

# El pensamiento computacional en las aulas de ciencias naturales y matemática

Adaptación del original en inglés: "*Defining Computational Thinking for Mathematics and Science Classrooms*" de David Weintrop, Elham Beheshti, Michael Horn, Kemi Jona, Laura Trouille & Uri Wilensky. Traducción y adaptación al español de Cristián Rizzi Iribarren (2020).

**Publicación original:** Weintrop, D., Beheshti, E., Horn, M., Orton, K., Jona, K., Trouille, L., & Wilensky, U. (2016). Defining Computational Thinking for Mathematics and Science Classrooms. *Journal of Science Education and Technology*, 25(1), 127–147.

<https://doi.org/10.1007/s10956-015-9581-5>

(2016).

## Resumen

Las ciencias naturales y la matemática se están convirtiendo en “empresas” computacionales. Este hecho se refleja en la *Nueva Generación de Estándares para Ciencias* (NGSS) recientemente lanzados y la decisión de incluir el "pensamiento computacional" como una práctica científica central. Con esta adición, y la mayor presencia de computación en contextos matemáticos y científicos, ha surgido una nueva urgencia ante el desafío de definir el pensamiento computacional y proporcionar una base teórica sobre qué forma debería tomar en las aulas de ciencias y matemática a nivel escolar. Este artículo presenta una respuesta a este desafío al proponer una definición de pensamiento computacional para matemática y ciencias en forma de una taxonomía que consta de cuatro categorías principales: *prácticas con datos; prácticas de modelización y simulación; prácticas computacionales de resolución de problemas; y prácticas de pensamiento sistémico*.

Para elaborar esta taxonomía, recurrimos a la literatura existente sobre pensamiento computacional, a entrevistas con matemáticos y científicos, y a materiales didácticos ejemplares de pensamiento computacional.

Este trabajo se realizó como parte de un esfuerzo mayor para integrar el pensamiento computacional en los materiales curriculares de ciencias y matemática de la escuela secundaria. En este artículo, abogamos por el enfoque de incorporar el pensamiento computacional en contextos matemáticos y científicos, presentar la taxonomía y discutir cómo imaginamos la taxonomía como herramienta para alinear los esfuerzos educativos actuales con la naturaleza cada vez más computacional de las ciencias y la matemática moderna.

## Introducción

Para 2020, uno de cada dos trabajos en ciencias será en computación (Informe ACM 2013).

El lanzamiento de los NGSS pone un nuevo énfasis en la investigación auténtica en el aula, incluidas ocho prácticas científicas distintas (NGSS Lead States 2013). Si bien algunas de estas prácticas son familiares para los docentes veteranos, como "*hacer preguntas y definir problemas*", otras no lo son tanto. En particular, la práctica de "*usar la matemática y el pensamiento computacional*" refleja la creciente importancia de la computación y las tecnologías digitales en todas las disciplinas científicas.

Se pueden encontrar resultados educativos similares en los estándares de matemática, como las pautas de Common Core, que establecen que los estudiantes deberían poder "*usar herramientas tecnológicas para explorar y profundizar su comprensión de los conceptos*" (National Governors Association 2010, p. 7) .

Sin embargo, la inclusión de estas prácticas, en sí misma, ofrece poca orientación para los docentes que deberán realizarlas en sus aulas. Gran parte de la dificultad proviene del hecho de que las prácticas recopiladas bajo el término general "***pensamiento computacional***" (National Research Council [NRC] 2010; Wing 2006; Papert 1996) aún no han sido definidas claramente.

Esto es especialmente cierto para su uso en contextos de ciencias y matemática en comparación con entornos informáticos más generales. También hay un debate activo y una discusión en torno a preguntas clave como:

*¿Cómo se relaciona el pensamiento computacional con el pensamiento matemático, el pensamiento algorítmico o la resolución de problemas? ¿Cómo se relaciona con el campo de la informática? ¿En qué medida está involucrada la programación de computadoras? ¿El pensamiento computacional siempre requiere una computadora?*

Nuestro objetivo en este documento es desarrollar una comprensión más matizada del pensamiento computacional, específicamente en lo que se aplica a las disciplinas matemáticas y científicas y las necesidades de los docentes de secundaria que se espera preparen a los estudiantes para carreras potenciales en estos campos. A diferencia de la mayor parte de la discusión sobre el pensamiento computacional hasta la fecha, que enfatiza temas de la informática como la abstracción y los algoritmos, nuestro enfoque para definir el pensamiento computacional toma la forma de una **taxonomía de prácticas centradas en la aplicación del pensamiento computacional en ciencias y matemática**.

Este enfoque emplea la matemática y las ciencias naturales como contextos significativos en los que situar los conceptos y prácticas del pensamiento computacional, y se basa en las formas en que matemáticos y científicos están usando el pensamiento computacional para avanzar en sus disciplinas. Este contexto más restrictivo nos permite caracterizar más claramente qué es el pensamiento computacional en matemática y ciencias.

La taxonomía consta de cuatro categorías principales: *prácticas de datos, prácticas de modelado y simulación, prácticas computacionales de resolución de problemas, y prácticas de pensamiento de sistémico*.

Describimos cada una de estas prácticas y sus componentes constitutivos, y caracterizamos el nivel de maestría en el dominio de cada práctica.

La contribución de este trabajo es **proporcionar una definición práctica, lista para el aula, de pensamiento computacional**, basada en la investigación existente sobre el pensamiento computacional y que incorpora conceptos específicamente enfocados en contextos matemáticos y científicos. Al hacerlo, proporcionamos un marco y un lenguaje compartido que se puede utilizar para que la enseñanza de la matemática y las ciencias esté más en línea con su naturaleza cada vez más computacional.

Además, al fundamentar nuestra concepción del pensamiento computacional en matemática y ciencias, reducimos el alcance del pensamiento computacional lejos de las generalidades, proporcionando una definición más precisa que es distinta de la informática, pero aún basada en prácticas computacionales auténticas y significativas que son esenciales para que los estudiantes dominen.

## ¿Por qué llevar el Pensamiento Computacional a las clases de ciencias y matemática?

Una motivación importante para introducir prácticas de pensamiento computacional en las aulas en ciencias y matemática, es la naturaleza rápidamente cambiante de estas disciplinas en el mundo profesional (Bailey y Borwein 2011; Foster 2006; Henderson et al. 2007). En los últimos 20 años, casi todos los campos relacionados con las ciencias y la matemática han visto el crecimiento de una contraparte computacional.

Los ejemplos incluyen bioinformática, estadística computacional, quimimetría y neuroinformática, entre otros.

Este aumento en la importancia de la computación con respecto a la matemática, las ciencias y los campos más amplios de Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemática (STEM) ha sido reconocido tanto por aquellos dentro de las comunidades educativas STEM como por las organizaciones de educación en informática (ACM / IEEE-CS Grupo de trabajo conjunto sobre currícula informática 2013). Al incorporar herramientas y prácticas computacionales en las aulas de matemática y ciencias, los y las estudiantes tienen una visión más realista de lo que son estos campos, preparan mejor a los estudiantes para seguir carreras en estas disciplinas (Augustine 2005; Gardner 1983) y ayudan a preparar a los estudiantes para ser ciudadanos STEM más inteligentes en el futuro.

Como afirma Foster (2006), director del Laboratorio de Computación de la Universidad de Chicago, "*todos los científicos serán expertos en la aplicación de las técnicas computacionales existentes*" (p. 419). Además, el uso variado y aplicado del pensamiento computacional por parte de expertos en el campo proporciona una hoja de ruta que señale qué debe incluir la enseñanza del pensamiento computacional en el aula.

Desde una perspectiva pedagógica, **el uso reflexivo de habilidades y herramientas computacionales puede profundizar el aprendizaje del contenido matemático y científico** (Guzdial 1994; Eisenberg 2002; National Research Council 2011a, b; Redish y Wilson 1993; Repenning et al. 2010; Sengupta et al. 2013; Sherin 2001; Wilensky 1995; Wilensky et al. 2014; Wilensky y Reisman 2006). Lo contrario también es cierto, es decir, que las ciencias naturales y la matemática proporcionan un contexto significativo (y un conjunto de problemas) dentro del cual se puede aplicar el pensamiento computacional (Hambruch et al. 2009; Jona et al. 2014; Lin et al. 2009; Wilensky et al. 2014).

Esto difiere notablemente de la enseñanza del pensamiento computacional como parte de un curso independiente en el que las tareas que reciben los estudiantes tienden a estar divorciadas de los problemas y aplicaciones del mundo real. Este sentido de autenticidad y aplicabilidad en el mundo real es importante en el esfuerzo por motivar la participación diversa y significativa en actividades computacionales y científicas (Blikstein 2013; Chinn y Malhotra 2002; Confrey 1993; Margolis y Fisher 2003; Margolis 2008; Ryoo et al. 2013 ).

Esta relación recíproca (el uso de la computación para enriquecer el aprendizaje de la matemática y las ciencias naturales, y el uso de contextos matemáticos y científicos para enriquecer el aprendizaje computacional) es el núcleo de nuestra motivación para unir el pensamiento computacional y los conceptos de las ciencias naturales y la matemática.

Una motivación final para llevar el pensamiento computacional a las aulas de matemática y ciencias naturales es llegar a la audiencia más amplia posible, y abordar los problemas de larga

data de la sub-representación de las mujeres y las minorías en los campos computacionales (National Science Foundation 2013).

Actualmente, solo una fracción de los estudiantes de secundaria tiene la oportunidad de tomar un curso de informática, debido a la falta de docentes calificados, a una infraestructura inadecuada o a limitaciones en el armado del horario de clases. Incorporar actividades de pensamiento computacional en los cursos de matemática y ciencias naturales aborda directamente el tema de la auto-selección de los y las estudiantes en (o fuera de) las clases de ciencias de la computación, lo que ha sido un desafío durante mucho tiempo en el esfuerzo de llegar a los jóvenes desatendidos (Margolis y Fisher 2003; Margolis 2008). También evita problemas prácticos de adaptar nuevas clases a horarios escolares superpoblados y encontrar docentes para enseñarles.

## **Audiencias atendidas**

Una contribución del trabajo que presentamos aquí es un conjunto de pautas que se pueden seguir para llevar el pensamiento computacional a las aulas de matemática y ciencias naturales de manera rápida y efectiva. Al elegir abarcar la matemática y las ciencias naturales en general, esta taxonomía define un lenguaje compartido que se puede utilizar en las aulas para ayudar a los estudiantes a comprender la naturaleza transversal y la amplia aplicabilidad del pensamiento computacional. Como tal, la taxonomía que presentamos en este documento está destinada a un conjunto diverso de interesados en educación, incluidos docentes, administradores, directivos, diseñadores curriculares, evaluadores e investigadores en educación.

Para los docentes, nuestra taxonomía está destinada a proporcionar un conjunto concreto de prácticas claramente delineadas para guiar el desarrollo curricular y la implementación en el aula. Esperamos ayudar a los docentes a que comprendan cómo ya están usando prácticas de pensamiento computacional en sus clases, y apoyarlos en el desarrollo más completo de esos aspectos en sus actividades de aprendizaje. Nuestro objetivo no es cambiar radicalmente las prácticas existentes de docentes experimentados, en cambio, queremos que esta taxonomía sirva como un recurso para potenciar la pedagogía y la currícula existentes con prácticas de pensamiento computacional más sofisticadas.

