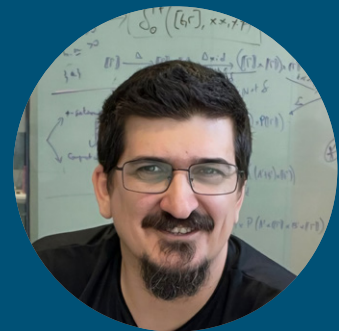




Lógica y computación cuántica:

Un camino a través de los
vaivenes políticos de la Argentina



ALEJANDRO DÍAZ-CARO

Doctor en Ciencias de la Computación por la Université de Grenoble, Francia. Actualmente es profesor en la Universidad Nacional de Quilmes y en la Universidad de Buenos Aires, e investigador de CONICET, Argentina. Sus líneas de investigación son lógica formal, teoría de la computación cuántica, y la conexión entre ellas a través de los lenguajes de programación.

✉ alejandro@diaz-carro.info

🌐 <https://staff.dc.uba.ar/adiazcaro/>



RESUMEN. En este artículo, comparto mi trayectoria como investigador en computación cuántica, entrelazándola con la historia de la ciencia en Argentina. Desde mis inicios como estudiante en Rosario, pasando por mi formación doctoral en Francia y mi posterior repatriación, describo los desafíos y logros de investigar en un contexto de inestabilidad política y económica. A pesar de las dificultades, destaco avances significativos en el campo, como el desarrollo de lenguajes de programación cuántica y el estudio de la relación entre lógica y computación cuántica. Espero que este relato contribuya a comprender la importancia de la cooperación internacional y la necesidad de políticas científicas sostenibles para fomentar la investigación en países como Argentina.

Introducción

La mecánica cuántica, la teoría que describe el mundo subatómico, tiene un vínculo sorprendente con la computación. Los principios de la mecánica cuántica, como la superposición y la medición, pueden utilizarse para crear un nuevo tipo de computación: la computación cuántica.

La computación cuántica utiliza *qubits*, que son bits cuánticos capaces de representar múltiples estados a la vez (ver Figura 1). Esto permite a las computadoras cuánticas realizar cálculos que serían imposibles, en términos realistas, para las computadoras clásicas. La computación cuántica tiene el potencial de revolucionar campos como la criptografía, la ciencia de los materiales y la medicina.

Cuando comencé a interesarme por la computación cuántica, más o menos

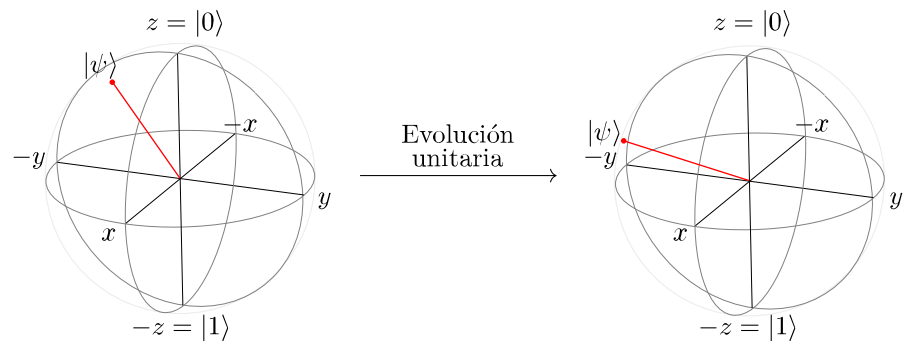


Figura 1. Transformación de un qubit. Un qubit se representa como un punto en la superficie de la esfera. El análogo a los bits clásicos serían sólo las posiciones marcadas como $|0\rangle$ y $|1\rangle$. La transformación de un qubit es una rotación en la esfera, en este ejemplo, se hace una rotación de $\pi/4$ sobre el eje y .

por el año 2005, mientras estudiaba ciencias de la computación en la Universidad Nacional de Rosario, había muy pocos investigadores en Argentina dedicados a este tema, desde las ciencias de la computación. Los únicos grupos de investigación consolidados en el área, eran de físicos. Sólo pude dar con un profesor, especialista en criptografía, quien se estaba interesando en el tema e impartiendo algunos cursos introductorios. Luego de algunos años de aprender todo lo que pude por mi cuenta, sin un tutor, en 2008, al finalizar mi licenciatura, obtuve una beca del Gobierno francés para realizar mi doctorado allí. En Grenoble, tuve la suerte de encontrarme con un grupo de investigadores que estaban trabajando en lenguajes de programación para la computación cuántica. Fue allí donde comencé a investigar sobre el tema, bajo la dirección del Dr. Pablo Arrighi.

