

¿Dónde quedó el cómputo científico? Avances y retrocesos de las herramientas computacionales en las ciencias biológicas

Dr. Jorge Augusto Navarro Alberto

Universidad Autónoma de Yucatán

jorge.navarro@uady.mx

M. en C. Roberto Carlos Barrientos Medina

Universidad Autónoma de Yucatán

rcarlos@uady.mx

Resumen

Hace más de 100 años que las ciencias biológicas han venido transitando simultáneamente con los avances tecnológicos para la modelación de sistemas complejos, a través del análisis de datos y la simulación por medios computacionales. Momentos cruciales en la historia de la computación han sido la creación de plataformas de programación, y la interactividad gráfica visual (GUIs), aspectos que han permitido la solución de problemas importantes en la ciencia, por prácticamente cualquier persona no-experta en programación. Esta ponencia trata de responder a la doble pregunta ¿Qué ventajas tenemos y qué precio pagamos por el uso de GUIs en computadoras y programas para el trabajo científico? Para proveer respuestas razonadas a estas preguntas, se hacen reflexiones sobre los contenidos de los planes de estudios universitarios en ciencias biológicas, y se ejemplifican los retos actuales en la utilización de los programas de cómputo estadístico en esas ciencias. Se recomienda que la formación universitaria "re-educque" a los usuarios de programas de cómputo científico, en aras de eliminar las "cajas negras" que pudieran estar presentes en las investigaciones científicas, por el uso irracional de las herramientas computacionales "amigables" al usuario.

Palabras clave: Cómputo científico, planes de estudio universitarios, Interfaces gráficas de usuario, programación, Biología.

Introducción

Los avances de la computación electrónica a través de la historia son muestras del enorme esfuerzo humano enfocado a la solución de problemas y aplicaciones en áreas tan variadas como la ingeniería, ciencias físicas y naturales, administración, entretenimiento, comunicaciones, etc. Las ciencias biológicas en particular, han venido transitando simultáneamente con los avances tecnológicos para resolver problemas de investigación desde hace más de 100 años. En la actualidad el escenario en el que se encuentra la computación aplicada a las ciencias biológicas es similar a la de cualquier otra área ciencia: las computadoras y programas de computadora permiten resolver problemas de alta complejidad (por ejemplo, en bioinformática), por prácticamente cualquier persona no experta en programación, gracias a la interactividad gráfica visual (GUI, graphical user interface, o interface gráfica del usuario).

Si bien el "usuario", el científico, satisface sus necesidades de cómputo con las poderosas herramientas de interacción que provee el programa (o mejor dicho, el "programador"), la distinción entre "usuario" y "programa" es marcada, y esto conlleva riesgos. Así, cuando se reflexiona sobre la cualidad del científico de llegar "al conocimiento de las cosas por sus causas", podría suceder (y de hecho, sucede) que la solución de un problema se produzca a través de "cajas negras" automatizadas, "empaquetadas", es decir, sin el "conocimiento de las causas", como consecuencia de ser únicamente "usuarios" de programas de computadora. Los riesgos de generar resultados a través de "cajas negras" se pueden minimizar si el usuario maneja, además de sus conocimientos disciplinarios, ciertos principios conceptuales y procedimentales de programación y computación, a tal grado que le permita identificar si lo que producen los programas de cómputo son resultados sensatos o no. Esta situación es la ideal, pero no parece serlo en la realidad: haciendo una revisión de en qué medida se puede garantizar la existencia esos requerimientos mínimos en la formación de profesionales en las ciencias biológicas en México, hemos descubierto cuán limitada es la formación que ofrecen los planes de estudios en relación al cómputo

científico. El propósito de este trabajo es responder a la doble pregunta ¿Qué ventajas tenemos y qué precio pagamos por el uso de GUIs en computadoras y programas para el trabajo científico? Para proveer respuestas razonadas a estas preguntas, se hacen reflexiones sobre los contenidos de los planes de estudios universitarios en ciencias biológicas, y se ejemplifican los retos actuales en la utilización de los programas de cómputo estadístico en esas ciencias. Al final, hacemos recomendaciones para enfocar la formación universitaria a los usuarios de programas de cómputo científico, en aras de eliminar las "cajas negras" que pudieran estar presentes en las investigaciones científicas, por el uso irracional de las herramientas computacionales "amigables" al usuario.