Para los directivos, administradores y decisores de políticas, la taxonomía está destinada a ayudar a dar forma a las expectativas y establecer prioridades para la educación en matemática y ciencias naturales, particularmente cuando se trata de preparar a los estudiantes para las demandas del siglo XXI. Comprender las dimensiones computacionales cada vez mayores de estos campos también podría ayudar a los administradores a asignar recursos para capacitación de acuerdo con las necesidades del docente.

Para quienes se dedican al desarrollo curricular y otros diseñadores de experiencias de aprendizaje, nuestra esperanza es que la taxonomía sirva como un recurso para abordar las preguntas "*qué*" y "*cómo*" presentes en la creación de nuevos materiales educativos.

Con la creciente importancia de la responsabilidad en nuestras escuelas, la necesidad de evaluaciones precisas y validadas es esencial. Al proporcionar una definición clara de lo que incluye el pensamiento computacional en contextos científicos y matemáticos, esta taxonomía se puede utilizar como un recurso para los evaluadores que tienen la tarea de crear los elementos que medirán estas prácticas.

Finalmente, para los investigadores en educación, vemos este trabajo como una contribución tanto teórica como práctica para nuestra comprensión de la naturaleza de la educación en ciencias naturales y matemática en nuestra era cada vez más tecnológica. Si bien las prácticas de las ciencias naturales y la matemática han cambiado mucho en los últimos 50 años debido al avance de la tecnología, las aulas no han seguido el mismo ritmo. Al delinear el espacio del pensamiento computacional con respecto a estos campos, esperamos proporcionar un recurso para que otros investigadores educativos lo utilicen en sus esfuerzos por modernizar el aprendizaje de las ciencias naturales y la matemática para preparar mejor a los estudiantes para el futuro computacional que les espera.

## Línea de base

En esta sección, revisamos brevemente **tres publicaciones** que mencionan la taxonomía que presentamos en este documento. Primero, revisamos la literatura sobre el pensamiento computacional, situándolo históricamente e ilustrando los esfuerzos recientes relevantes para poner en práctica el concepto. Luego discutimos la investigación que se centra en llevar el pensamiento computacional al aula, un objetivo que es central en nuestra agenda de investigación. Finalmente, revisamos el papel creciente de la computación en los campos de la matemática y las ciencias naturales.

## Pensamiento computacional

*"A la capacidad analítica de cada niño, además de la lectura, la escritura y la aritmética, debemos agregar el pensamiento computacional."*

(Wing, J., 2006, p. 33)

El tema principal detrás del interés reciente en el pensamiento computacional es que el conocimiento y las habilidades en el campo de la informática tienen aplicaciones de gran alcance de las que todos pueden beneficiarse: "*[el pensamiento computacional] representa una actitud y un conjunto de habilidades universalmente aplicables que todos, no solo los científicos computacionales, estarían ansiosos por aprender y usar*" (Wing 2006, p. 33).

Este argumento ha sido recurrente, de una forma u otra, durante el último medio siglo. Perlis (1962), el primer receptor del Premio Turing de la ACM<sup>1</sup>, dijo que todos los estudiantes universitarios deberían aprender a programar como parte de una educación liberal (como se cita en Guzdial 2008). Papert (1972, 1980) amplió esta visión a una alfabetización completa a partir de la infancia. Papert (1996) fue el primero en usar el término pensamiento computacional para referirse a las posibilidades de las representaciones computacionales para expresar ideas poderosas. Llamadas similares se han hecho regularmente en las décadas posteriores (diSessa 2000; Kay y Goldberg 1977; Guzdial y Soloway 2003; Papert 1972, 1980; Wilensky 2001).

El primer trabajo para poner en práctica esta idea fue el desarrollo del lenguaje de programación LOGO (Feurzeig et al. 2011; Papert 1980). Si bien LOGO fue diseñado de manera

---

<sup>1</sup> ACM: Asociación para la Maquinaria Computacional, en inglés "Association for Computer Machinery".

más inmediata para enseñar conceptos matemáticos, sus creadores reconocieron rápidamente los beneficios de largo alcance de las habilidades aprendidas a través de la programación, argumentando que *"la presencia de la computadora podría contribuir a los procesos mentales no solo instrumentalmente, sino de manera más esencial y conceptual, influyendo sobre el modo en que las personas piensan aún cuando se encuentran muy alejadas del contacto físico con una computadora"* (Papert 1980, p. 16). Otra perspectiva importante sobre el pensamiento computacional proviene del trabajo de diSessa (2000) y su libro *Changing Minds: Computers, Learning & Literacy (Mentes en Cambio: Computadoras, Aprendizaje y Alfabetización)*. En particular, diSessa argumenta que las computadoras pueden ser la base de una nueva y poderosa forma de alfabetización que tiene el potencial de ser dominante en todas las materias, contextos y dominios.

Se han propuesto varias definiciones recientes para el pensamiento computacional sin un consenso emergente (Grover y Pea 2013). Wing propone una definición que enfatiza la contribución única del campo de la informática a una amplia gama de esfuerzos humanos: *"el pensamiento computacional implica resolver problemas, diseñar sistemas y comprender el comportamiento humano, basándose en los conceptos fundamentales de la informática."* (Wing 2006, p. 33).

La Royal Society se hace eco de este énfasis en la informática, definiendo al pensamiento computacional como *"el proceso de reconocer aspectos de la computación en el mundo que nos rodea, y aplicando herramientas y técnicas de la informática para comprender y razonar sobre sistemas y procesos naturales y artificiales."* (Furber 2012, p. 29). Al destacar la diversidad y la naturaleza inclusiva del debate sobre el pensamiento computacional, en 2010, el *Consejo Nacional de Investigaciones* en Estados Unidos (NRC) convocó a una reunión sobre el alcance y la naturaleza del pensamiento computacional, produciendo un informe que enumeró más de 20 habilidades y prácticas de alto nivel que el pensamiento computacional podría incluir, como la abstracción y descomposición de problemas, el razonamiento heurístico, las estrategias de búsqueda y el conocimiento de conceptos informáticos como el procesamiento paralelo, el aprendizaje automático y la recursividad (NRC 2010). En este trabajo, aportamos un enfoque diferente para definir el pensamiento computacional al confiar en la aplicación de las prácticas identificadas anteriormente en contextos distintos de la informática.

Al hacerlo, nos alejamos de confiar en ideas y prácticas descontextualizadas y, en cambio, recurrimos a instancias del mundo real del pensamiento computacional en la naturaleza para proporcionar claridad y especificidad sobre el significado del término. Hacerlo de esta manera, refuerza el argumento de que estas prácticas son ampliamente aplicables, al tiempo que proporciona una definición concreta y procesable del pensamiento computacional.

Gran parte de la literatura sobre el pensamiento computacional se centra en los resultados educativos, incluida una segunda reunión convocada por el Consejo Nacional de Investigaciones (NRC) que se centra en los aspectos pedagógicos del pensamiento computacional. Este esfuerzo buscó responder preguntas tales como de qué manera el pensamiento computacional se relaciona con las materias existentes, cómo podría ser una progresión del pensamiento computacional, cómo capacitar a los docentes en prácticas de pensamiento computacional y cómo evaluar mejor el pensamiento computacional (NRC 2011b). La *Computer Science Teachers Association (CSTA)* afirma que *"el estudio del pensamiento computacional permite a todos los estudiantes conceptualizar, analizar y resolver mejor los problemas complejos seleccionando y aplicando estrategias y herramientas apropiadas, tanto virtualmente como en el mundo real"* (CSTA, 2011, p. 9).

Aunque se ha hecho un esfuerzo considerable para avanzar en nuestra comprensión del pensamiento computacional, todavía hay desafíos que abordar, particularmente en términos de llevar el pensamiento computacional a las escuelas. Estos desafíos incluyen definir una progresión de aprendizaje y un plan de estudios, evaluar el rendimiento de los estudiantes, preparar a los docentes y garantizar un acceso equitativo (Grover y Pea 2013). Para avanzar en estas áreas, será necesario dividir el pensamiento computacional en un conjunto de habilidades, conceptos y/o prácticas bien definidas y medibles.

## **El Pensamiento Computacional en el nivel escolar (desde Nivel Inicial hasta Secundaria inclusive)**

Una amplia investigación en las últimas tres décadas se ha centrado en temas relacionados con las habilidades, conceptos y prácticas de enseñanza y aprendizaje relevantes para el pensamiento computacional (Grover y Pea 2013). Se han realizado algunos esfuerzos notables para crear marcos y pautas para llevar el pensamiento computacional al nivel escolar. Barr y Stephenson (2011), al informar sobre el trabajo de la comunidad educativa en ciencias de la computación, brindan un enfoque al proponer una definición para el pensamiento computacional en toda la educación escolar. Como parte de este esfuerzo, presentan una lista de conceptos de pensamiento computacional y los mapean en una variedad de asignaturas escolares convencionales, mostrando, por ejemplo, cómo sería la abstracción en un aula de ciencias sociales, o cómo usar la automatización en una clase de matemática.

Un segundo esfuerzo para proporcionar una estructura útil para operacionalizar el pensamiento computacional en la educación K-12<sup>2</sup> proviene de Brennan y Resnick (2012), quienes proponen un marco de pensamiento computacional que consta de tres dimensiones: *conceptos computacionales*, *prácticas computacionales* y *perspectivas computacionales*.

Para cada dimensión, articulan cómo es involucrarse en el pensamiento computacional a ese nivel y brindan pautas sobre cómo evaluar el pensamiento computacional a través de las diversas formas en que puede usarse.

Paralelamente al esfuerzo de crear marcos para comprender y evaluar el pensamiento computacional, está la creación continua de nuevos entornos de aprendizaje, herramientas y actividades diseñadas para promover las competencias computacionales en contextos de aprendizaje en el nivel escolar.

Tales esfuerzos incluyen entornos de programación gráfica como Scratch (Resnick et al. 2009) y Alice (Cooper et al. 2000); entornos de modelado computacional como STELLA (Richmond et al. 1987) y NetLogo (Wilensky 1999b); kits de prototipado electrónico como Arduino, Micro:bit o Raspberry Pi y textiles digitales (Buechley et al. 2008); videojuegos que incluyen Quest Atlantis (Barab et al. 2005) y RoboBuilder (Weintrop y Wilensky 2013); y entornos de investigación científica andamiados como WISE (Linn et al. 2003), Genscope (Horwitz et al. 1998), GasLab (Wilensky 1999a); Evolución en la Laguna de las Ranas (Horn et al. 2014) y WorldWatcher (Edelson et al. 1999).

Otro trabajo se centra no en la tecnología o el medio utilizado para la enseñanza del pensamiento computacional, sino en el dominio en el que se ubicará. Las prácticas de pensamiento computacional se han integrado en materias que incluyen Historia, Prácticas del

---

<sup>2</sup> N de T: El término K-12 se utiliza en la literatura estadounidense para referirse a los niveles escolares desde Inicial (Kindergarten) hasta el último año de la escuela secundaria (Grado 12).

lenguaje, Matemática, Arte y Ciencias (Blikstein y Wilensky 2009; Eisenberg 2002; Hambrusch et al. 2009; Rubin y Nemirovsky 1991; Sengupta et al. 2013; Settle et al. 2012, 2013). Un enfoque complementario para llevar el pensamiento computacional a la educación escolar es integrarlo en los cursos de formación docente pre-servicio independientemente de su especialización de contenido (Yadav et al. 2011). El crecimiento de este tipo de trabajo, la variedad de formas que adopta y la diversidad de contextos en los que se ha utilizado, habla de la necesidad del marco de pensamiento computacional interdisciplinario que presentamos aquí.