Contexto histórico y desarrollo científico en Argentina

En paralelo a mi historia, debo contar que en Argentina, las ciencias de la com-

putación comenzaron un tanto tarde. Si bien la primera computadora en Argentina y la creación del Instituto del Cálculo de la Universidad de Buenos Aires data de los años sesenta, los diversos gobiernos militares se encargaron de intentar destruir el desarrollo científico argentino, y la computación no fue una excepción. No fue sino hasta los años ochenta, con la vuelta a la democracia, que la ciencia comenzó a recuperarse. Las ciencias de la computación, en particular, tuvieron un gran impulso hacia fines de los ochenta, con la creación de la Escuela Superior Latinoamericana de Informática (ESLAI), una institución de mucho prestigio en la región, que trajo a investigadores renombrados de todo el mundo para formar en el país una tradición científica en computación. Lamentablemente, en los noventa, con la crisis económica, la situación cambió nuevamente, y la ciencia en general sufrió un gran retroceso, con el cierre del ingreso a la carrera de investigador científico de CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), la partida de numerosos científicos al extranjero, y, en computación en particular, el desfinanciamiento y cierre definitivo de la ESLAI. Sólo tres generaciones de graduados tuvo esta escuela durante esos años, quienes dieron importantes



frutos en la región, en particular, algunos de ellos ayudaron a la creación de la carrera de ciencias de la computación en Rosario, donde yo pude estudiar.

A principios de este siglo, la situación comenzó a cambiar nuevamente. En 2003 el ingreso a CONICET fue reabierto, y se creó el programa Raíces, acrónimo de Red de Argentinos Investigadores y Científicos en el Exterior, que permitió la articulación con científicos argentinos desparramados por el mundo, así como también la repatriación de muchos de ellos. En 2007, se creó el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, que dio un gran impulso a la recuperación de la ciencia en Argentina.

Inicios de mi desarrollo académico

En 2011, finalicé mi doctorado, que consistió en definir un lenguaje de programación abstracto (una extensión al cálculo lambda tipado), para computación cuántica. Luego fui a hacer un postdoctorado a París, con el Dr. Michele Pagani, trabajando en lógica lineal, una lógica muy ligada a la computación cuántica, y luego de ese primer postdoctorado obtuve un cargo docente interino en la Universidad de Nanterre, en las afueras de París, integrando el grupo del Dr. Gilles Dowek en Inria, con quienes trabajamos en algunos refinamientos del cálculo lambda para cuántica.

La lógica y la computación, dos campos aparentemente distintos, están profundamente conectados. Esta conexión, conocida como el isomorfismo de Curry-Howard, establece que las pruebas lógicas pueden verse como programas y las proposiciones lógicas como tipos de datos. Esto significa que podemos usar la lógica para diseñar y verificar programas, y viceversa, usar programas para representar y manipular conceptos lógicos (ver Figura 2).

En 2003 el ingreso a CONICET fue reabierto, y se creó el programa Raíces, que permitió la repatriación de muchos [...] científicos argentinos desparramados por el mundo.

Lógica	Lenguajes de programación
Proposiciones	Tipos
Pruebas	Programas
Verificación de una prueba	Verificación de tipos
Simplificación de una prueba	Evaluación de un programa

Figura 2. Correspondencia de Curry-Howard.

Este isomorfismo tiene un impacto significativo en el diseño de lenguajes de programación y herramientas de verificación de software. Lenguajes como Haskell y herramientas como Coq se basan en esta correspondencia para crear software más confiable y eficiente.

La conexión entre la mecánica cuántica y la computación, implica que debe existir también una profunda relación entre la física cuántica y los fundamentos de la lógica y la teoría de tipos. La correspondencia de Curry-Howard, que une la lógica y la computación clásica, puede extenderse al dominio cuántico, creando un nuevo campo de investigación con un gran potencial. Esa es el área en la que me especialicé, y en la que he estado trabajando durante los últimos años.

