

EL PAPEL DE LOS PRODUCTOS DE LA INGENIERÍA DE SOFTWARE EN EL PROBLEMA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

THE ROLE OF SOFTWARE ENGINEERING PRODUCTS ON PROBLEM OF CLIMATE CHANGE



AUTOR

EDGAR SERNA MONTOYA
Ingeniero de Sistemas
* Instituto Tecnológico Metropolitano
Facultad de Ingenierías
edgarserna@itm.edu.co
COLOMBIA

AUTOR

ALEXEI SERNA ARENAS
Semestre 10 Ingeniería de Sistemas
** Instituto Antioqueño de Investigación
Grupo de Investigación CCIS
alexei.serna@fundacioniai.org
COLOMBIA

INSTITUCIÓN

*INSTITUTO TECNOLÓGICO
METROPOLITANO
ITM
Carácter Público
Calle 73 No 76A -354 Vía al Volador,
Medellín, Antioquia
itm@itm.edu.co
COLOMBIA

INSTITUCIÓN

**INSTITUTO ANTIOQUEÑO DE
INVESTIGACIÓN
IAI
Corporación sin ánimo de lucro
Cra. 72 No. 51-10 Int. 202. Medellín,
Antioquia
contacto@fundacioniai.org
COLOMBIA

INFORMACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN O DEL PROYECTO: Proyecto de investigación "La ingeniería en crisis – Esferas circundantes", financiado y ejecutado por el Instituto Antioqueño de Investigación a través del grupo de investigación CCIS. Fecha de inicio, Julio de 2011. Fecha de Finalización, Junio 2012. Investigadores: Edgar Serna M. y Alexei Serna A.

RECEPCIÓN: 23 de Enero de 2013

ACEPTACIÓN: 25 de Febrero de 2013

TEMÁTICA: Ingeniería de Software, Ciencias Computacionales.

TIPO DE ARTÍCULO: Artículo de Reflexión

RESUMEN ANALÍTICO

El software es un componente crítico que tiene que ver con casi todos los aspectos técnicos y tecnológicos del problema del Cambio Climático. Desde los modelos computacionales utilizados por los científicos del clima hasta proveer una mejor comprensión del impacto de las actividades humanas sobre los sistemas de la Tierra, el software, a través de los sistemas de información, de modelamiento, de gestión de conocimiento y de control de datos, debe contribuir para desarrollar una sociedad carbono-neutral. En consecuencia, los investigadores, los profesionales y los productos de la Ingeniería de Software están llamados a desempeñar un importante papel en la respuesta a esta crisis. En este artículo se describe el rol de los productos de la Ingeniería de Software en el problema del Cambio Climático, se presenta un mapa del espacio en el que son necesarias las contribuciones de esta comunidad, y se propone una posible agenda de investigación.

PALABRAS CLAVES: Software, Cambio Climático, Modelos Computacionales.

ANALYTICAL SUMMARY

The software is a critical component that has to do with almost all technical and technological aspects of climate change problem. Since the computer models used by climate scientists to provide a better understanding of the impact of human activities on earth systems, the software through information systems, modeling, knowledge management and data control, should contribute to develop a carbon-neutral society. Consequently, researchers, professionals and Software Engineering products are called to play an important role in answer to crisis. This article describes the role of software engineering products on problem of climate change, a map of space in which are probably needed the contributions of this community, and proposes a possible research agenda.

KEYWORDS: Software, Climate Change, Computational Models.

INTRODUCCIÓN.

El Cambio Climático probablemente sea el tema científico más importante del siglo XXI. En este aspecto la ciencia es inequívoca: la concentración de gases de efecto invernadero aumenta rápidamente, más que en cualquier otra época anterior en la historia de la Tierra, y sus impactos ya son evidentes [1]. Es probable que en el futuro estos impactos incluyan una reducción de los suministros mundiales de alimentos y de agua, eventos climáticos más frecuentes, aumento del nivel del mar, acidificación de los océanos y extinciones en masa [2]. En las próximas décadas se esperan impactos severos en la salud humana, desde el estrés por calor hasta las enfermedades transmitidas por vectores –plagas– [3].