Muchos investigadores han argumentado que la capacidad de utilizar efectivamente simulaciones por computadora y visualizaciones interactivas es un aspecto importante del pensamiento computacional, particularmente en lo que se refiere a las disciplinas STEM (NRC 2011b). Por ejemplo, NetLogo (Wilensky 1999b) se ha utilizado con éxito en las escuelas para presentar a los estudiantes sistemas complejos y fenómenos emergentes en muchos campos diferentes, como la probabilidad y la estadística (Abrahamson et al. 2006; Abrahamson y Wilensky 2005); las reacciones químicas (Stieff y Wilensky 2003; Levy y Wilensky 2009); la teoría cinética molecular (Brady et al. 2015; Wilensky 1999a); la biología de poblaciones (Wilensky y Reisman 2006); y la evolución (Wilensky y Novak 2010; Wagh y Wilensky 2014).

Otro ejemplo es el Molecular Workbench del Concord Consortium, que es una plataforma de modelado interactivo que permite a los estudiantes estudiar el movimiento de las partículas y proporciona una plataforma de simulación para enseñar y aprender ciencias a través del razonamiento a escala atómica (Tinker y Xie 2008).

El proyecto de Tecnología de Educación de la Física (PhET) es otro ejemplo de tales entornos de aprendizaje, que proporciona una gran colección de modelos y simulaciones basados en la web para enseñar contenido STEM (Perkins et al. 2006; Bryan 2006).

Otro enfoque notable para llevar el pensamiento computacional a las aulas en el nivel escolar, es el uso de recursos computacionales en línea para permitir experiencias de aprendizaje que de otro modo no serían posibles. Por ejemplo, la red iLab<sup>3</sup> proporciona instalaciones experimentales a través de laboratorios remotos en línea que permiten a los estudiantes y educadores usar instrumentos reales, en lugar de simulaciones, y realizar experimentos (Jona y Vondracek 2013). Esto les da a los estudiantes acceso a una amplia variedad de fenómenos científicos y control de sofisticados equipos experimentales. Las actividades incluyen el estudio de la radiactividad mediante la medición de material radiactivo con un contador Geiger y el estudio de la difracción de neutrones utilizando un monocromador de cristal. Proyectos como estos reúnen ciencia, tecnología y prácticas de pensamiento computacional de una manera accesible y atractiva.

## **El creciente papel de la computación en la matemática y las ciencias naturales**

El panorama para las ciencias naturales está cambiando. Los recientes avances en computación de alta velocidad y métodos analíticos han creado herramientas poderosas para comprender los fenómenos en todos los espectros de la investigación humana. En algunos campos científicos, como la biología molecular y la química, el advenimiento ha sido reciente pero rápido. El Premio Nobel de Química de 1998 fue otorgado a John A. Pople y Walter Kohn

---

<sup>3</sup> N de T: Al momento de la traducción de este paper (Feb., 2020), el sitio iLab no se encuentra disponible.

por su trabajo innovador en el desarrollo de métodos computacionales en química cuántica (Pople 2003; Kohn 2003).

Un premio tan prestigioso elogió la aceptación de la computación como una herramienta válida y rigurosa para investigar fenómenos químicos. En una amplia variedad de dominios, la aplicación de enfoques estadísticos y matemáticos que dependen de la computación, como los métodos de Markov Chain Monte Carlo y las redes neuronales artificiales, han demostrado ser esenciales para abrir nuevas vías de exploración y arrojar avances en numerosos campos tan diversos como estudiar los orígenes del universo en la astrofísica computacional (Vogelsberger et al. 2014) como para comprender la cinética del crecimiento de granos en las ciencias de materiales (Anderson et al. 1984; Srolovitz et al. 1984).

Recientemente<sup>4</sup>, investigadores de Harvard y el MIT, diseñaron un potente antibiótico contra bacterias resistentes utilizando inteligencia artificial (Collins, 2018).

Wing (2006) declaró que los enfoques de pensamiento computacional se volverían fundamentales en todas las disciplinas y que los avances en computación permitirían a los investigadores visualizar nuevas estrategias de resolución de problemas y probar nuevas soluciones tanto en el mundo virtual como en el real.

Si bien ciertos campos como la física y la ingeniería tienen una asociación interdisciplinaria de larga data con metodologías computacionales, los enfoques clásicos para la resolución de problemas en biología y química han enfatizado históricamente los sistemas deterministas de baja complejidad, ignorando en gran medida los problemas estocásticos y no lineales.

El fuerte sesgo previo hacia el estudio de los sistemas deterministas fue principalmente por motivos de practicidad, con el término "no lineal" siendo casi sinónimo de "no solucionable". Sin embargo, la naturaleza es inherentemente no lineal y puede caracterizarse por un comportamiento caótico, como se puede observar en el cambio climático (Dijkstra 2013; Manabe y Stouffer 1988); la propagación de enfermedades (Keeling y Grenfell 1997; Olsen y Schaffer 1990); la angustia ecológica (Lubchenco et al. 1991); y la evolución (Lander y Schork 1994; Turelli y Barton 1994). Tanto matemática como físicamente, los sistemas deterministas/lineales son las excepciones más que la regla. En los últimos años, los métodos computacionales han ampliado el rango de fenómenos no lineales que pueden explorarse mediante el uso de modelos matemáticos y de simulación.

Wolfram (2002) incluso proclamó la aparición de un nuevo tipo de ciencia basada en sus experimentos computacionales en patrones emergentes en la naturaleza, argumentando que tales exploraciones no son posibles sin la computación. Los campos científicos están experimentando un renacimiento en los enfoques experimentales debido principalmente a la disponibilidad de computadoras más potentes, la accesibilidad de nuevos métodos analíticos y el desarrollo de modelos computacionales altamente detallados en los que se puede incorporar una amplia gama de componentes y mecanismos. Estos avances, a su vez, han creado una creciente necesidad de educar a los estudiantes en métodos y técnicas computacionales para apoyar el panorama rápidamente cambiante de la investigación en matemática y en las disciplinas científicas.

---

<sup>4</sup> N de T: Párrafo agregado por el traductor. Tomado de: [https://www.clarin.com/buena-vida/descubrieron-potente-antibiotico-uso-inteligencia-artificial\\_0\\_uFkvxYv6.html](https://www.clarin.com/buena-vida/descubrieron-potente-antibiotico-uso-inteligencia-artificial_0_uFkvxYv6.html)

## Métodos

Para desarrollar nuestra taxonomía de las prácticas de pensamiento computacional para la matemática y las ciencias naturales, recurrimos a múltiples recursos para identificar las prácticas características que son más importantes para satisfacer las necesidades de los estudiantes y para reflejar el trabajo de los profesionales en una amplia gama de disciplinas de matemática y ciencias. La **Figura 1** ilustra los pasos que seguimos para crear la taxonomía. A lo largo del proceso, trabajamos en estrecha colaboración con otros investigadores de disciplinas STEM, docentes y especialistas curriculares. Principalmente recurrimos a tres recursos para la creación y validación de nuestra taxonomía: (1) actividades educativas ejemplares que integran el pensamiento computacional en matemática y ciencias naturales, (2) estándares e inventarios de conceptos existentes, y (3) entrevistas con matemáticos y científicos.

**Paso 1:** El primer paso en la creación de nuestra taxonomía fue revisar la literatura de pensamiento computacional existente, identificando las habilidades y prácticas que se mencionan repetidamente como centrales. Esta investigación comenzó con las dos publicaciones del Consejo Nacional de Investigaciones (NRC) sobre pensamiento computacional (NRC 2010, 2011b) y se ramificó a partir de ahí, revisando la literatura citada en esos informes junto con el trabajo que se basa en las ideas presentadas en los dos informes.

Debido a que consideramos que el pensamiento computacional está fuertemente informado por los campos de la ingeniería y la informática, también reunimos y analizamos marcos de contenido de informática, ingeniería y tecnología, como el proyecto CS Principles Project (Astrachan y Briggs 2012), el informe del Currículo de Ciencias de la Computación 2013 (Grupo de trabajo conjunto ACM / IEEE-CS sobre currículos informáticos 2013) y el Marco de alfabetización de tecnología e ingeniería de NAEP (Driscoll 2013).

Al revisar estos documentos, nuestro objetivo era mapear lo que la literatura existente identificaba como central para el pensamiento computacional con un enfoque en las aplicaciones a la matemática y las ciencias naturales. A lo largo de este paso inicial, buscamos comprender el panorama más amplio del pensamiento computacional antes de reducir nuestro enfoque a las disciplinas de la matemática y las ciencias naturales. Esta revisión produjo un conjunto preliminar de diez habilidades básicas de pensamiento computacional (Tabla 1), que se utilizaron como punto de partida para nuestra taxonomía.

**Paso 2:** El segundo paso para crear la taxonomía fue recopilar y clasificar una variedad de actividades diseñadas para introducir el pensamiento computacional en las aulas de matemática y ciencias de la escuela secundaria. El corpus principal de las actividades analizadas fueron los materiales producidos como parte del programa "[Reach for the Stars](#)", una iniciativa financiada por la NSF<sup>5</sup> que vincula a los estudiantes graduados de disciplinas STEM que usan la computación en sus investigaciones con docentes de secundaria para desarrollar actividades para el aula basadas en su investigación. [Estas actividades](#) abarcan una variedad de conceptos en química, física, biología, astronomía, ciencias de la tierra, redes y programación.

---

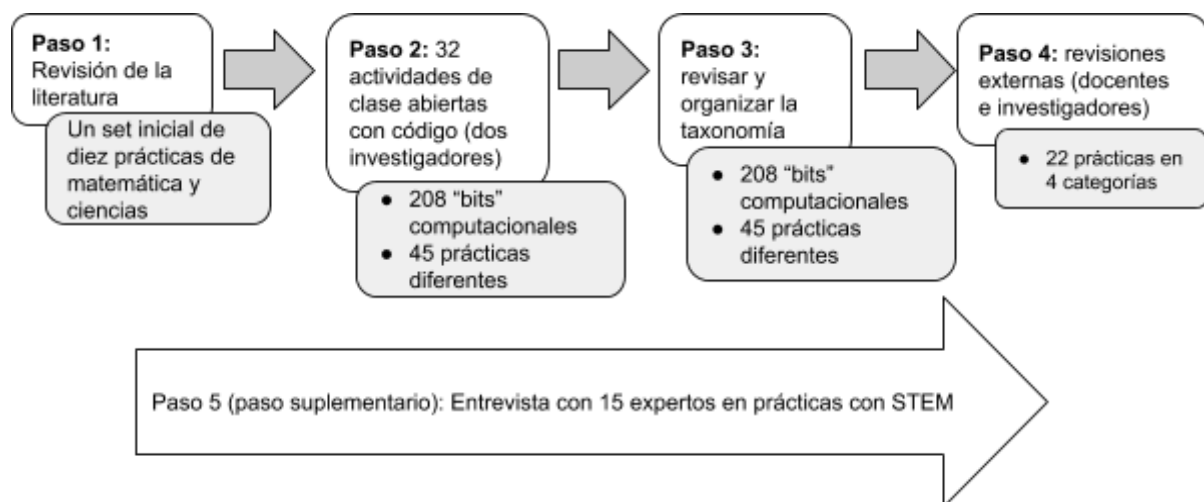
<sup>5</sup> N de T: NSF, Fundación Nacional para las Ciencias, por sus siglas en inglés **N**ational **S**cience **F**oundation, organismo público que provee fondos para investigación en ciencias en los Estados Unidos.

