transacciones, y se simuló el comportamiento del sistema utilizando los respectivos grupos de datos, comparando resultados hallados manualmente y resultados generados por el algoritmo. Se observó que la implementación del algoritmo es capaz de detectar la primera anomalía del día, es decir alertar la anomalía lo antes posible (al menos doce horas antes que lo reporte una persona), de manera que el especialista cuente con más tiempo para analizar y realizar acciones de mitigación. La solución de monitoreo también contempló el diseño de una aplicación web, para mostrar resultados del monitoreo y acelerar el análisis; esta levantará alarmas cuando alguno de los indicadores pase el umbral de valores válidos, que estarán configurados, y también cuando lo informe el algoritmo de detección temprana.



Tesis de magister



Reconocimiento de entidades anidadas en diagnósticos de la lista de espera en hospitales públicos

Estudiante: Matías Rojas
Profesores guías: Felipe Bravo Márquez y Jocelyn Dunstan

El sistema de salud en Chile está dividido en dos grupos principales, el sistema público (FONASA) y el sistema privado (ISAPRES). En el sistema público, cuando un paciente quiere visitar a un médico especialista, primero debe acudir a una interconsulta con un médico de atención primaria. En esa interconsulta, se define si ese paciente debe o no ser derivado al especialista, lo que se maneja a través de la llamada lista de espera. Dada la alta demanda por especialistas, este sistema ha alcanzado un tiempo de espera promedio de más de un año, convirtiéndose en un problema importante a nivel nacional. En este contexto, la investigación realizada por Matías en conjun-

to con los profesores Felipe Bravo Márquez y Jocelyn Dunstan, propone lo siguiente:

Cuando el médico de atención primaria atiende a un paciente, se genera un texto no estructurado que contiene la sospecha diagnóstica, y que gracias a la ley de transparencia, se puede acceder públicamente. En estos textos se pueden encontrar palabras claves asociadas a enfermedades, medicamentos, hallazgos clínicos u otra información con relevancia clínica, y que debido a su naturaleza no estructurada, han sido poco estudiados. Dado esto, se desarrolló un modelo basado en inteligencia artificial que es capaz de reconocer automáticamente esta información, labor que no es sencilla incluso para los médicos especialistas. La creación de estos modelos permite, entre otras cosas, generar estudios epidemiológicos, determinar si alguna enfermedad puede ser tratada con telemedicina, obtener estadísticas sobre la lista de espera, o simplemente acelerar el proceso mediante el cual se analizan estos diagnósticos, considerando la alta demanda.

Este trabajo y sus aplicaciones han contribuido a la publicación de artículos científicos, el desarrollo de una plataforma para probar el modelo y la obtención del premio a los 100 Jóvenes Líderes por parte de la revista Sábado, destacando la importancia de esta investigación en el contexto nacional.

Memoria de pregrado



Gesture Coding: Diseño de un entorno de programación interactiva controlado por Joy-Cons

Estudiante: Emilio Lizama Castro
Profesor guía: Francisco J. Gutiérrez

Hoy en día, somos testigos de un auge en la exploración de nuevas formas para desarrollar el pensamiento computacional en niñas y niños. Tradicionalmente, el mecanismo preferido para acercar a los jóvenes a la programación, sobre todo a aquellos/as en edades tempranas (10-12 años), es a través de lenguajes de programación basados en bloques, como Scratch, Blockly, Snap! o App Inventor. La mayoría de estos lenguajes, si es que no todos, se basan en un paradigma de interacción tradicional de tipo *point-and-click* y escribiendo comandos e instrucciones con un teclado.

Aun cuando este tipo de mecanismos de entrada no representan problemas significativos de usabilidad en su adopción, reconociendo la diversidad en los modos de interacción contemporáneos vemos en este trabajo una oportunidad en explorar mecanismos novedosos para despertar el interés en desarrollar el pensamiento computacional y la programación en escolares. Para esto, se diseñó y desarrolló "Gesture Coding", una biblioteca de metáforas de interacción natural (es decir, gestos) junto a un entorno de desarrollo integrado (IDE). Estos dos utilizan como dispositivo de entrada Joy-Cons, controles de movimiento de la consola Nintendo Switch. En particular, con esta herramienta esperamos que controles de entrada interactivos, lúdicos y no tradicionales, reduzcan la barrera de entrada para un uso continuo, facilitando así la aceptación y apropiación del entorno de programación.