Desafortunadamente, la escala de los sistemas implicados hace que el problema sea difícil de comprender y más aún de resolver. Por ejemplo, el carbono adicional en los gases de efecto invernadero tiende a permanecer circulando por siglos en el sistema atmósfera-océano, lo que significa que las emisiones del pasado comprometen un mayor calentamiento a lo largo de este siglo, incluso

si se reduce drásticamente las nuevas emisiones [4]. La respuesta humana es lenta y tomará décadas completar un cambio global con fuentes de energía carbono-neutrales, tiempo en el que la concentración atmosférica de estos gases seguirá en aumento. Este escenario se puede interpretar como que es inevitable un aumento en el calentamiento, y que probablemente la alteración catastrófica del clima será un problema de lo cotidiano.

En estas circunstancias la civilización se enfrenta a un triple desafío: 1) *mitigación*, para evitar los peores efectos del cambio climático a través de una rápida transición hacia una economía con baja emisión de carbono, 2) aplicar *reingeniería* a la infraestructura de la sociedad moderna, para sobrevivir y prosperar en un planeta cada vez más caliente y 3) *formación*, para mejorar la comprensión pública de las inter-relaciones entre el sistema climático planetario y los sistemas de la actividad humana, y de la escala y urgencia del problema. Estos desafíos son de naturaleza global e impregnan todos los aspectos de la sociedad. Para hacerles frente se necesita que los investigadores, ingenieros, políticos y formadores, desde muchas y diferentes disciplinas,

se sienten a la mesa y se pregunten en qué pueden contribuir.

En el corto plazo será necesario desplegar la tecnología existente para producir energía renovable [5], a la vez que diseñar políticas gubernamentales y tratados internacionales para controlar las emisiones de gases perjudiciales, y a más largo plazo se deberá completar la transición hacia una sociedad global carbono-neutral [1]. Hacer frente a estos desafíos requerirá la movilización de amplias comunidades de investigadores con experiencia suficiente en el tema.

Alrededor de este contexto el software desempeña un papel destacado, porque es parte del problema tanto como de la solución. En las últimas décadas gran parte del crecimiento masivo del consumo de energía se debe al desarrollo y uso de las TIC, y de los avances tecnológicos que generan. Tradicionalmente la eficiencia energética no ha sido un requisito que se tiene en cuenta en el desarrollo de tecnologías intensivas de software, y por lo tanto existe un amplio potencial para investigar cómo mejorarla [6].

Además, el software proporciona la infraestructura crítica que soporta el estudio científico del cambio climático, y de qué o cuál ciencia utiliza la sociedad, y permite procesar las enormes cantidades de datos geocientíficos para simular los procesos de los sistemas de la Tierra, lo mismo que para evaluar sus implicaciones y explorar posibles respuestas políticas. La estructura de los modelos software debe permitir que los científicos, los activistas y los políticos compartan datos, exploren escenarios y validen hipótesis. La extensión de esta infraestructura a menudo es invisible, tanto para aquellos que confían y la utilizan, como para el público en general [7]. Sin embargo, las debilidades de los productos de la Ingeniería de Software –reales o imaginarias– disminuyen las capacidades de los actores para progresar en la lucha contra el Cambio Climático. Es necesario resolver esos problemas para mejorar la forma en que la sociedad encuentra, evalúa y utiliza el conocimiento para apoyar la toma de decisiones colectivas.

En este artículo se analiza el rol y los desafíos de los productos de la Ingeniería de Software para hacer frente al problema del Cambio Climático, y el potencial que tiene su infraestructura para salvar las brechas entre las disciplinas científicas, los políticos responsables, los medios de comunicación y la opinión pública. Además, se identifica las debilidades de la capacidad de la comunidad para desarrollar y validar esta infraestructura, especialmente en lo que tiene que ver con los métodos tradicionales de esta Ingeniería para construir una mejor infraestructura, teniendo en cuenta

el conocimiento intensivo existente. Es un trabajo cuya audiencia no requiere fronteras ni delimitaciones continentales, porque el problema y la solución son globales. La Ingeniería de Software es un área del conocimiento cuyos contenidos y objetivos formativos se deben modificar en todo el mundo, con lo que sería posible mejorar sus productos y por tanto colaborar para lograr una huella de carbono inferior a la proyectada desde la tecnología.