Treinta planes de clase de esta colección fueron seleccionados y clasificados de acuerdo a los elementos de pensamiento computacional (12 en física, 8 en química, 3 en biología y 7 en matemática). También incluimos cuatro actividades de una clase de modelado matemático de la escuela secundaria diseñada por un docente que colabora en el proyecto.

Dos investigadores revisaron de forma independiente cada una de las 34 actividades, buscando prácticas específicas que parecieran relevantes para el pensamiento computacional en base a nuestros hallazgos del **paso 1**. Esto dio como resultado un conjunto combinado de 208 "facetas" del pensamiento computacional de nuestro corpus de actividad.

La **Tabla 2** proporciona un breve extracto de una parte de la codificación de una de nuestras actividades para que sirva de ejemplo de este proceso. La actividad que se analiza es una actividad sobre Física que utiliza una montaña rusa virtual para permitir a los estudiantes explorar las fuerzas y el impulso que rigen el movimiento.

La actividad propone que los estudiantes diseñen experimentos, recopilen datos, analicen sus resultados mientras exploran la relación entre las energías potenciales, cinéticas y disipadas.



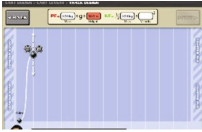

**Fig. 1:** Procesos seguidos en la creación de la taxonomía de Pensamiento Computacional en Matemáticas y Ciencias.

**Tabla 1:** Conjunto inicial de habilidades de Pensamiento Computacional

*Conjunto inicial de habilidades de Pensamiento Computacional*

- |  |  |
|--|--|
| 1. Capacidad para lidiar con problemas abiertos                  | 6. Crear abstracciones para aspectos del problema en cuestión                                  |
| 2. Persistencia en el trabajo a través de problemas desafiantes. | 7. Reenmarcar el problema en un problema reconocible   |
| 3. Confianza en el manejo de la complejidad.                     | 8. Evaluar las fortalezas/debilidades de una representación de datos/sistema de representación |
| 4. Representar ideas de manera computacionalmente significativa. | 9. Generar soluciones algorítmicas   |
| 5. Desglosar problemas grandes en problemas más pequeños         | 10. Reconocer y abordar la ambigüedad en los algoritmos  |

**Tabla 2:** Ejemplo de una parte de la codificación inicial y la codificación final para la lección de física de la montaña rusa

Actividad	Faceta del pensamiento computacional	Práctica de pensamiento computacional involucrada	Práctica de taxonomía finalizada
Construcción de montañas rusas 	Los estudiantes construyen modelos de montañas rusas que se pueden ejecutar, generando datos sobre la energía de dicha montaña rusa.  Los estudiantes registran mediciones de energía en cuatro puntos de la pista y almacenan los datos en una tabla.	Obtener información/comprensión de simulaciones/modelos basados en computadora.  Hacer mediciones efectivas a partir de una ejecución de simulación.	Usar el modelo computacional para entender un concepto.  Construir modelos computacionales.  Recolectar datos
Diseño de una montaña rusa 	Se requieren múltiples iteraciones para construir una montaña rusa exitosa que finalice la pista y no se estrelle.	Enfoque iterativo de una solución.	Usar modelos computacionales para encontrar y probar una solución
Graficar las energías cinética y potencial de la montaña rusa a lo largo del tiempo	Traducir gráficos de energía potencial / cinética en forma tabular	Evaluar las fortalezas y debilidades de una representación.	Manipular datos  Visualizar datos

Utilizando el conjunto de 208 pensamientos computacionales en las facetas de matemática y ciencias, dos investigadores independientemente codificaron cada faceta de acuerdo con las **prácticas de pensamiento computacional** involucradas (Columna 3 de la Tabla 2). El proceso comenzó con el conjunto de códigos derivados de nuestra revisión inicial de la literatura (paso 1). Estas habilidades a menudo eran demasiado amplias o no se adaptaban a los contextos matemáticos y científicos, lo que resultaba en la división y refinamiento de estas categorías en habilidades más específicas, así como en la introducción de nuevos códigos cuando una faceta no encajaba dentro del conjunto de prácticas existente.

Una vez completada la codificación inicial, los dos investigadores revisaron iterativamente los nuevos códigos, dando como resultado la primera versión completa de nuestra taxonomía, que consistía en **45 habilidades de pensamiento computacional** diferentes en las prácticas de **matemática y ciencias**.

**Paso 3:** El conjunto inicial de prácticas se compartió con el grupo de investigación más amplio en el proyecto, que colectivamente emprendió otra ronda de revisiones y clasificó las prácticas individuales en distintas categorías. Gran parte de este trabajo se centró en juntar habilidades similares en nuevas categorías unificadas. Además, para obtener validez externa, consultamos con los estudiantes graduados del proyecto "*Reach for the Stars*" que habían desarrollado los planes de clase y los docentes en servicio que participaban en el proyecto. El producto

resultante fue una lista revisada de **27 prácticas agrupadas temáticamente en cinco categorías** de alto nivel: *datos e información* (6 prácticas), *modelado y simulación* (5 prácticas); *computación* (5 prácticas); *resolución de problemas* (7 prácticas); y *Pensamiento sistémico* (4 prácticas). Cada una de estas prácticas estaba vinculada con un ejemplo específico de su uso en uno de los planes de clase originales.

La **Tabla 3** ilustra dos ejemplos de estos códigos y su correspondiente faceta de pensamiento computacional de los planes de clase.

**Paso 4:** La taxonomía se presentó a 16 docentes de matemática y ciencias naturales de secundaria durante un taller de desarrollo profesional de verano. Como parte del taller, los docentes utilizaron en colaboración la taxonomía para diseñar nuevas actividades para sus clases. La retroalimentación de los docentes sobre la taxonomía fue en general positiva, pero surgieron inquietudes, como la solicitud de pasar del término *habilidades* a las *prácticas* más amplias y concretas para reforzar lo que significa usar estos conceptos, así como para reflejar cambios más grandes en los estándares matemáticos y científicos. Los docentes fueron especialmente cautelosos con la categoría de *Computación*, que incluía habilidades como la aplicación de lógica condicional, el uso de la lógica recursiva e iterativa, y la elección de estructuras de datos eficientes, ya que temían que estuviera demasiado cerca de la informática y demasiado lejos del contenido que enseñaban en sus clases.

Junto con la recopilación de comentarios de los docentes, la taxonomía también se presentó a expertos en pensamiento computacional y diseñadores de planes de estudio STEM. Estos expertos expresaron inquietudes en torno a la categoría de resolución de problemas, que incluía prácticas como descomponer problemas en sub-problemas y replantear problemas en problemas conocidos/familiares, ya que pensaban que las prácticas eran demasiado generales y no exclusivas de STEM o de contextos de pensamiento computacional. Esta retroalimentación condujo a otra ronda de revisiones, durante la cual consolidamos las categorías de Computación y Resolución de problemas para abordar las preocupaciones prácticas y teóricas planteadas. El resultado final de este proceso fue la taxonomía de **cuatro categorías** que consta de **22 prácticas** distintas que presentamos en la siguiente sección.

**Paso 5:** a lo largo del proceso de generación de la taxonomía, se realizaron entrevistas con profesionales de STEM cuyo trabajo depende en gran medida de la computación. Se llevaron a cabo quince entrevistas con profesores de las disciplinas de matemática y ciencias naturales, investigadores de STEM en la industria y estudiantes graduados que obtuvieron títulos en disciplinas de STEM.

Esto incluyó entrevistas con bioquímicos, físicos, ingenieros de materiales, astrofísicos, informáticos e ingenieros biomédicos. El objetivo de estas entrevistas era validar la taxonomía y las categorías emergentes a medida que tomaban forma, así como proporcionar datos suplementarios sobre la naturaleza del pensamiento computacional tal como sucede en entornos científicos auténticos.

Al analizar estas entrevistas, buscamos similitudes y diferencias en las prácticas computacionales en diferentes formas de investigación científica. A partir de ahí, identificamos y caracterizamos las prácticas de pensamiento computacional que los investigadores científicos emplearon en su trabajo.

Por ejemplo, descubrimos que las pruebas (ensayos) y la depuración eran una práctica común entre los investigadores científicos que no habían sido capturados claramente en la

taxonomía. A través de las entrevistas, aprendimos que la práctica de depuración podría caracterizarse de manera diferente para distintas formas de investigación.

Por ejemplo, para un investigador teórico, la "depuración" puede involucrar el proceso de verificar una solución a un problema desconocido, mientras que para un investigador experimental, las pruebas pueden involucrar el proceso de validación computacional de un experimento antes del ensayo real. Por lo tanto, la descripción de la depuración en la taxonomía debe reflejar esta diversidad. Un análisis completo de estos datos se presenta en un próximo documento (Beheshti et al. En preparación).

## El pensamiento computacional en la taxonomía de las prácticas de matemática y ciencias naturales

Nuestra taxonomía se divide en **cuatro categorías principales**: *prácticas de datos*; *prácticas de modelización y simulación*; *prácticas computacionales de resolución de problemas*; y *prácticas de pensamiento sistémico*. Cada una de estas categorías se compone de un **subconjunto de cinco a siete prácticas** (Fig. 2). Siguiendo el ejemplo establecido por los NGSS<sup>6</sup>, hemos elegido llamar a estas "prácticas" en lugar de "habilidades" o "conceptos" para "enfaticar que participar en la investigación científica requiere no solo habilidad, sino también de conocimiento específico para cada práctica" (NGSS Lead States 2013, p. 30). Aunque presentamos nuestra taxonomía como un conjunto de categorías distintas, las prácticas están altamente interrelacionadas y dependen unas de otras. En la práctica, a menudo se usan en conjunto para lograr objetivos científicos y matemáticos específicos.

En esta sección, **describimos cada una de las cuatro categorías principales**, incluidas sus prácticas constitutivas y nuestra justificación para su inclusión en la taxonomía. En la sección que sigue a la presentación de la taxonomía, presentamos tres actividades en el aula para demostrar cómo se ven las prácticas en el uso cotidiano.

**Tabla 3:** Dos ejemplos de pensamiento computacional en las prácticas de matemática y ciencias naturales con sus actividades asociadas y su faceta computacional.

Categoría	Código	Actividad	Faceta del pensamiento computacional
Datos e información	Manipulación de datos	Artistas de la red y del hip hop: esta actividad introduce a los estudiantes a la ciencia de redes	Los estudiantes normalizan los nombres de los músicos antes de ingresarlos en una hoja de cálculo. Luego, los estudiantes clasifican los datos por diferentes criterios para responder preguntas sobre el conjunto de datos.
Modelización y simulación	Evaluación del modelo y la simulación	Laboratorio de movimiento de proyectiles: en esta actividad los estudiantes generan datos con Microsoft Excel utilizando las ecuaciones que describen el movimiento	Se les pregunta a los estudiantes qué tan válido creen que es el modelo: los estudiantes identifican factores faltantes como la resistencia del aire.

<sup>6</sup> N de T: NGSS, por sus siglas del inglés de *Next Generation Science Standards*, o Nueva Generación de Estándares para la Ciencia, son un esfuerzo multiestatal en los Estados Unidos para crear nuevos estándares en ciencias que sean "ricos en contenido y práctica, organizados de manera coherente en todas las disciplinas y grados para proporcionar a todos los estudiantes una educación científica de referencia internacional".