Para validar la usabilidad y funcionalidad del IDE desarrollado, se ejecutó una prueba de concepto. Los resultados mostraron que Gesture Coding es una alternativa novedosa, funcional, usable y considerada como divertida por parte de niñas y niños. Este trabajo presenta un primer acercamiento a diseñar un mecanismo que utilice metáforas de interacción natural para la enseñanza del pensamiento computacional en escolares.



Memoria de pregrado



Herramienta para análisis de programas desarrollados en Scratch

Estudiante: María José Berger
Profesora guía: Jocelyn Simmonds

El fomento del pensamiento computacional en niñas y niños se ha convertido en un tópico de interés mundial, dado los procesos cognitivos que promueve en las y los estudiantes. Las habilidades que desarrolla el pensamiento computacional refuerzan habilidades orientadas a la resolución de problemas, como el pensamiento crítico, la creatividad y la colaboración. En esta línea, desde el 2012, el grupo REACT (Rethinking Education by Advancing Computational Thinking) del DCC ha estado explorando estrategias y metodologías para introducir el pensamiento computacional en el aula.

Por ejemplo, REACT realiza talleres de desarrollo del pensamiento computacional para niños, niñas, adolescentes, profe-

sores y profesoras. En estos talleres, los participantes siguen actividades prácticas en las que adquieren los conceptos básicos de programación y desarrollan proyectos de software a pequeña escala utilizando Scratch. Si bien existen herramientas como Dr. Scratch, que permite realizar análisis de frecuencia del uso de instrucciones como una forma de evaluar las competencias logradas por el/la autor/a de un programa creado en Scratch, estas herramientas no incorporan la estructura de los programas en su análisis.

En este trabajo de título, se creó una plataforma para el análisis de programas en Scratch basado en su estructura. Dado que Scratch no posee especificación formal, esta plataforma también implementa un *parser*, lo que permite trabajar directamente con el Diagrama de Control de Flujo de un programa, en vez de su especificación en Scratch. Este diagrama representa todas las posibles vías de computación en un programa, y permite usar prácticas tradicionales de navegación de grafos y consultas de bases de datos para ejecutar análisis de programas en base a su estructura. La plataforma se implementó como una aplicación Web, que expone una API y una interfaz donde se cargan programas individual o masivamente para su análisis a enseñanza del pensamiento computacional en escolares.



BOOTCAMPS

Programa de Educación Continua
Departamento de Ciencias de la Computación
Universidad de Chile

Reinvéntate profesionalmente y alcanza nuevas oportunidades laborales, con formación práctica de calidad y alta intensidad brindada por expertas y expertos de la industria. En estos bootcamps elaborarás un proyecto, siendo parte de un equipo multidisciplinario.

- + Desarrollo ágil
- + Diseño UX
- + Desarrollo frontend
- + Desarrollo backend
- + Desarrollo de aplicaciones móviles

100%
vía streaming

Más información

www.dcc.uchile.cl/educacion_continua/bootcamps



PEC
DCC



MAGÍSTER EN

TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

Departamento de Ciencias
de la Computación
Universidad de Chile

Acreditación

6 años

Acreditado por Acredita CI
hasta el 12 de diciembre
de 2022



ÁREAS DE ESPECIALIZACIÓN:

- Gestión y Desarrollo de Proyectos de Tecnologías de la Información
- Ingeniería de Software
- Ciencia e Ingeniería de Datos
- Seguridad Computacional
- Inteligencia Artificial

INFORMACIÓN Y POSTULACIONES EN:

<https://www.dcc.uchile.cl/postgrado/mti/>

CONTACTO:

Departamento de Ciencias de la Computación
FCFM, Universidad de Chile



Beauchef #851, Edificio Norte, tercer piso,
oficinas 326 - 327. Santiago.



Correo:
capacita@dcc.uchile.cl



Teléfonos:
+56 2 2978 4965
+56 2 2978 4976
+56 9 3871 9957 *WhatsApp*

REVISTA DEL DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
COMPUTACIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE

Bits

DE CIENCIA