Cómputo científico: un poco de historia

Para identificar el rol de la computación en las ciencias biológicas en la actualidad es importante revisar cuán ligadas han estado desde los principios de la era computacional moderna, y la manera en que se ha propiciado la formación académica del cómputo científico para las aplicaciones en las ciencias biológicas.

Los inicios. David Alan Grier (Grier, D.A.), en su reseña sobre los orígenes del cómputo estadístico publicada en la página web de la Asociación Americana de Estadística (American Statistical Association, AMSTAT) señala que las primeras aplicaciones de la computación en biología se dieron a través de la estadística. Si se ve al censo de seres humanos como un censo de seres vivos, entonces este evento se realizó en forma automatizada por primera vez, a gran escala, en los Estados Unidos en 1890, con la ayuda de las máquinas de tarjetas perforadas de Hollerith. Sesenta y dos millones de tarjetas llegaron a ponerse en los lectores de estas máquinas, para después colocarse en cajas ordenadoras que facilitaron la organización de datos, y finalmente imprimir los resultados de manera automatizada. Las máquinas tipo Hollerith vinieron a ocupar un lugar preponderante para el cómputo estadístico hasta la tercera década del siglo XX, tiempo en

que coincidentemente se consolida la biometría con Pearson y Fisher, y finalmente fueron reemplazadas por las computadoras electrónicas.

International Business Machines (IBM), la compañía fundada precisamente por Herman Hollerith ayudó a muchas escuelas a instalar laboratorios de cómputo en la segunda década del siglo XX, siendo la primera la Universidad de Cornell, la cual en 1926 rentó máquinas tabuladoras a la IBM para formar su laboratorio de cómputo. El Colegio del Estado de Iowa se esforzó por adquirir máquinas tabuladoras para su universidad, y finalmente logró establecer un laboratorio de cómputo estadístico en el otoño de 1927. Aun cuando el laboratorio se ubicó dentro del Departamento de Matemáticas de esa universidad, resultó ser un proyecto de colaboración entre varios departamentos y los empresarios de la IBM. A fines de 1927, ya contaban con máquinas tabuladoras el Colegio del Estado de Iowa, y las universidades de Columbia y Michigan. Luego vinieron las universidades de Texas, Harvard, Stanford y Tennessee.

Un ejemplo sobre los inicios de la simulación. D. A. Grier describe también cómo fueron extendiéndose laboratorios de cómputo para la investigación estadística, y menciona como ejemplo, el laboratorio de cómputo de la Universidad de Indiana para aplicaciones econométricas. Este laboratorio fue fundado en 1927 por H. T. Davis, con el financiamiento de un grupo de inversionistas de la región, quienes querían entender mejor los cambios en la economía. Como sucede habitualmente, el laboratorio de Davis fue usado también en aplicaciones ajenas para el que fue creado, llegando en una ocasión a requerirse para hacer un cálculo de interferencia óptica de un físico de la Universidad de Indiana. En este caso, Davis se dio cuenta que sus computadoras habían usado valores incorrectos al hacer el cálculo, de modo que convenció a su colega para efectuar de nuevo el experimento por segunda vez, usando los valores que sus computadoras habían empleado equivocadamente. Esta anécdota nos deja al menos dos ejemplos. Primero, que el conocimiento de Davis sobre el problema y, en especial de su "computadora", le

permitió identificar un problema en el resultado. Segundo, que sacó algo bueno de lo que era incorrecto: motivó a Davis a pensar en escenarios de simulación de utilidad para el científico.

La historia continúa y está aquí...

La cultura humana ha atravesado en forma vertiginosa las cinco generaciones en que se ha reconocido a la historia de las computadoras. Desde la primera generación (1951-1957), con las computadoras de bulbos, hasta la quinta (la generación actual y del futuro), basada en la inteligencia artificial, nanotecnologías, superconductores, cómputo cuántico y molecular, los científicos han regulado y actualizado su formación académica, como respuesta a los cambios tecnológicos implicados. Ahora las computadoras y sistemas de información integrados son sinónimo del manejo de voluminosas cantidades de datos y de cálculos de las que podemos disponer, y que antes eran impensables. Así, las ciencias de la computación son la parte frontal y el centro de las ciencias en general, y de la biología y las ciencias ambientales en particular. La computación provee de medios para resolver problemas en áreas tan disímiles como genética, medicina, modelación fisiológica, mapeo geográfico y genético de cultivos, modelación del clima; provee también de herramientas para el manejo de bases de datos descriptivas de la biodiversidad así como predictivas del ambiente (e.g., salinidad, precipitación pluvial, etc.).