**Figura 2:** Taxonomía de pensamiento computacional para matemática y ciencias naturales

<b>Prácticas con datos</b>	<b>Prácticas de modelización y simulación</b>	<b>Prácticas computacionales de resolución de problemas</b>	<b>Prácticas de pensamiento sistémico</b>
Recolección de datos	Uso de modelos computacionales para comprender un concepto	Preparación de problemas para soluciones computacionales	Investigación de un sistema complejo como un todo
Creación de datos	Uso de modelos computacionales para hallar y evaluar soluciones	Programación	Comprensión de las relaciones dentro de un sistema
Manipulación de datos	Evaluación de modelos computacionales	Elección de herramientas computacionales efectivas	Pensamiento en niveles
Análisis de datos	Diseño de modelos computacionales	Evaluación de diferentes soluciones/abordajes a un problema	Comunicación de información acerca de un sistema
Visualización de datos	Construcción de modelos computacionales	Desarrollo de soluciones computacionales modulares	Definición de sistemas y gestión de la complejidad
		Creación de abstracciones computacionales	
		Depuración y solución de problemas/detección de errores	

## Prácticas con datos

Todas las ciencias comparten ciertas características comunes en el núcleo de sus enfoques de resolución de problemas y preguntas. La principal de ellas es la actitud de que los datos y la evidencia tienen una posición principal en la decisión de cualquier problema (Duschl et al. 2007, p. 27). Los datos se encuentran en el corazón de las actividades científicas y matemática. Sirven para muchos propósitos, toman muchas formas y desempeñan una variedad de roles en la realización de investigaciones científicas. La naturaleza de cómo se recopilan, crean, analizan y comparten los datos está cambiando rápidamente principalmente debido a los avances en las tecnologías computacionales.

*“Las nuevas tecnologías permiten nuevas investigaciones científicas, lo que permite a los científicos explorar campos y manejar cantidades de datos previamente inaccesibles para ellos”* (NGSS Lead States 2013, p. 32).

La importancia de poder utilizar estas nuevas tecnologías para gestionar y dar sentido a las grandes cantidades de datos que se producen, se está convirtiendo en una característica definitoria del trabajo científico en el siglo XXI y, por lo tanto, es fundamental para el pensamiento computacional en matemática y ciencias (Foster 2006 ). La naturaleza cada vez más computacional de trabajar con datos en campos científicos y matemáticos subraya la importancia de desarrollar prácticas de datos de pensamiento computacional en el aula.

Las habilidades de datos han sido durante mucho tiempo parte de los estándares científicos y

matemáticos y de los planes de estudio escolares (NCTM 2000; NGSS Lead States 2013). La enseñanza sobre el uso de datos, a menudo se centra en desarrollar la comprensión de los estudiantes sobre el papel de los datos en la investigación de preguntas y el uso de datos para construir respuestas (Hancock et al. 1992; Lehrer y Romberg 1996). Parte del desafío es enseñar a los estudiantes que los datos no tienen una estructura inherente que conduzca directamente a una respuesta, sino que ese orden debe imponerse y las respuestas deben extraerse de los datos disponibles (Lehrer et al. 2002).

El uso de datos en el aula también incluye la introducción a los conceptos básicos de estadística y probabilidad para que los datos puedan usarse para sacar conclusiones (Shaughnessy 2007), así como para desarrollar fluidez con visualizaciones de datos tanto convencionales como novedosas (diSessa 2004).

Cada vez más, las aulas han incorporado la tecnología como parte de la enseñanza de la recopilación y el análisis de datos utilizando herramientas diseñadas específicamente para contextos educativos como Tinkerplots (Konold y Miller 2005), Fathom<sup>7</sup> (Finzer et al. 2001), SimCalc (Roschelle et al. 2000) y NetLogo (Wilensky 1999b), además de incorporar herramientas estándar de análisis de datos como Microsoft Excel, SPSS, R y STATA.

En nuestro análisis de las actividades de aprendizaje sobre pensamiento computacional para matemática y ciencias naturales, las prácticas de análisis de datos estuvieron presentes en 27 de las 34 actividades analizadas. Además, los expertos que entrevistamos con frecuencia hicieron referencia a la importancia del pensamiento computacional con respecto a la recopilación, gestión y análisis de datos en su trabajo. La importancia de esta categoría se destacó en una entrevista con un científico de materiales, quien cuando se le preguntó acerca de su investigación respondió: "*En casi todo, son solo datos numéricos en bruto*". Luego pasó a explicar cómo define computacionalmente sus preguntas de investigación, utiliza clusters de supercomputación para generar datos, procesos y organiza datos, y finalmente utiliza paquetes de software para generar visualizaciones de sus hallazgos. Las prácticas de pensamiento computacional son esenciales en cada paso de su trabajo. A continuación se presentan las **cinco prácticas** de pensamiento computacional que comprende la categoría de *Prácticas con Datos*.

### *Recolección de datos*

Los datos se recopilan mediante observaciones y mediciones. Las herramientas computacionales desempeñan un papel clave en la recopilación y el registro de una variedad de datos en muchos esfuerzos científicos y matemáticos diferentes. Las herramientas computacionales pueden ser útiles en diferentes fases de la recopilación de datos, incluido el diseño del protocolo de recopilación, grabación y almacenamiento. Los estudiantes que hayan dominado esta práctica podrán proponer protocolos sistemáticos de recopilación de datos y articular cómo esos protocolos pueden automatizarse con herramientas computacionales cuando sea apropiado.

### *Creación de datos*

Los datos se recopilan mediante observación y medición. Las herramientas computacionales desempeñan un papel clave en la recopilación y el registro de una variedad de datos en muchos esfuerzos científicos y matemáticos diferentes. Las herramientas computacionales pueden ser útiles en diferentes fases de la recopilación de datos, incluido el diseño del protocolo de recopilación, grabación y almacenamiento. Los estudiantes que hayan dominado esta práctica podrán proponer protocolos sistemáticos de recopilación de datos y articular cómo esos

---

<sup>7</sup> N de T: Fathom como tal no existe más al momento de realizada esta traducción (Feb., 2020) y en su reemplazo, el Concord Consortium, con la participación del propio Bill Finzer, ha desarrollado una plataforma similar a Fathom para la visualización y el análisis de datos llamada [CODAP](#).

protocolos pueden automatizarse con herramientas computacionales cuando sea apropiado.

### *Manipulación de datos*

En los campos de la matemática y las ciencias naturales, es esencial manipular los datos para darles sentido. Las herramientas computacionales permiten manipular de manera eficiente y confiable conjuntos de datos grandes y complejos. La manipulación de datos incluye ordenar, filtrar, limpiar, normalizar y unir conjuntos de datos dispares. Estas manipulaciones sirven tanto para el análisis como para la comunicación. Los estudiantes que hayan dominado esta práctica podrán manipular conjuntos de datos con herramientas computacionales, remodelando el conjunto de datos para que tenga una configuración deseada o útil para que pueda apoyar una investigación posterior.

### *Análisis de datos*

El verdadero poder de los datos reside en la información que se puede obtener de ellos a través del análisis. Existen muchas estrategias que pueden emplearse al analizar datos para su uso en un contexto científico o matemático, incluida la búsqueda de patrones o anomalías, la definición de reglas para clasificar los datos y la identificación de tendencias y correlaciones. Las herramientas computacionales se han vuelto esenciales para llevar a cabo el análisis de datos, ya que permiten analizar datos de una manera más confiable y efectiva y realizar análisis en conjuntos de datos más grandes de lo que de otra manera sería posible. El uso de herramientas computacionales para analizar datos se está convirtiendo en una práctica especialmente importante ya que ahora vivimos en una era de ciencia intensiva en datos (a veces denominada "big data"), donde los conjuntos de datos rutinariamente tienen miles de millones de puntos de datos individuales.

Los estudiantes que dominen esta práctica podrán analizar un conjunto dado de datos y hacer afirmaciones y sacar conclusiones basadas en los hallazgos de su análisis.

### *Visualización de datos*

La comunicación de resultados es un componente esencial de cualquier esfuerzo de construcción de conocimiento, y las herramientas computacionales pueden facilitar enormemente ese proceso. En matemática y ciencias, la creación de visualizaciones es una estrategia poderosa para analizar y compartir datos. Hay un número creciente de herramientas de software disponibles para diseñar e implementar visualizaciones de datos (Borner 2015). Estas herramientas incluyen visualizaciones convencionales como gráficos y tablas, así como pantallas dinámicas e interactivas que permiten al observador interactuar con los datos que se muestran. Los estudiantes que dominen esta práctica podrán usar herramientas computacionales para producir visualizaciones que transmitan la información recopilada durante el análisis.

## **Prácticas de modelización y simulación**

*Las ciencias no intentan explicar, apenas intentan interpretar, principalmente hacen modelos.* (von Neumann 1955, p. 628)

La capacidad de crear, modificar y usar modelos de fenómenos es una práctica central para científicos y matemáticos (NGSS Lead States 2013). En matemática y ciencias naturales, los modelos pueden incluir diagramas de flujo, diagramas, ecuaciones, fórmulas químicas,

simulaciones por computadora e incluso modelos físicos (Harrison y Treagust 2000). Por definición, los modelos son simplificaciones de la realidad que resaltan ciertas características de un fenómeno mientras se aproximan o ignoran otras características. Como tal, "*todos los modelos están equivocados, pero algunos son útiles*" (Box y Draper 1987, p. 424).

La utilidad de un modelo proviene de su poder explicativo y/o predictivo y mucha investigación ha encontrado que el aprendizaje basado en modelos es una estrategia pedagógica efectiva (para una revisión, ver Louca y Zacharia 2012).

Se considera que la educación científica está inseparablemente entrelazada con el desarrollo de prácticas epistémicas y de representación (Kaput 1998; Lehrer y Schauble 2006; Wilensky y Papert 2010; Wilkerson-Jerde et al. 2015), aunque estas prácticas rara vez se hacen explícitas como parte de la enseñanza. Se han hecho llamadas similares a la educación matemática. El NGSS y los estándares de Matemática ponen un nuevo énfasis en no solo usar modelos, sino también crear modelos e interrogar críticamente sus limitaciones y simplificar los supuestos.

Los modelos y simulaciones computacionales pueden hacer que los conceptos científicos sean más accesibles y mejorar la comprensión de los fenómenos por parte de los estudiantes (Buckley et al. 2004; Klopfer 2003; Parnafes 2007; Schwarz et al. 2007; White y Frederiksen 1998; Wilensky 1997; Wilkerson-Jerde y Wilensky 2015). Por modelos computacionales, nos referimos a representaciones no estáticas de fenómenos que pueden ser simulados a través de una computadora.

El poder pedagógico de los modelos computacionales proviene no solo de los estudiantes que usan los modelos existentes, sino también de permitirles diseñar, construir y evaluar sus propios modelos (Brady et al. 2015; Gilbert 2004; Penner 2000; White 1993; Wilensky 1995, 2003; Wilensky y Reisman 2006; Wilkerson-Jerde et al., 2015).

Además, los modelos computacionales permiten investigar preguntas y probar hipótesis que de otro modo serían demasiado caras, peligrosas, difíciles o totalmente imposibles de llevar a cabo (NRC 2011a). Al igual que con los modelos no computacionales, es importante que los estudiantes puedan pensar críticamente sobre los modelos computacionales para comprender sus capacidades y limitaciones.