Regreso a Argentina y consolidación científica

En 2014, ante el auge de la repatriación de científicos en Argentina, las promesas de crecimiento y las perspectivas de un lugar con todo por hacer, pero con la voluntad política de hacerlo, decidí vol-

ver a mi país, repatriado por el programa Raíces. El programa otorgaba facilidades a la universidad que me contrataba para pagar mi salario, y a mí para realizar una mudanza internacional con mi grupo familiar. Así fue como llegué a la Universidad Nacional de Quilmes, donde un profesor que también se formó en la ES-LAI, el Dr. Pablo E. Martínez López, había creado en 2007 una carrera de computación de tres años de duración y que, para 2014, estaba creando la Licenciatura en Informática, con la promesa de muchos nuevos cargos de profesor para reclutar docentes para dicha carrera. En 2016, además, ingresé a la carrera de investigador científico de CONICET.

A mi llegada a Quilmes, me integré al grupo de investigación en lógica y reescritura de lenguajes dirigido por el Dr. Eduardo Bonelli, que contaba con Martínez López y tres estudiantes de doctorado en ese entonces: Pablo Barenbaum, Carlos Lombardi y Andrés Viso. El clima que se vivía en el país era de mucha eferescencia científica, con el Dr. Adrián Paenza, un divulgador científico muy conocido en Argentina, que había logrado que la televisión pública emitiera un programa de divulgación científica periódico, y con alta audiencia. Decir que uno



era profesor universitario y científico era algo que generaba respeto y admiración en la sociedad. La ciencia estaba de moda. Muchas vocaciones científicas se despertaron en esos años.

En 2015 obtuve un subsidio del programa STIC-AmSud de cooperación con Francia, con la participación de instituciones de Argentina, Francia y Brasil. El proyecto consistía en el estudio de la relación entre la lógica lineal, un tipo de lógica que se utiliza para modelar sistemas en los que los recursos son limitados y no pueden duplicarse ni descartarse arbitrariamente, y la computación cuántica, y, en particular, en la creación de un lenguaje de programación que capturara las características esenciales de la computación cuántica. Fruto de este proyecto, obtuvimos importantes avances, entre ellos, el primer lenguaje de programación con control de flujo cuántico, que abría las puertas al estudio de la lógica subyacente a la computación cuántica, fundamentada por las ciencias de la computación.

Impacto de cambios políticos en la ciencia

Al finalizar este proyecto, obtuve un subsidio del programa ECOS-Sud, el cual es un programa de cooperación internacional entre Argentina y Francia, para continuar con la investigación en la relación entre las lógicas resultantes de los lenguajes obtenidos anteriormente y la computación cuántica. Lamentablemente la situación cambió en 2016, con la llegada de un nuevo gobierno al poder. La nueva administración, con una visión completamente opuesta a la anterior, desfinanció la ciencia, degradó el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva a una Secretaría de Estado, y despidió a personal de apoyo y administrativo en los organismos de ciencia. Quizá lo más grave de ese período, fue desde lo simbólico: se realizó una activa

campaña de desprestigio de la ciencia argentina desde el gobierno y los medios de comunicación afines a éste. La ciencia dejó de estar de moda. Muchos científicos se fueron del país, y muchos jóvenes que estaban interesados en la ciencia, desistieron de seguir esa vocación. Si en 2014 decir que uno era científico generaba admiración, en 2016 generaba desconfianza, un científico pasó de ser quien iba a lograr sacar adelante al país, con la creación y difusión de conocimiento, a un trabajador del Estado que gastaba dinero de los impuestos en cosas inútiles. La ciencia pasó a ser vista como un gasto, y todos los proyectos científicos fueron desfinanciados. También la creación de la Licenciatura en Informática en la Universidad Nacional de Quilmes quedó sin financiamiento, y sólo soportada por los escasos fondos propios de la universidad. Entre los que se fueron del país, se encuentra el Dr. Eduardo Bonelli, quien emigró justo antes del cambio de gobierno, dejándome a mí a cargo del grupo de investigación. Mi proyecto ECOS-Sud se vio interrumpido unilateralmente y sin explicación alguna, por el Gobierno argentino, y sólo financiado por el Gobierno francés. Ante este panorama, y el hecho de que estaba considerando a tres candidatos a doctorado para comenzar sus tesis conmigo en un futuro próximo, decidí cambiar mi radicación como investigador CONICET a la Universidad de Buenos Aires, ya que la suspensión de las promesas de nuevos cargos en la Universidad Nacional de Quilmes, la dejaba sin la posibilidad del crecimiento científico que se pretendía. Entre medio, realicé una estancia de investigación de 6 meses en la Universidad de Turín, Italia, lo que me dio un poco de aire para pensar en cómo continuar con la investigación en computación cuántica en Argentina. Al volver, seguí vinculado como docente-investigador en Quilmes, pero también vinculado a la Universidad de Buenos Aires desde donde seguí dirigiendo el grupo que me había dejado Bonelli, ahora ya con Pablo Barenbaum doctor, e investigador de CONICET en Quilmes, como