Antes los científicos optaban por la Biología para rehuir de las matemáticas, pero ahora cualquier experimento o estudio observacional, además de un diseño bien pensado y del conocimiento disciplinario, requiere de enfoques cuantitativos y computacionales. En particular, como consecuencia del boom computacional, la biología cambió puesto que en las aplicaciones de métodos estadísticos y de modelación matemática en problemas biológicos la computadora se convirtió en una herramienta indispensable e irremplazable. Las innovaciones tecnológicas computacionales fueron parte-aguas para

los métodos de investigación de los biólogos, permitiendo la fundación de nuevas disciplinas. Así, el interés por modelar procesos biológicos a través de las herramientas que proveía la teoría de ecuaciones diferenciales dio lugar a la teoría general de sistemas de Ludwig Von Bertalanffy a mediados del siglo XX. Y dio lugar también a que los planes de estudio de Biología consideraran en su trama curricular el cálculo y la modelación matemática, y a la utilización de programas de cómputo para la solución numérica de ecuaciones diferenciales. Al mismo tiempo, el desarrollo de la disciplina del diseño y análisis de diseños experimentales contribuyó a la generalización del uso de la computadora para análisis estadísticos.

De las "mainframes" a las computadoras personales

Hasta principios de la década de los 70's del siglo XX, el acceso al cómputo científico estuvo limitado a los centros de investigación y personal especializados que utilizaban computadoras "mainframes" o minicomputadoras. Pero gracias a la miniaturización de los circuitos integrados y la disminución en los costos de manufactura, desde mediados de la década de los 70s del siglo XX se logró que los programas para cómputo científico tuvieran cabida en los equipos de cómputo accesibles a la generalidad, a saber, las llamadas computadoras personales.

En un principio, los sistemas operativos y los ambientes de programación comunes no eran gráficos, sino tipo "texto", de manera que la cultura computacional prevaeciente era similar para usuarios y programadores. Gradualmente fue cambiando el tipo de interacción y se comenzó a instrumentar la estrategia de WYSIWYG ("What you see is what you get") en los programas "de aplicaciones" (este último término acuñado para distinguirlos de los lenguajes de programación). El concepto WYSIWYG se transformó después en los llamados ambientes GUI que simplificaron la interacción con la computadora al representar programas, comandos, archivos, y otras opciones como elementos visuales, tales como íconos, menús de extensión, botones, barras de

corrimiento, ventanas y cajas de diálogo. Al seleccionar uno de estos elementos gráficos a través del ratón o de una selección de un menú, el usuario puede iniciar diferentes actividades tales como iniciar un programa o imprimir un documento. La primera implementación comercial de una estación de trabajo GUI ocurrió en 1981, con la "Xerox's Star Workstation", derivada de un prototipo elaborado en 1973 por la misma compañía, la Xerox Alto. La Xerox Star fue la inspiración de la Mac y de las demás GUIs que le siguieron. Gracias a los primeros GUIs, los programas de edición de texto dejaron de construirse a partir de comandos y se integraron menús de acciones (por ejemplo, para escribir texto en negritas, poner sangrías, etc.). Algo similar ocurrió con los programas de hojas reticuladas de cálculo (e.g. Visicalc, Lotus 1-2-3) y programas de cómputo para análisis estadístico, programas que el biólogo usa con mayor soltura y dominio en sus versiones más actuales.

La computación en los planes de estudio de Biología: el caso de México.