De las 34 actividades de pensamiento computacional en matemática y ciencias naturales que analizamos, 23 incluyeron el uso de modelos computacionales en varias capacidades, incluso como herramientas para resolver problemas (7) y como herramientas para explorar conceptos (17). Además, estas actividades hicieron que los y las estudiantes diseñaran, construyeran y evaluaran modelos como parte de sus actividades educativas. Nuestra categoría de modelización y simulación consta de cinco prácticas de pensamiento computacional en matemática y ciencias, las cuales se describen a continuación:

#### *Uso de modelos computacionales para comprender un concepto*

Los modelos computacionales que demuestran ideas o fenómenos específicos pueden servir como poderosas herramientas de aprendizaje. Los estudiantes pueden usar modelos computacionales para profundizar su comprensión de conceptos matemáticos y científicos, como la interdependencia dentro de los ecosistemas, cómo se mueven los objetos en un entorno sin fricción o las distribuciones probabilísticas de eventos aleatorios. Dichas herramientas ayudan a respaldar el proceso de consulta al recrear fenómenos en entornos que apoyan la investigación sistemática y le dan al usuario mucho más control del que sería posible en el mundo natural. Los estudiantes que dominen esta práctica podrán avanzar en su propia comprensión de un concepto al interactuar con un modelo computacional que lo demuestre.

#### *Uso de modelos computacionales para hallar y evaluar soluciones*

Los modelos computacionales también se pueden usar para probar hipótesis y descubrir

soluciones a problemas. Permiten probar muchas soluciones diferentes de forma rápida, fácil y económica antes de comprometerse con un enfoque específico. Esto es especialmente útil para fenómenos cuyos resultados dependen de "espacios de parámetros multidimensionales". Esta es una técnica importante, comúnmente utilizada cuando se investigan problemas en campos científicos y más allá. Los estudiantes que dominen esta práctica podrán encontrar, evaluar y justificar el uso de una solución particular mediante el uso de un modelo computacional, así como también podrán aplicar la información obtenida mediante el uso del modelo cuando sea apropiado.

#### *Evaluación de modelos computacionales*

Una práctica clave en el uso eficaz de un modelo computacional es comprender cómo se relaciona el modelo con el fenómeno que se representa. Esta comprensión se guía por una variedad de preguntas que incluyen: *¿Qué aspectos del fenómeno se han modelizado fielmente y qué aspectos se han simplificado o ignorado? ¿Qué supuestos han hecho los creadores del modelo sobre el mundo y cómo afectan esos supuestos a su comportamiento? ¿Qué capas de abstracción se han incorporado al modelo mismo y cómo estas abstracciones dan forma a la fidelidad del modelo?*

Pensar en estas preguntas es una parte importante de la validación y calibración de un modelo con respecto a los fenómenos del mundo real que se representan. Los estudiantes que dominen esta práctica podrán articular las similitudes y diferencias entre un modelo computacional y el fenómeno que éste está modelizando, esto incluye plantear problemas de amenazas a la validez, así como identificar suposiciones integradas en el modelo.

#### *Diseño de modelos computacionales*

Parte de aprovechar el poder computacional en las disciplinas científicas es diseñar nuevos modelos que puedan ejecutarse en un dispositivo computacional. El proceso de diseño de un modelo es distinto de implementarlo realmente; diseñar un modelo implica tomar decisiones tecnológicas, metodológicas y conceptuales.

Hay muchas razones que podrían motivar el diseño de un modelo computacional, incluido el deseo de comprender mejor un fenómeno bajo investigación, probar una hipótesis o comunicar una idea o principio a otros de una manera dinámica e interactiva.

Cuando se diseña un modelo computacional, uno se enfrenta a un gran conjunto de decisiones, incluida la definición de los límites del sistema, decidir qué se debe incluir y qué se puede ignorar, y conceptualizar los comportamientos y las propiedades de los elementos incluidos en el modelo. A lo largo del proceso de diseño, uno debe asegurarse de que el modelo resultante pueda lograr el objetivo que inicialmente motivó el proceso de diseño del modelo.

Los estudiantes que dominen esta práctica podrán diseñar un modelo computacional, un proceso que incluye definir los componentes del modelo, describir cómo interactúan, decidir qué datos serán producidos por el modelo, articulando los supuestos que el modelo propuesto hace, y comprender qué conclusiones pueden extraerse del modelo.

#### *Construcción de modelos computacionales*

Una práctica importante en actividades científicas y matemática es la capacidad de crear modelos computacionales nuevos o ampliar los existentes. Esto requiere poder codificar las características del modelo de una manera que una computadora pueda interpretar. A veces, esto toma la forma de programación convencional, pero en otros casos, los marcos y las herramientas ayudan al usuario a definir comportamientos o características mediante la manipulación de interfaces gráficas o la definición de conjuntos de reglas a seguir.

Ser capaz de implementar ideas de modelado es fundamental para avanzar ideas más allá del

trabajo realizado por otros y complementa la práctica previa de diseñar modelos computacionales.

Los estudiantes que dominen esta práctica podrán implementar nuevos comportamientos del modelo, ya sea extendiendo un modelo existente o creando un nuevo modelo dentro de un marco de modelado dado o desde cero.

## **Prácticas computacionales de resolución de problemas**

La informática aplicada ahora desempeña el papel que la matemática desempeñó desde el siglo XVII hasta el siglo XX: proporcionar un marco ordenado, formal y un aparato exploratorio para otras ciencias. (Djorgovski 2005)

Como con gran parte del esfuerzo humano, la resolución de problemas es fundamental para la investigación científica y matemática. Si bien la resolución de problemas puede tomar muchas formas, en este trabajo, nos enfocamos en prácticas de resolución de problemas que son especialmente efectivas para trabajarlas con herramientas computacionales y derivadas del campo de la informática. Esta perspectiva se basa en el trabajo que busca prácticas de resolución de problemas en general (Newell y Simon 1972; Po'lya 1954), el poder de las herramientas computacionales para fomentar el desarrollo de tales estrategias (Clements y Gullo 1984; Palumbo 1990; Papert 1980), y el trabajo que lleva la resolución de problemas y las herramientas computacionales a dominios científicos (Guzdial 1994; Hambruch et al., 2009; Sengupta et al.2013; Wilensky 2001; Wilensky et al., 2014).

Esta categoría, más que las otras, se basa en prácticas y estrategias del campo de la informática, y tiene la intención de capturar la contribución del campo al trabajo científico y matemático contemporáneo y la importancia de que los estudiantes de hoy en día desarrollen este conjunto de habilidades (ACM Pathways 2013; Augustine 2005; Guzdial y Soloway 2003; Henderson et al.2007).

La investigación ha encontrado que permitir a los estudiantes explorar fenómenos científicos y matemáticos utilizando prácticas de resolución de problemas computacionales como la programación, el desarrollo de algoritmos y la creación de abstracciones computacionales, puede ayudar a los estudiantes a desarrollar una comprensión profunda de los fenómenos matemáticos y científicos (Jackson et al.1994; Sherin et al. 1993; Taub et al.2015; Wilensky 1995; Wilkerson-Jerde 2014).

Si bien relativamente pocos de los planes de clase que analizamos encajarían en un plan de estudios de informática convencional, muchas de las actividades incluyen conceptos que se basan en prácticas centrales del campo, incluido el desarrollo de algoritmos (5 planes), la programación (12 planes) y el trabajo con abstracciones computacionales (8 planes). Además, muchos de los científicos y matemáticos que entrevistamos, referenciaron prácticas de esta categoría, incluida la programación, el uso de abstracciones computacionales, y la importancia de poder elegir herramientas computacionales efectivas.

A partir de este análisis, la categoría resultante de resolución computacional de problemas consta de siete prácticas destinadas a sentar las bases para apoyar a los estudiantes para el pensamiento crítico con la computación que se está convirtiendo en un elemento central de la ciencia y la matemática modernas.

### *Preparación de problemas para soluciones computacionales*

Si bien algunos problemas se prestan naturalmente a soluciones computacionales, con mayor frecuencia, los problemas deben reformularse para que se puedan utilizar las herramientas computacionales existentes, ya sean dispositivos físicos o paquetes de software. En las ciencias, se puede emplear una amplia gama de herramientas computacionales para un objetivo determinado; el desafío es mapear los problemas apoyados en las capacidades de las

herramientas. Las estrategias para hacer esto incluyen descomponer problemas en subproblemas, reformular problemas nuevos en problemas conocidos para los que ya existen herramientas computacionales y simplificar problemas complejos para que el mapeo de las características del problema en soluciones computacionales sea más accesible.

Los estudiantes que dominen esta práctica podrán emplear tales estrategias para reformular los problemas en formas que puedan resolverse, o al menos progresar, mediante el uso de herramientas computacionales.

### *Programación de computadoras*

La capacidad de codificar instrucciones para que una computadora pueda ejecutarlas es una habilidad poderosa para investigar y resolver problemas matemáticos y científicos.

Programas que van desde scripts Python de diez líneas hasta bibliotecas C ++ multimillonarias en líneas de código, pueden ser valiosos para la recolección y análisis de datos, la visualización de información, la construcción y extensión de modelos computacionales, y para la interacción con otras herramientas computacionales existentes. Esta práctica consiste en comprender y modificar programas escritos por otros, así como crear nuevos programas o scripts desde cero.

Esta categoría incluye comprender conceptos de programación como lógica condicional, lógica iterativa y recursión, así como crear abstracciones tales como subrutinas y estructuras de datos. Si bien no es razonable esperar que todos los estudiantes sean expertos en programación, el dominio básico de la programación es un componente importante de la investigación científica del siglo XXI.

Los estudiantes que dominen esta práctica podrán comprender, modificar y crear programas de computadora y usar estas habilidades para avanzar en sus propias actividades científicas y matemática.

### *Elección de herramientas computacionales efectivas*

Una sola tarea a menudo se puede resolver de varias maneras diferentes usando una variedad de diferentes herramientas computacionales. En tales casos, a menudo hay una sola herramienta, o al menos un pequeño subconjunto de herramientas, para el trabajo. Ser capaz de identificar las fortalezas y debilidades de varias herramientas posibles para el problema en cuestión puede ser la decisión más importante en un proyecto.

Elegir una herramienta computacional efectiva incluye considerar la funcionalidad que proporciona, su alcance y nivel de personalización, el tipo de datos que las herramientas esperan y pueden producir, así como preguntas que van más allá del software en sí, tal como si hay o no un usuario activo de la comunidad que podría ayudarlo con las dificultades que pueda encontrar.

Los estudiantes que hayan dominado esta práctica podrán articular los pros y los contras del uso de varias herramientas computacionales y podrán tomar una decisión informada y justificable.

### *Evaluación de diferentes soluciones/abordajes a un problema*

Cuando hay múltiples enfoques para resolver un problema o múltiples soluciones para elegir, es importante poder evaluar las opciones y tomar una decisión informada sobre qué ruta seguir. Esta práctica es distinta de la práctica anterior en cuanto a que se refiere a cómo se utilizarán las herramientas computacionales, una vez elegidas, y cómo encajan con el proceso más amplio de abordar y resolver problemas.

Esto es importante en ciencias naturales y matemática, ya que a menudo hay más de un curso

de acción posible. Incluso si dos enfoques diferentes producen el mismo resultado correcto, hay otras dimensiones que deben considerarse al elegir una solución o enfoque, como el costo, el tiempo, la durabilidad, la extensibilidad, la reutilización y la flexibilidad.

Los estudiantes que dominen esta práctica podrán evaluar diferentes enfoques/soluciones a un problema en función de los requisitos y limitaciones del problema y los recursos y herramientas disponibles.

#### *Desarrollo de soluciones computacionales modulares*

Cuando se trabaja de cara a un resultado científico o matemático específico, a menudo hay una serie de pasos o componentes involucrados en el proceso. Estos pasos, a su vez, se pueden desglosar de varias maneras que afectan su capacidad de ser reutilizados, revaluados y depurados fácilmente. Los elementos de una solución pueden ser grandes, complicados y diseñados de manera única para el problema en cuestión, o pueden ser pequeños, modulares y reutilizables. El desarrollo de soluciones computacionales de forma modular y reutilizable tiene muchas implicaciones tanto para el problema inmediato como para los problemas futuros que pueden surgir. Al desarrollar soluciones modulares, es más fácil construir soluciones de forma incremental, probar componentes de forma independiente y aumentar la probabilidad de que los componentes sean útiles para problemas futuros.