La correspondencia de Curry-Howard, que une la lógica y la computación clásica, puede extenderse al dominio cuántico, creando un nuevo campo de investigación con un gran potencial.

parte del grupo, y con la incorporación de mis tres doctorandos: Cristian Sottile, Malena Ivnisky y Rafael Romero.

Más colaboraciones internacionales y nuevos proyectos

Hacia el final del proyecto ECOS-Sud, obtuve un segundo subsidio del programa STIC-AmSud. Esta vez, con la participación de Argentina, Uruguay, Chile y Francia, continuamos las mismas líneas de investigación, pero agregamos las primeras aplicaciones hacia la formalización de un análisis del tiempo de ejecución de programas cuánticos. Este trabajo lo realizamos junto al Dr. Federico Olmedo de la Universidad de Chile. Aunque también fui el director internacional de este nuevo proyecto, todos los países involucrados proporcionaron financiamiento, excepto Argentina. Esto me limitó a recibir visitas académicas de los otros países, pero no pude realizar visitas académicas en el marco de este proyecto. Durante estos años de desfinanciamiento de la ciencia argentina, realicé múltiples visitas académicas a Francia, Uruguay, Paraguay y Chile, todas financiadas por el país anfitrión, y recibí innumerables visitas gracias a los proyectos que dirigí, financiadas todas por el país de origen. Estas limitaciones presupuestarias, si bien no afectaron mi interacción con los investigadores con



los que ya colaboraba, sí afectaron la posibilidad de nuevas colaboraciones, en particular, al no tener ningún tipo de financiamiento para asistir a congresos internacionales.

A finales de 2019, con la llegada de un nuevo gobierno al poder, la situación comenzó a cambiar. Se volvió a crear el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, el desprestigio de la ciencia dejó de ser una política de gobierno, y otra vez se volvió a una recuperación lenta del sistema científico argentino, diezmado durante los anteriores cuatro años. La pandemia por COVID-19, sin embargo, impidió a muchos realizar las visitas académicas que tenían previstas, por lo cual el programa ECOS-Sud decidió extender la finalización de los proyectos en curso dos años más. Esto hizo que mis dos proyectos, ECOS-Sud y STIC-AmSud finalicen el mismo año, y me dejen sin posibilidad de pedir una continuación, ya que estos programas no permiten la renovación inmediata. Consecuencia de esto es que, en 2022, me vi sin financiamiento para continuar con la investigación en computación cuántica, y sin la posibilidad de enviar a mis doctorandos a congresos internacionales, lo cual es fundamental para su formación. Tuve que buscar otras estrategias, como detallaré en la próxima sección.

Situación actual y perspectivas futuras

Los problemas mencionados aquí, son los que enfrentamos habitualmente los científicos argentinos, ya que la financiación de la ciencia en Argentina no constituye una política de Estado que trascienda y se sostenga durante las sucesivas gestiones gubernamentales. Ante esa inestabilidad los investigadores nos vemos obligados a depender de financiación extranjera, sin la cual, no hay cooperación posible.

Lo más grave de ese período [2016, con la llegada de un nuevo gobierno al poder] fue desde lo simbólico: se realizó una activa campaña de desprestigio de la ciencia desde el gobierno y los medios de comunicación afines a éste [...] Un científico pasó de ser quién iba a lograr sacar adelante al país, con la creación y difusión de conocimiento, a un trabajador del Estado que gastaba dinero de los impuestos en cosas inútiles.



Edificio "Cero + Infinito" de la Universidad de Buenos Aires.

Luego de la pandemia, y ya sin proyectos internacionales en curso, realicé muchas estancias de investigación largas en Francia, financiado directamente por programas franceses de profesores visitantes. En 2022 obtuve un proyecto de la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación, que me permitió continuar con la investigación en computación cuántica, y en particular, que mis doctorandos puedan viajar a congresos internacionales. Además, dos de ellos,

Ivnisky y Romero, realizan tesis en cotutela con el Instituto de Matemática y Estadística (IMERL) de la Universidad de la República, codirigidos por el Dr. Octavio Malherbe, con quien tenemos un proyecto en curso financiado enteramente por Uruguay. Este proyecto consiste en entender el modelo matemático, en teoría de categorías, ligado a la lógica cuántica que investigamos en mi grupo.