A mediados de los años 80's existían en México planes de estudio de Biología que incluían cursos obligatorios de Computación o Informática, en donde los estudiantes cubrían aspectos de: arquitectura de computadoras, sistemas operativos, lenguajes de programación (por ejemplo, BASIC o PASCAL), conceptos y programación de bases de datos y programas de aplicación estadísticos. Un ejemplo es el curso de Informática, que ofrecía la Licenciatura en Biología de la Universidad Autónoma de Yucatán en 1986 (UADY, 1985). A consecuencia de esta experiencia de aprendizaje, los estudiantes llegaron a manejar conceptos de las ciencias computacionales tales como recursividad, estructura de datos, índices, registro y campos de una base de datos, sistema multiusuario, etc. Entre 1986 y 1990 se experimentaron cambios vertiginosos en el uso de la tecnología computacional, tanto en el hardware como en el software. Por ejemplo, después de ganarle la batalla comercial a Lotus (que fue el creador de la primera suite ofimática, la efímera Lotus SmartSuite), a principios de los 90's se consolidó la suite de Microsoft que ofrecía herramientas GUI integradas para el manejo de bases de datos, hojas reticuladas de cálculo, la edición de textos, y para la presentación de información a través de

diapositivas, siendo en la actualidad el conjunto de programas que con mayor frecuencia usa el sector académico. El usuario fue encontrando en estos programas muchas de las soluciones a sus problemas de manejo y análisis de datos y fue requiriendo con menor frecuencia la utilización de otros programas. En los 90's el poder de las PC's aumentó radicalmente, borrando la frontera entre las PC's y las mainframes o mini-computadoras con sistema multiusuario/multitarea. Sin embargo, la fuerza monopólica imperante en la comercialización de los programas de aplicación (e.g. Microsoft Office) y "hardware " compatible con Microsoft Windows, explica la postura que se tuvo en los años 90s con relación a la computación, al menos en México. De hecho, se puede aun leer en algunos planes de estudios de Biología en México que el perfil de ingreso requería (y requiere aun) que el aspirante posea iconocimientos y habilidades en el uso de Excel, Word y PowerPoint! Y en otros casos, para los estudiantes que ingresaran a la carrera, bastaba con asegurar que manejaran exclusivamente esas aplicaciones, pudiendo alcanzar tales habilidades a través de cursos cortos de entrenamiento, sin un contexto más amplio, enmarcado dentro de las ciencias de la computación. A todo esto se añade un incremento en el uso de las computadoras personales, que se extendió a las escuelas de nivel básico y medio superior, lo cual derivó en que, a nivel superior, la computación (en su sentido reduccionista) se considerara como parte del perfil de ingreso.

En el caso de la licenciatura en Biología de la UADY, la modificación del plan de estudios en 1997 implicó la eliminación de la asignatura obligatoria de Informática y, por tanto, se erradicaron del perfil del egresado las competencias que se derivaban de sus contenidos. Ahora que está en boga el aprendizaje por competencias, se puede decir que se erradicaron de la formación del biólogo competencias genéricas de un científico del siglo XXI. Por cierto, ha habido una modificación más del plan de estudios de la UADY (2005), el que rige actualmente, y la computación no ha retornado a la malla curricular como asignatura obligatoria, ni como componente del tronco común equiparable al lugar que tienen las matemáticas o la química en los planes de estudios.

Hicimos una revisión, a través de internet, de los planes de estudio vigentes de 28 universidades o institutos que imparten la carrera de Biología en la República Mexicana, y encontramos (Tabla 1) que solamente el 46% (13 de 28) tienen a la computación como asignatura obligatoria, o que forma parte de las competencias de tronco común en ciencias; en esos contados casos se observó que se puede ofrecer más de una asignatura de computación obligatoria. Llama la atención que a las tecnologías de la información se les reconoce en algunas universidades como herramientas para la construcción del conocimiento o para el desarrollo humano y profesional. Otro aspecto importante del comparativo en la Tabla 1 es la presencia, casi generalizada en los planes de estudios, de asignaturas optativas cuya herramienta principal es la computadora: Sistemas de Información Geográfica, Percepción Remota, Bioinformática, etc. Sin embargo, en aquellos casos en donde la computación no es un prerrequisito común a los estudiantes de Biología, se asumiría que el estudiante puede abordar las temáticas de tales optativas sin necesidad de contar con las bases conceptuales de las ciencias computacionales.