Los estudiantes que dominen esta práctica podrán desarrollar soluciones que consisten en componentes modulares y reutilizables y aprovechar la modularidad de su solución tanto para trabajar en el problema actual como para reutilizar piezas de soluciones anteriores al enfrentar nuevos desafíos.

#### *Creación de abstracciones computacionales*

Crear una abstracción requiere la capacidad de conceptualizar y luego representar una idea o un proceso en términos más generales, al poner en primer plano los aspectos importantes de la idea y al mismo tiempo poner de relieve características menos importantes. La capacidad de crear y usar abstracciones es moneda corriente en asuntos matemáticos y científicos, ya sea creando abstracciones computacionales al escribir un programa, generando visualizaciones de datos para comunicar una idea o hallazgo, definiendo el alcance o la escala de un problema, o creando modelos para explorar o comprender más a fondo un fenómeno dado. Crear abstracciones computacionales es esencial para resolver múltiples problemas que tienen similitud estructural pero difieren en los detalles de la superficie. Estas prácticas son una forma central en que el poder computacional se puede aplicar a los problemas matemáticos y científicos.

Los estudiantes que dominen esta práctica podrán identificar, crear y usar abstracciones computacionales a medida que trabajan para alcanzar objetivos científicos y matemáticos.

#### *Depuración y solución de problemas/detección de errores (en inglés, "debugging & troubleshooting")*

La solución de problemas, en general, se refiere al proceso de averiguar por qué algo no funciona o por qué no se comporta como era esperable. Hay una serie de estrategias que se pueden emplear al resolver un problema técnico, incluida la identificación clara del problema, la prueba sistemática del sistema para aislar la fuente del error y la reproducción del problema para que las posibles soluciones se puedan probar de manera confiable. En ciencias de la computación, esta actividad a menudo se denomina "depuración" y hay una serie de estrategias y herramientas diseñadas específicamente para ayudar a descubrir por qué un programa u otra

herramienta computacional no se comporta como se esperaba. En los campos STEM, la capacidad de solucionar un problema es importante, ya que con frecuencia se encuentran resultados inesperados y comportamientos incorrectos, especialmente cuando se trabaja con herramientas computacionales. Los estudiantes que hayan dominado esta práctica podrán identificar, aislar, reproducir y, en última instancia, corregir problemas inesperados encontrados al trabajar en un problema, y hacerlo de manera sistemática y eficiente.

## **Prácticas de pensamiento sistémico**

En lugar de mirar una cosa a la vez, y notar su comportamiento cuando se exponen a otra cosa, las ciencias ahora observan una cantidad de cosas diferentes e interactivas y notan su comportamiento como un todo bajo diversas influencias.

(Laszlo 1996, p. 4)

Muchos de los problemas importantes que enfrentamos hoy en día son complejos, involucran múltiples variables, numerosos efectos directos e indirectos, y están compuestos por muchas partes interdependientes.

*"La capacidad de pensar sistémicamente es un hábito mental importante que respalda no solo los antecedentes científicos de la fuerza laboral STEM en desarrollo, sino también a los futuros ciudadanos alfabetizados en ciencias. En una sociedad global donde será necesario tomar decisiones futuras científicas a gran escala, es importante para la población en general desarrollar una mirada hacia el mundo orientada por el pensamiento sistémico"* (Duschl y Bismack 2013, p. 120).

El enfoque del pensamiento sistémico es fundamentalmente diferente de las formas tradicionales de resolución de problemas, y se enfoca en comprender cómo los sistemas cambian con el tiempo (Forrester J., 1968). El enfoque de pensamiento sistémico ha tenido dos focos distintos, uno con enfoque en la dinámica de los sistemas agregados (Forrester 1968; Sterman 2000), y el otro en la dinámica basada en agentes (Epstein y Axtell 1996; Grimm et al. 2005; Wilensky y Resnick 1999; Wilensky y Rand 2015). Ambos tipos de sistemas exhiben comportamientos emergentes (Bar-Yam 2003; Jacobson y Wilensky 2006; Sterman 2000; Wilensky y Resnick 1999). Con la aparición de tantos desafíos relacionados con los grandes datos, muchos métodos de pensamiento de sistemas se han convertido en componentes críticos de los enfoques de pensamiento computacional que se practican en todas las disciplinas científicas. Los análisis tradicionales se centran en descomponer los problemas en sus partes constituyentes y analizar por separado las piezas individuales. Los análisis del pensamiento sistémico, por el contrario, se centran en un examen inclusivo de cómo el sistema y sus partes constituyentes interactúan y se relacionan entre sí como un todo (Assaraf y Orion 2005).

Muchos conceptos científicos fundamentales (y difíciles) son mejor, y quizás solamente, entendidos a través de la lente de los sistemas. Algunos buenos ejemplos incluyen la selección natural y la dinámica de poblaciones en ecología, el sistema respiratorio humano en biología y las leyes de gases ideales en química y física (Hmelo et al. 2000; Stieff y Wilensky 2003; Wilensky y Reisman 2006). Otros tipos de sistemas, como los que se encuentran en la física, la economía e incluso la historia, involucran conceptos transversales relacionados con el pensamiento sistémico, como la retroalimentación, la emergencia, los "stocks" y los flujos (Goldstone y Wilensky 2008; Penner 2000; Wilensky y Rand 2015 ; Zuckerman y Resnick 2003). Las recomendaciones para la perspectiva de sistemas ahora están representadas en cuatro informes separados del NRC: *Taking Science to School* (NRC 2007), *A Framework for K-12 Science Education* (NRC 2012a), *Education for Life and Work* (NRC 2012c) y *DisciplineBased Education Research* (NRC 2012b), así como los Estándares de Ciencias de la Próxima Generación (NGSS

Lead States 2013). Si bien este conocimiento no está necesariamente vinculado al pensamiento computacional, las herramientas computacionales permiten nuevas formas de explorar, comprender y representar estas ideas (Bar-Yam 2003; Sterman 2000; Wolfram 2002). Por lo tanto, la computación sirve como un medio poderoso para hacer que estas ideas sean accesibles para los estudiantes (Klopfer 2003; Wilensky 2001).

En nuestro análisis de las actividades de clase de pensamiento computacional diseñadas para las clases de matemática y ciencias de la escuela secundaria, ocho actividades incluyeron el desarrollo de prácticas asociadas con el pensamiento sistémico. Estos hallazgos fueron reforzados por las entrevistas que realizamos con científicos y matemáticos, ya que frecuentemente citaban conceptos de sistemas complejos y prácticas asociadas con la investigación y la comprensión de los sistemas a través de la computación como importantes en su campo. Si bien muchas de las prácticas computacionales que describimos anteriormente son valiosas para investigar sistemas, esta sección presenta cinco prácticas de pensamiento computacional que se centran en el pensamiento sistémico.

### *Investigación de un sistema complejo como un todo*

Un sistema puede verse como una entidad única compuesta de muchos elementos interrelacionados; para algunas preguntas, es más efectivo investigar cómo funciona el sistema en su conjunto en lugar de estudiar cada elemento individual o conjunto de elementos. La investigación de un sistema complejo en su conjunto se basa en la capacidad de definir y medir entradas y salidas del sistema. Esto es especialmente crítico en las ciencias porque muchos fenómenos son el resultado de interacciones muy grandes y complejas. Ser capaz de poner en recuadro negro los detalles de las interacciones sistemáticas subyacentes y centrarse en el sistema en su conjunto permite comprender las características del sistema en conjunto, que a veces son exactamente los datos necesarios para el problema en cuestión.

Las herramientas computacionales, como los modelos y las simulaciones, son especialmente útiles en tales investigaciones, ya que pueden automatizar piezas de una investigación, tomar medidas precisas y modelar sistemas para probar hipótesis y realizar análisis posteriores. Otro enfoque poderoso para facilitar a los estudiantes el aprendizaje de sistemas complejos en su conjunto, puede provenir del uso de representaciones (que incluyen comentarios, *stocks* y flujos, agentes y reglas de agentes) que representan los sistemas de forma no lineal.

Los estudiantes que dominen esta práctica podrán plantear preguntas, diseñar y llevar a cabo investigaciones sobre, y en última instancia interpretar y dar sentido a, los datos recopilados acerca de un sistema como una entidad única.

### *Comprensión de las relaciones dentro de un sistema*

Mientras que algunas preguntas pueden responderse mejor al enfocarse en un sistema como un todo, otras preguntas requieren entender cómo interactúan los componentes dentro de un sistema.

Por lo tanto, es importante poder identificar los diferentes elementos de un sistema y articular la naturaleza de sus interacciones. Las herramientas computacionales son útiles para realizar dicha investigación, ya que pueden proporcionar a los y las estudiantes controles para aislar diferentes elementos, investigar sus comportamientos y explorar cómo interactúan con otros componentes del sistema.

Los estudiantes que dominen esta práctica podrán identificar los elementos constitutivos de un sistema, articular sus comportamientos y explicar cómo las interacciones entre los elementos producen los comportamientos característicos del sistema.

### *Pensamiento en niveles*

Los sistemas se pueden entender y analizar desde diferentes perspectivas, desde una vista a nivel micro que considera los elementos más pequeños del sistema, hasta una mirada a nivel macro que considera el sistema como un todo. Pensar en un sistema desde el punto de vista de sus actores y componentes individuales puede conducir a ideas sobre cómo los comportamientos de nivel micro conducen a patrones emergentes a nivel macro. Por otro lado, ser capaz de "cajanegrizar"<sup>8</sup> los detalles de las interacciones sistemáticas subyacentes y enfocarse en el sistema en su conjunto permite comprender las características emergentes del sistema como un todo, lo que puede generar un conjunto diferente de ideas a partir de un análisis a nivel micro. Las herramientas computacionales pueden facilitar la investigación de un sistema desde ambas perspectivas y, tal como muestran Levy y Wilensky (2008), desde niveles medios productivos entre los dos.

Los estudiantes que dominen esta práctica podrán identificar diferentes niveles de un sistema dado, articular el comportamiento de cada nivel con respecto al sistema en su conjunto y podrán moverse hacia adelante y hacia atrás entre niveles, atribuyendo correctamente las características del sistema al nivel apropiado.

### *Comunicación de información acerca de un sistema*

Un desafío central al investigar un sistema es descubrir la mejor manera de comunicar lo que se ha aprendido sobre él. Esto a menudo es un desafío debido al tamaño y la complejidad del sistema bajo investigación. Debido a que los sistemas a menudo consisten en muchas partes interrelacionadas y pueden incluir numerosos elementos que interactúan, transmitir información sobre el sistema puede ser difícil, pero también es esencial para que la información obtenida del sistema sea comprendida y utilizada por otros. La comunicación de información sobre un sistema, a menudo implica el desarrollo de visualizaciones e infografías<sup>9</sup> efectivas y accesibles que resaltan los aspectos más importantes de lo que se ha aprendido sobre el sistema, de tal manera que alguien que no conoce todos los detalles subyacentes pueda entenderlo. Esta práctica incluye la capacidad de priorizar las características de un sistema, diseñar formas intuitivas para representarlo e identificar lo que puede quedar fuera de la visualización sin comprometer la información que se transmite.