1. CONTEXTO DEL PROBLEMA.

Rara vez en este siglo la cuestión del Cambio Climático ha estado por fuera de los medios de comunicación: los récords de temperatura en gran parte del planeta en los últimos años han puesto fin a una década sin precedentes [8], y para diseñar un protocolo sucesor para el de Kyoto los líderes mundiales se reunieron en Copenhague, pero en gran medida no lograron avances significativos; la legislación acerca del clima se estancó en su paso por el Congreso de los EE.UU., y para mostrar el comportamiento poco profesional de los científicos del clima un hacker envió miles de correos publicitarios desde East Anglia University. Este último caso estuvo pleno de afirmaciones “sensacionalistas” acerca de que los científicos fabrican datos, que niegan el acceso a los mismos y al código del programa, y que conspiran para subvertir el proceso de revisión por pares de la divulgación de los resultados de sus investigaciones. Aunque algunos trabajos posteriores demostraron que esas acusaciones eran falsas [9], quedan pendientes interrogantes persistentes acerca del rol del software en estas cuestiones, y de cómo las personas pueden tener acceso a información confiable en los temas de las ciencias del clima.

La calidad de los productos de la Ingeniería de Software es una preocupación particular, porque los mismos científicos del clima son los que construyen las herramientas software para soportar su trabajo. Tal es el caso de los Modelos de Circulación Global –GCM por sus siglas en inglés–, que simulan la atmósfera, los océanos, la criosfera y la biosfera para estudiar los procesos a escala global, y para generar futuras proyecciones que se utilizan en las evaluaciones de organismos como el Intergovernmental Panel on Climate Change –IPCC– [10]. Además, utilizan una variedad de herramientas para manipular y analizar los datos de las observaciones y los resultados de las simulaciones, y para intercambiar datos acerca del clima con la comunidad científica en general. La mayoría de estos productos los desarrollan los mismos científicos del clima, los cuales tienen poca o ninguna formación en Ingeniería de Software. Como resultado, la calidad del software varía enormemente: los GCM tienden a ser bien diseñados [11], mientras que algunas herramientas de procesamiento de datos apenas llegan a ser adecuadamente probadas [12].

La apertura y la capacidad de reproducción son temas cruciales para la comunidad, porque los científicos necesitan validar mutuamente los resultados y para poder repetir sus experimentos. Las bases de datos son complejas y de gran tamaño –los centros de datos climáticos manejan diariamente varios terabytes de información–, por lo que frecuentemente faltan datos o son sólo ruido, y tienen que ser reprocesados y analizados a diferentes escalas físicas y temporales. Debido a la complejidad de este procesamiento es casi irrelevante el libre acceso a los datos en bruto, porque para comprenderlos y utilizarlos es necesario conocer completamente su procedencia, incluyendo los pasos de procesamiento aplicados, las herramientas utilizadas –con sus valores–, la racionalidad de cada paso del proceso, y cualquier asunto de calidad conocido y supuesto. Los actuales *frameworks* para el análisis de datos sólo capturan una fracción de esta información, y tienden a funcionar separados de las bases de datos. Los esfuerzos de la comunidad, en lo que tiene que ver con los metadatos del modelado de sistemas de la Tierra [13], están orientados a hacerle frente a este desafío, pero todavía luchan con la normalización de descriptores, y la capacidad para capturar la procedencia de todos los datos sigue siendo un quimera. Por otro lado, los científicos no proporcionan acceso libre y gratuito a las bases de datos, porque casi siempre no se les reconoce el esfuerzo invertido en su creación y análisis. La reproducibilidad es difícil porque a menudo las grandes rutinas numéricas están vinculadas a la arquitectura particular de un supercomputador, y son sensibles a pequeñas perturbaciones en los cálculos, por lo que un cambio en el hardware, el compilador, o los archivos de configuración, hacen que sea imposible repetir un experimento previo.

La comunidad de científicos del modelado de sistemas de la Tierra entiende estos desafíos, y ha iniciado procesos para construir la infraestructura software necesaria para soportar de mejor forma el modelado, el análisis y el intercambio de datos [12]. Sin embargo, por fuera de esta comunidad los desafíos son poco estudiados y poco comprendidos. A menudo no se aplica las técnicas estándar de la Ingeniería de Software, porque los productos se construyen para resolver problemas, de los que de antemano no se conoce las respuestas, y sólo logran soluciones aproximadas. Del mismo modo, las métricas estándar de la calidad del software puede que no se apliquen bien, porque la validez científica no se corresponde directamente con las nociones tradicionales de correctitud del software [14]. Tal como dijo George Box [15]: “*Todos los modelos están equivocados, pero algunos son útiles*”, además, probar ese software es en sí un desafío.