¿A qué se debe la falta de uniformidad o consenso con respecto a la computación en Biología? Algunas razones ya fueron esgrimidas arriba: la inclusión obligatoria de suites de programas en las computadoras en nuestras universidades, haciendo innecesarios otros aspectos de las ciencias computacionales, es una razón. Otra puede ser el establecimiento de internet en nuestras vidas y la masificación del uso de las computadoras con programas enfocados a establecer redes sociales. El hecho de que toda persona pueda interactuar con las computadoras para actividades cotidianas tales como la comunicación o el entretenimiento ha propiciado la actitud de asumir que la cotidianidad en esa interacción implica que se contará con destrezas para otras tareas con la computadora. El estudiante universitario posiblemente tenga computadoras personales a las cuales no se les aprovecha al máximo los recursos que ofrece, puesto que el rango de programas que usa posiblemente se restringe a la suite de Microsoft, su navegador de internet y a programas para su entretenimiento. Claro, pueden haber estudiantes que vayan más allá y aprovechen más sus computadoras personales, pero para el trabajo científico hay que

mirar a herramientas posiblemente más sofisticadas, tales como la programación usando lenguajes de alto nivel, el manejo de servidores o la computación paralela. ¿En dónde se adiestra el futuro científico sobre estos tópicos? ¿Se da respuesta a la pregunta anterior omitiendo cursos de computación para futuros científicos? A nuestros estudiantes no se les enseña de manera formal que, por ejemplo, la interactividad GUI es adversa para cierto tipo de cómputo científico. Si nuestras aplicaciones dependen de los sistemas operativos MacOS o Windows, no es fácil medir el uso de los recursos computacionales cuando entran en ejecución: son “transparentes al usuario”. Son “otros” (aquellos que hacen los programas de aplicación GUI) los que toman la decisión de qué recursos usará el sistema operativo. Los recursos GUIs “aminoran” los demás recursos, que para cálculos intensivos en computadoras personales, a pesar de las cantidades enormes de memoria, pueden ser limitados cuando se ejecutan todos al mismo tiempo. Por esta razón, algunos estudiantes o profesores disidentes han optado por elegir otros sistemas operativos como Linux o Ubuntu, pero aun éstos cuentan ya con plataformas gráficas (por ejemplo, GNOME) “amigables” al usuario.

La computación en Biología: estado actual

Ahora la biología enfrenta otra gran revolución: la del manejo de grandes conjuntos de datos. Por ejemplo, en el campo de la genética se ha avanzado rápidamente en la generación de la secuenciación de genomas, un procedimiento que ahora es trivial para la mayoría de las especies, pero en donde las cantidades de datos generados por los proyectos de secuenciación son estratosféricamente grandes.

Posiblemente los instructores de las asignaturas contemporáneas de bioinformática y biología computacional lamentan también la ausencia de una formación básica en computación. La biología computacional es uno de los nichos de oportunidad en donde los biólogos se pueden incorporar con mayor celeridad a la vida laboral. Es una ciencia

interdisciplinaria que involucra las matemáticas y la computación para el estudio de los genes y proteínas; la biología computacional dirige sus preguntas de investigación más generales sobre las estructuras celulares y subcelulares, y requiere para ello de la computación. Por tanto, se espera que los estudiantes de bioinformática y biología computacional integren tópicos de matemáticas aplicadas, ciencias de la computación y biología en especialidades tan diversas como genética y microbiología. En México existen ya programas de licenciatura especializados en Biología genómica como el de la Universidad Autónoma de Nuevo León. En este programa se incluyen cuatro asignaturas obligatorias básicas: "Aplicación de las tecnologías de la información", "Principios de programación", "Bioinformática", "Bioinformática y simulaciones". En contraste, en la especialidad en Bioinformática del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato no existen asignaturas de computación obligatorias, excepto la de Bioinformática.

En áreas como la Bioinformática las implementaciones de los GUI son aun escasas, así que la mayoría de las veces el usuario tendrá que escribir sus propios programas. Esto contrasta con los programas de aplicación populares (Excel o los paquetes estadísticos SPSS, MINITAB, etc.) en donde no es necesario programar, salvo que se quieran aplicaciones no-convencionales. Aprender un lenguaje de programación implica aprender un idioma artificial diseñado para expresar cálculos que pueden ser llevados a cabo por computadoras; esta tarea requiere de un espacio y un tiempo adecuado dentro de los planes de estudios, digamos, en un curso de computación. Las ventajas de un curso de computación en la formación del biólogo son de mayor valor que las aparentes dificultades. Este curso se enfocaría en proveer las bases para el arte de escribir, probar, depurar, compilar y mantener códigos de programas informáticos para fines prácticos, y le conferirían al estudiante habilidades de discernimiento de lo pueden ser las "caja negras", esto es, los programas "empacados y transparentes" al usuario, la mayoría de ellos tipo GUI.