Los estudiantes que dominen esta práctica podrán comunicar la información que han aprendido sobre un sistema de manera que la información sea accesible para los espectadores que no conocen los detalles exactos del sistema del que se extrajo la información.

### *Definición de sistemas y gestión de la complejidad*

Cualquier cosa puede ser vista como un sistema; el tamaño y la cantidad de elementos del sistema dependen de dónde defina sus límites. Se puede tener sistemas muy pequeños que incluyan solo un conjunto estrecho de entidades, como un sistema de aula que consta de un docente y estudiantes, o se puede tener sistemas que incluyen millones de entidades, como un grupo de galaxias o el genoma humano. Cuanto más grande es el sistema, en términos de cantidad de entidades, tipos de entidades, frecuencia de interacciones y diversidad de comportamiento, más complejo se vuelve. La decisión de dónde establecer los límites del

<sup>8</sup> N de T: Del inglés "to black box". Alude al proceso de meter algo dentro de una caja negra, como una forma de invisibilizar lo que ocurre dentro. En una caja negra, se observan las señales de entrada y de salida, pero no lo que ocurre dentro. La "caja negra" es una técnica utilizada para enseñar sobre el método científico.

<sup>9</sup> Por infografía, nos referimos a una abstracción visual que comunica información. Incluye formatos convencionales como gráficos, cuadros y mapas, pero también incluye visualizaciones interactivas y dinámicas diseñadas con el objetivo expreso de comunicar información al espectador.

sistema es fundamental para cualquier investigación que siga, ya que determina qué preguntas puede responder, así como el tamaño y la complejidad del sistema. Además, para aprovechar las herramientas computacionales al trabajar con sistemas, uno debe delinear explícitamente los límites de los sistemas que están bajo investigación. Es importante poder definir un sistema de una manera que sea útil y productiva. Esto incluye crear un sistema que incluya todos los elementos necesarios para poder lograr el objetivo deseado al tiempo que limita su tamaño, complejidad y alcance.

Los estudiantes que dominen esta práctica podrán definir los límites de un sistema para luego poder usar el sistema resultante como un dominio para investigar una pregunta específica, así como para identificar formas de simplificar un sistema existente sin comprometer su capacidad de ser utilizado para un propósito específico.

## **Pensamiento computacional en matemática y ciencias en la práctica**

Como parte de nuestro esfuerzo por llevar el pensamiento computacional a las aulas de matemática y ciencias naturales, estamos desarrollando una serie de planes de clase ejemplares de pensamiento computacional para matemática, biología, química y física del nivel secundario. Estos planes de clase responden a nuestra taxonomía, y son introducidos en talleres de desarrollo profesional y enseñados por docentes sin antecedentes formales en pensamiento computacional o ciencias de la computación. Estos planes de clase han sido diseñados para ser fácilmente adoptados e incorporados en la currícula de matemática y ciencias naturales. Aquí presentamos tres planes de clase que demuestran el pensamiento computacional en las prácticas de matemática y ciencias (CT-MS) descritas en nuestra taxonomía<sup>10</sup>.

### **Videojuegos: ¿Hechos físicos o ficción?**

Esta actividad está diseñada para clases de física de la escuela secundaria y hace que los estudiantes investiguen las leyes de la física que rigen los videojuegos. Dependiendo del juego seleccionado, los estudiantes calculan la constante gravitacional (por ejemplo, en Angry Birds) y/o la conservación de la energía y el impulso (por ejemplo, en Asteroids).

La actividad comienza con los estudiantes creando un *screencast* de 20 a 30 segundos de ellos mismos jugando el juego, luego usan [Physics Tracker](#) (Brown 2013), una herramienta de transcripción de video y análisis computacional, para recopilar datos (Práctica CT-MS: Recolección de datos). Dentro de Physics Tracker, los estudiantes visualizan los datos, graficando el tiempo, la posición, la velocidad, la aceleración y otros parámetros físicos relevantes (Práctica CT-MS: Visualización de datos). Luego utilizan las herramientas de análisis de Tracker para identificar el mejor ajuste entre los datos y su función matemática (Práctica CT-MS: Análisis de datos). Los estudiantes obtienen las propiedades que definen el comportamiento del mundo, como encontrar la constante gravitacional en Angry Birds (Práctica CT-MS: Uso de modelos computacionales para hallar y evaluar soluciones). Una vez respondida esta pregunta, los estudiantes evalúan el videojuego como modelo, identifican diferencias con el mundo real y comunican por qué esas elecciones de diseño ayudan a la usabilidad del juego (Prácticas CT-MS: Evaluación de modelos computacionales, Comunicación de información acerca de un sistema).

### **Secuenciación de ADN desde cero**

Esta actividad está diseñada para las clases de biología de la escuela secundaria y hace que

---

<sup>10</sup> Para más información (en inglés) sobre los planes de clase, incluidos materiales y software, visitar el siguiente enlace: <http://ct-stem.northwestern.edu>

los estudiantes imaginen que son científicos en la década de 1990 enfrentados con la tarea de secuenciar todo el genoma humano. Los estudiantes comienzan con un caso simple de volver a armar un verso de una canción familiar que se ha roto en pedazos y se ha re-organizado al azar. Después de reflexionar sobre este acertijo y las estrategias que desarrollaron para volver a ensamblar las letras (Práctica CT-MS: Evaluación de diferentes soluciones/abordajes a un problema), los estudiantes continúan con un desafío más difícil: reconstruir una contraseña desconocida con una combinación desconocida de letras y números. Luego aplican su técnica del rompecabezas de contraseñas para derivar en un algoritmo eficiente, robusto y general para secuenciar cosas (Prácticas CT-MS: preparación de problemas para soluciones computacionales, creación de abstracciones computacionales). Después de determinar su técnica para ensamblar la secuencia de ADN completa, los estudiantes escriben su procedimiento en pseudocódigo, con la intención de ser el primer paso para expresar el algoritmo de manera que una computadora pueda interpretarlo y ejecutarlo (Práctica CT-MS: Programación). Luego, los compañeros de clase intercambian algoritmos, intentan implementarlos y ofrecen sugerencias para mejorar en términos de claridad y eficiencia (Práctica CT-MS: Evaluación de diferentes soluciones/abordajes a un problema). Al final de la actividad, se les pide a los estudiantes que consideren por qué las computadoras fueron tan esenciales para lograr la tarea de secuenciar el genoma humano. Al hacerles pensar y experimentar sobre cómo escalar el problema de un caso simple a un problema más complejo, los estudiantes desarrollan una apreciación por la velocidad de procesamiento que proporcionan las computadoras y cómo la computación ha revolucionado las preguntas que hacemos y la forma en que hacemos ciencia.

### **Leyes de los gases**

En esta lección de química de la escuela secundaria, los estudiantes usan una simulación interactiva para explorar las relaciones entre las propiedades macroscópicas de los gases (presión, volumen y temperatura) en función de cómo emergen estas propiedades de las interacciones microscópicas (es decir, el movimiento de las partículas de gas y la interacción con las paredes del contenedor).

La herramienta es parte del conjunto de simulaciones PhET (Adams et al. 2008a, b) que se ha encontrado ayuda a los estudiantes a construir comprensiones conceptuales de los conceptos que se están modelizando (Práctica CT-MS: Uso de modelos computacionales para comprender un concepto) y es basado en el kit de herramientas anterior de modelado GasLab (Wilensky 1999a). Los estudiantes exploran los comportamientos de los gases ejecutando experimentos, cuyo resultado se almacena en una hoja de cálculo (Práctica CT-MS: Creación de datos). Luego, los estudiantes visualizan sus datos y los grafican en varios formatos para encontrar la forma más convincente de explicar la relación entre las variables y los compañeros de clase (Prácticas CT-MS: Análisis de datos, Visualización de datos). La simulación permite a los estudiantes investigar tanto los comportamientos microscópicos a nivel de agente como las propiedades macroscópicas agregadas de gases (Práctica CT-MS: Pensamiento en niveles). Luego, los estudiantes visualizan sus datos y los grafican en varios formatos para encontrar la forma más convincente de explicar la relación entre las variables a sus compañeros de clase (Prácticas CT-MS: Análisis de datos, Visualización de datos). La simulación permite a los estudiantes investigar tanto los comportamientos microscópicos a nivel de agente como las propiedades macroscópicas agregadas de gases (Práctica CT-MS: Pensamiento en niveles). Al final de la actividad, se pregunta a los estudiantes si hay aspectos de la simulación que no son realistas o que son diferentes a lo que ocurre en el mundo real. También se les pide a los estudiantes que reflexionen sobre la diferencia entre explorar las leyes de los gases con modelos y tratar de realizar experimentos de mesa (Práctica CT-MS: Evaluación de modelos computacionales). Para deducir las leyes de los gases, los estudiantes deben considerar el sistema en su conjunto, analizar los detalles de las interacciones subyacentes y centrarse en identificar y medir las

entradas y salidas del sistema agregado (Práctica CT-MS: Investigación de un sistema complejo como un todo).

## Conclusión

Este artículo aboga por la inclusión del pensamiento computacional en las aulas de matemática y ciencias naturales. Vemos tres beneficios principales para el enfoque de incorporar el pensamiento computacional en estos contextos: (1) se basa en la relación recíproca para el aprendizaje entre el pensamiento computacional y los dominios matemático y científicos, (2) aborda las preocupaciones prácticas de llegar a todos los estudiantes y tener docentes competentes, y (3) pone la educación en ciencias naturales y matemática más en línea con las prácticas profesionales actuales en estos campos. Hemos presentado una taxonomía que articula una definición de "pensamiento computacional en matemática y ciencias naturales" y aporta un lenguaje en torno al cual pueden desarrollarse estándares, planes de estudio y evaluaciones. Al hacerlo, abordamos el tema de la ambigüedad y la falta de precisión que ha plagado gran parte de la discusión en torno al pensamiento computacional. Vemos el trabajo presentado en este documento como un primer paso en el proceso de llevar el pensamiento computacional a las clases de matemática y ciencias. Lograr este objetivo requiere el apoyo de un conjunto diverso de partes interesadas para tener éxito. Esto incluye que los docentes se sientan cómodos enseñando el material y que reciban desarrollo profesional en actividades basadas en computadora y en tecnología; que los administradores escolares asignen recursos para apoyar su inclusión; que los formuladores de políticas prioricen el pensamiento computacional como parte de la educación matemática y científica; que los desarrolladores de currículum y evaluación produzcan materiales de pensamiento computacional destinados a la enseñanza de las ciencias naturales y la matemática; y que la comunidad en general apoye el esfuerzo de llevar el pensamiento computacional a estos espacios educativos. La inclusión del pensamiento computacional como una práctica científica central en los Estándares de Ciencias de la Próxima Generación y un lenguaje similar en los estándares de matemática son hitos importantes, pero aún queda mucho trabajo por hacer para abordar el desafío de educar a una población tecnológica y científicamente inteligente y preparar el próxima generación de científicos de clase mundial.

**Referencias:** Weintrop, D., Beheshti, E., Horn, M., Orton, K., Jona, K., Trouille, L., & Wilensky, U. (2016). Defining Computational Thinking for Mathematics and Science Classrooms. *Journal of Science Education and Technology*, 25(1), 127–147.  
<https://doi.org/10.1007/s10956-015-9581-5>  
(2016).

**Agradecimientos:** Este trabajo es apoyado por la *National Science Foundation* bajo el Grant CNS-1138461. Sin embargo, las opiniones, hallazgos, conclusiones y/o recomendaciones son de los investigadores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la Fundación.