Recientemente, en colaboración con investigadores de Argentina, Uruguay y



Francia, hemos desarrollado *Lambda-S* y *L^s*, dos lenguajes que modelan la computación cuántica y exploran su conexión con la lógica lineal. Actualmente, estamos investigando la dualidad entre estos lenguajes y sus lógicas subyacentes, buscando comprender si la lógica lineal es un dual de la lógica cuántica definida por *Lambda-S*. Además, estamos extendiendo *Lambda-S* para poder representar diferentes formas de observar un sistema cuántico, lo que ampliaría aún más su capacidad para modelar la computación cuántica.

En 2022 tuve el privilegio de ser seleccionado para organizar la conferencia internacional “Quantum Physics and Logic” en Buenos Aires en 2024, en su 21a edición: QPL 2024.¹ Esta conferencia es la principal conferencia en el mundo en la intersección de la lógica y la física cuántica, y es un honor para mí poder organizarla en mi país.

A fines de 2023, con una nueva crisis económica en Argentina, se vislumbraba la posible llegada al poder de un candidato que abiertamente se manifestaba en contra de la ciencia, y que prometía desfinanciarla aún más, incluso prometía cerrar organismos como CONICET. Actualmente el desfinanciamiento de la ciencia es el más grave que me ha tocado vivir, con un presupuesto para ciencia que no llega al 0.2 % del PBI, y que a junio de 2024 sólo ha sido ejecutado menos del 2 % del presupuesto asignado.

Ante esta perspectiva, y con la posibilidad de que mis doctorandos no pudieran finalizar sus tesis, decidí buscar una sa-

lida en el extranjero. Luego de QPL 2024, volveré a Francia, al menos por algún tiempo hasta que Argentina vuelva a ser un lugar viable para desarrollar ciencia.

Mientras tanto, continúo trabajando en la investigación en computación cuántica, enfocándome especialmente en la relación entre la lógica y la física cuántica, y en la organización de QPL 2024, la cual espero sea un éxito. En Argentina, he establecido dos redes de investigadores: una en computación cuántica (LoCIC, Lógica, Computación e Información Cuántica) y otra en fundamentos de lenguajes de programación (FunLeP, Fundamentos de Lenguajes de Programación), que confío seguirán creciendo y fortaleciendo la investigación en computación en el país. Además, recientemente obtuve la aprobación de un proyecto del programa “Marie Skłodowska-Curie Actions - Staff Exchanges” de la Unión Europea, llamado “QCOMICAL: Quantum Computing and Its Calculi”, que facilitará la movilidad de investigadores y becarios doctorales entre Argentina, Uruguay, Francia e Italia, permitiendo así continuar la investigación en computación cuántica con un enfoque internacional.

Conclusión

En conclusión, mi trayectoria en el campo de la computación cuántica en Argentina ha sido un viaje lleno de desafíos y oportunidades. A pesar de las dificultades impuestas por la inestabilidad política y económica, he sido testigo de avances significativos en esta área, gracias al compromiso y la resiliencia de la

La financiación de la ciencia en Argentina no constituye una política de Estado que trascienda y se sostenga durante las sucesivas gestiones gubernamentales.

comunidad científica local y la colaboración internacional.

La creación de redes de investigación como LoCIC y FunLeP, así como la participación en proyectos internacionales como QCOMICAL, demuestran el potencial de crecimiento y desarrollo de la computación cuántica en Argentina. La organización de la conferencia QPL 2024 en Buenos Aires es un testimonio del reconocimiento internacional de los esfuerzos realizados en este campo en nuestro país.

A pesar de los obstáculos, sigo siendo optimista sobre el futuro de la computación cuántica en Argentina. Confío en que la política científica sea abordada en el debate social y político, para viabilizar la construcción de una política de Estado con la inversión necesaria para que nuestro país pueda consolidarse como un referente en ésta y otras disciplinas. La pasión y el talento de los científicos argentinos, combinados con la colaboración internacional, son la clave para superar los desafíos y construir un futuro prometedor para la computación cuántica en Argentina. ■

1 <http://qpl2024.dc.uba.ar>.