Conceptos de actualidad en la computación como los de programación dirigida a eventos, programación orientada a objetos se están usando en la práctica en las ciencias biológicas. Por ejemplo, se ha popularizado el uso del lenguaje R (R Core Team 2012) para realizar análisis estadísticos de datos biológicos en forma rápida, gratuita y sofisticada. Este lenguaje usa programación orientada a objetos: trabaja con objetos, listas (conjuntos de objetos), los objetos están clasificados por tipos, modos, etc. Además existe la posibilidad (como en prácticamente todos los lenguajes) de usar órdenes que ayuden a resolver un problema en forma recursiva o iterativa. ¿Están siendo preparados nuestros estudiantes para ello?

Suena paradójico que mientras estamos "en las nubes" discutiendo sobre la pertinencia de incluir cursos de computación en los planes de estudio de biología, el cómputo científico está también literalmente "en la nube". Las ciencias de la computación y del cómputo científico y educativo han evolucionado tanto que ahora podemos ejecutar trabajos de cómputo intensivo en la llamada "nube", un ambiente colaborativo y ubicuo de programación que conjunta recursos de almacenamiento de datos y lenguajes de programación y aplicaciones de acceso gratuito para aquellos dedicados a la investigación y la educación. A fines de los años 90's ya existía, por ejemplo, un acceso a través de internet al servidor de la Universidad de Purdue en los Estados Unidos (llamado Net Pellpack PSE server) para que los científicos alrededor del mundo resolvieran ecuaciones diferencias parciales complejas usando como interfaz un navegador de internet que soportara applets Java (Markus 1997). En la actualidad existen cientos de sitios en la nube, llegando a alcanzar escalas sofisticadas, como por ejemplo, el "Elastic-R (Chine 2010). En el ambiente Elastic-R, los investigadores, educadores y estudiantes pueden adquirir fácilmente recursos de cómputo y almacenamiento de datos y usarlos para trabajar virtualmente con R, Python, Scilab (la versión gratuita de Matlab), Mathematica, etc. por sí mismos en forma colaborativa sin restricciones en memoria, tamaño de los datos o restricciones de ubicación de los datos. De hecho, cualquier dispositivo (PC, iPad, teléfono móvil, etc.) y cualquier aplicación del cliente (navegador de internet, Word, Excel, sesiones

locales de R) pueden ser usadas para acceder el ambiente virtual remoto. Si existieran colaboraciones entre sitios distantes del planeta, se pueden compartir sesiones e interactuar en tiempo real para analizar datos en forma colaborativa, y construir conjuntamente modelos, hojas de cálculo, GUIs, aplicaciones científicas, etc. ¿Cuántos de nuestros estudiantes llegarán a participar con soltura en estos ambientes interactivos globales?

Conclusión

Consideramos que es hora de reorientar (re-educar) a nuestros estudiantes de biología en el uso de la computadora y de la computación, para su formación profesional. Las ciencias de la computación y la biología están siendo cada vez interactivas más allá de las áreas habituales de estadística y modelación; la bioinformática es un ejemplo actual y palpable de esto. Es necesario asegurar que los biólogos egresados puedan manejar los conceptos y métodos de computación generales y de actualidad, para que sean de mayor utilidad en su desempeño profesional. Para ello, urge una evaluación a fondo en los planes de estudio de biología con respecto a la presencia de contenidos básicos y obligatorios de las ciencias de la computación aplicables a Biología. Nuestra propuesta es que se incluyan cursos de computación obligatorios que amplíen el conocimiento general de los estudiantes, y lo preparen para usar la computación en el ámbito científico.

Bibliografía

Chine K (2010). Open science in the cloud: towards a universal platform for scientific and statistical computing. En Furht B, Escalante A (Eds.), *Handbook of cloud computing* (pp 453-474). New York: Springer.

Grier, D.A. The Origin of statistical Computing. Recuperado de: <http://www.amstat.org/about/statisticiansinhistory/index.cfm?fuseaction=paperinfo&PaperID=4> (Revisado el 10/Diciembre/2012)

Markus, S. (1997). Scientific computing via the Web: the Net Pellpack PSE server. *Computational Science and Engineering, IEEE*. 4(3): 43-51.