Otra lección de las recientes representaciones de la ciencia del clima en los medios es que se requiere mucha y mejor comunicación de los resultados, de qué cómo se obtienen y de cuáles son sus implicaciones. Los medios de comunicación cometen serios errores al reportar la ciencia, porque a menudo tergiversan cómo se hace, y no llevan los acontecimientos que reportan a contextos más amplios. La rápida propagación de la desinformación –y en ocasiones de las salvajes acusaciones– especialmente a través de la blogosfera, ha demostrado que no se cuenta con las herramientas para evaluar la credibilidad de las fuentes de información, ni de la confiabilidad de las personas que las comentan. Los motores de búsqueda proporcionan acceso instantáneo a una amplia variedad de fuentes de información, pero sus sistemas de clasificación no son capaces de separar la desinformación motivada políticamente de los reportes científicos válidos, ni de ordenar por credibilidad los resultados ofrecidos. Irónicamente, luego de más de una década en la que la comunidad científica se ha vuelto cada vez más segura y más pesimista acerca del Cambio Climático, el público en general parece estar más inseguro y polarizado.

2. LA INVESTIGACIÓN EN EL ÁREA.

El desafío para la comunidad que investiga en Ingeniería de Software se puede enmarcar de la siguiente manera: como especialistas en tecnologías de software y como creadores de las futuras herramientas y técnicas de software, y en cómo aplicar sus conocimientos y experiencias particulares al desafío del Cambio Climático, y cómo comprender y aprovechar su capacidad intelectual particular. Los investigadores en Ingeniería de Software tienen habilidades para:

- Pensar computacionalmente.
- Comprender y modelar sistemas complejos e interrelacionados, y sistemas de sistemas.
- Analizar y priorizar los requisitos de los múltiples actores interesados.
- Aplicar la capacidad lógico-abstractiva para construir modelos abstractos y descomposiciones útiles de cada problema.
- Gestionar y coordinar los diseños de las comunidades *open source* a gran escala.
- Estudiar y comprender las fuerzas evolutivas que hacen parte de la infraestructura tecnológica.
- Identificar, diagnosticar y reparar errores en los sistemas socio-técnicos.
- Perfeccionar gradualmente los sistemas existentes e implementar mejoras para su uso operacional.
- Construir los sistemas de información y las herramientas de gestión del conocimiento que permitan una efectiva toma de decisiones.

- Desarrollar y verificar los complejos sistemas de control.
- Crear interfaces para tareas apropiadas y fáciles de usar, para la información compleja y las infraestructuras de comunicación.

Es decir, esta comunidad posee un conjunto único de habilidades relacionadas con el análisis, el modelamiento y el diseño o re-diseño de sistemas técnicos y tecnológicos complejos. Entonces, ¿cómo aplicar estas fuerzas intelectuales para hacer contribuciones significativas a cada uno de los desafíos de la mitigación del Cambio Climático, la adaptación y la formación?

El Cambio Climático es un problema sistémico, por lo que una acción eficaz requiere un enfoque interdisciplinar. En las Ciencias Naturales la atención se centra en los procesos físicos de la atmósfera y la biosfera que conducen al Cambio Climático; las ciencias de la geografía y el medio ambiente se centran en los impactos y en la adaptación de los ecosistemas y los sistemas sociales; la economía se centra en las ventajas y desventajas de los diversos instrumentos políticos para controlar las emisiones de gases de efecto invernadero, y en diversos campos de la ingeniería se realizan esfuerzos para desarrollar y desplegar nuevas tecnologías de energías alternativas con emisiones bajas en carbono. El elemento común a todas estas disciplinas es la *infraestructura software*, la cual debe ser apropiada para la colaboración y el intercambio de datos.

Para comprender esta interacción se necesita integrar dos componentes: 1) los *sistemas inteligentes*, para comprender cómo interactúan los procesos sociales y psicológicos –el comportamiento humano, la presión social, los medios de comunicación– con los procesos políticos –formulación de políticas, liderazgo, patrones de votación–, y cómo se afectan ambos por el nivel de comprensión de los procesos físicos del Cambio Climático [16], y 2) el *pensamiento computacional*, para comprender cómo rediseñar la infraestructura de conocimiento que genera la información acerca de todos esos procesos, y para factorizarla en acciones globales eficaces [17].