R Core Team (2012). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

Tabla 1. Comparativo de universidades de la República Mexicana que imparten la carrera de Biología, con relación a la existencia de asignaturas o actividades relacionadas con las ciencias computacionales en sus planes de estudios. En los casos en donde se indica "Sin información", podría ocurrir que a) no se ofrecen en el plan de estudios o, b) se imparten pero no se encontró la información en las búsquedas realizadas. Fuente: Páginas web de las universidades referidas.

Universidad	¿Aparece "Computación" o alguna asignatura afín como obligatoria, o de tronco común en el plan de estudios?	¿Existen asignaturas optativas afines?
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Facultad de Ciencias	No	Aplicación del Procesamiento Digital de Imágenes de la Biología, Sistemas de Información Geográfica (SIGs)
UNAM, FES-Iztacala	No	Sin información
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco	Sí: Herramientas de computación (4 créditos, área general)	Ecología cuantitativa
Universidad de las Américas, Puebla	Sí: Tecnologías de la información en la construcción del conocimiento	Métodos de análisis molecular
Universidad Autónoma de Yucatán	No	SIGs
Universidad Autónoma Metropolitana	No	Sin información
Universidad de Guadalajara	No.	Fotointerpretación y Cartografía, SIGs, Introducción a la percepción remota

Universidad	¿Aparece "Computación" o alguna asignatura afín como obligatoria, o de tronco común en el plan de estudios?	¿Existen asignaturas optativas afines?
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo	Sí: Computación I; Computación II (6 créditos c/u)	Sin información
Universidad Autónoma del Estado de Morelos	No.	Sin información
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (2006); Modelo Universitario Minerva (2009)	Sí: Computación en el Plan 2006 (5 créditos); Desarrollo de Habilidades en el Uso de las Tecnologías de la Información y de la Comunicación en el nuevo Plan Minerva 2009 (4 créditos)	Principios de percepción remota, SIGs, Análisis de Secuencias Aminoacídicas (en el plan 2006)
Universidad Autónoma de Nuevo León	Sí: Aplicación de las Tecnologías de Información (Dentro del grupo de asignaturas de Desarrollo humano y profesional)	Sin información
Universidad Autónoma de Zacatecas	Sí: Introducción al Lenguaje Computacional (1er semestre). Computación y Biología (2º semestre)	Sin información
Universidad Autónoma de Tlaxcala	No	Sin información

Universidad	¿Aparece "Computación" o alguna asignatura afín como obligatoria, o de tronco común en el plan de estudios?	¿Existen asignaturas optativas afines?
Universidad del Noreste, Tamaulipas	Computación I (7° Semestre), Computación II (8° semestre)	
Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria, Tamaulipas	No	Sin información
Universidad de Sonora (UNISON)	Sí: Nuevas tecnologías de la información y comunicación	Sensoría remota. Tecnologías de información en la opción de Biotecnología
Universidad de Occidente, Sinaloa	Tecnología de la información aplicada a la disciplina	Sin información
Universidad Autónoma de Sinaloa	No.	Sin información
Universidad Autónoma de Aguascalientes	Sí: Computación (1er semestre, a cargo del Depto. de Sistemas de Información)	Sin información
Universidad Autónoma de Campeche, Biología	No.	Competencias en "Microsoft"
Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Biología	No.	Sin información
Universidad Autónoma de Ciudad	No.	Bioinformática

Universidad	¿Aparece "Computación" o alguna asignatura afín como obligatoria, o de tronco común en el plan de estudios?	¿Existen asignaturas optativas afines?
Juárez, Biología		
Instituto Tecnológico Superior de Irapuato	No.	Bioinformática
Universidad de Colima	No.	Bioinformática
Universidad Juárez del Estado de Durango, Biología	Sí (como parte de actividades de formación integral)	
Universidad Autónoma de Nayarit	Sí: Tecnologías de la Comunicación y Gestión de la Información (6 créditos, Tronco Básico Universitario)	Sin información
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Biología	No.	Sin información
Universidad Autónoma "Benito Juárez", Oaxaca	Introducción a la Computación (Tronco Común y Entorno Social, 1er semestre "Básico")	Sin información
Universidad Autónoma de Querétaro	Sin información	Sin información