El progreso en estas cuestiones será posible mediante la comprensión de las necesidades de un conjunto de actores diverso: 1) los *científicos*, que necesitan herramientas para mejorar su comprensión de los sistemas de la Tierra, 2) los *sistemas formativos*, que necesitan herramientas para llegar a más comunidades para explicar cómo se hace y qué dice la ciencia, 3) los *comunicadores* y *escritores* de ciencia, que necesitan el acceso al conocimiento para incrementar la conciencia social acerca de las cuestiones prioritarias, 4) los *políticos*, que necesitan herramientas para diseñar, analizar y monitorear un conjunto articulado de normas

a nivel internacional, nacional y regional, 5) los *activistas* políticos y los organismos no gubernamentales, que necesitan coordinar sus campañas para presionar las acciones de los gobiernos, 6) los *individuos* y las *comunidades*, que necesitan reducir sus huellas de carbono y compartir información acerca de estrategias que funcionen y 7) los *científicos* e *ingenieros*, quienes desarrollan y despliegan sistemas de energía alternativa. Pero si no se trabaja de forma interdisciplinar, incluyendo a la Ingeniería de Software como eje integrador, todos los esfuerzos pueden llevar a fracasos.

3. EL ROL DE LA INGENIERÍA DE SOFTWARE.

Estos desafíos y necesidades se analizaron en dos talleres acerca de la investigación en software y el Cambio Climático: el Object-Oriented Programming, Systems, Languages & Applications –OOPSLA–, en octubre de 2010 en Reno, Nevada, y la International Conference on Software Engineering –ICSE–, en mayo de 2011 en Honolulu, Hawaii. En estos talleres se identificaron algunos desafíos para la investigación en Ingeniería de Software, cada uno con un conjunto de problemas relacionados. A continuación se relacionan algunos de esos desafíos y se presenta la reflexión respectiva.

3.1 CIENCIA COLABORATIVA SOPORTADA POR COMPUTADOR.

El primer desafío consiste desarrollar una nueva infraestructura software para soportar y acelerar el trabajo interdisciplinar entre las ciencias del clima y sus disciplinas afines. Ejemplos de investigación en este espacio incluyen:

- Gestión de datos para el almacenamiento científico intensivo. El desafío es proporcionar los metadatos apropiados y las semánticas, para que los usuarios finales conozcan qué existe, cómo se obtuvo, qué procesamiento se le ha dado, y qué supuestos y limitaciones existen en los datos.
- Herramientas/técnicas de Ingeniería de Software, para desarrollar y optimizar los modelos de los sistemas del planeta. El desafío aquí es construir modelos legibles, accesibles a pruebas, mantenibles y portables, para acelerar el proceso de obtención de ideas científicas en la temática de trabajo, pero sin comprometer su valor como instrumentos científicos.
- Ciencia de cuaderno abierto. La idea es poder utilizar cuadernos electrónicos y herramientas *workflow* – que permiten la implementación de técnicas de procesos de negocio– para realizar investigaciones transparentes y repetibles, vinculadas a herramientas de redes sociales para encontrar conocimiento y mapear fuentes de experticia.

3.2 SOFTWARE PARA TOMAR DECISIONES COLECTIVAS.

Este desafío implica el desarrollo de una amplia gama de herramientas para compartir información, con el objetivo de mejorar la comprensión pública de la ciencia mediante el apoyo de decisiones a múltiples niveles: individual, comunitario, gubernamental e intergubernamental. Ejemplos de investigaciones en este espacio son:

- Software de simulación, para juegos y formación, con el objetivo de apoyar la comprensión pública de la ciencia. Las visualizaciones adecuadas juegan un rol importante en la comunicación de la ciencia del Cambio Climático; sin embargo, las simulaciones científicas a menudo se construyen sin tener en cuenta cómo comunicar los resultados a un público más amplio, mientras que las visualizaciones desarrolladas por no-científicos se construyen sin las adecuadas conexiones a los avances científicos recientes. Esta investigación debe reunir los avances científicos con la experiencia en visualización y diseño de información, para desarrollar herramientas iterativas que impacten en el público no especializado.
- Sistemas confiables, para crear nuevas formas de control de calidad de las fuentes de información basadas en la Web. El desafío es tomar los procesos tradicionales que utilizan los pares evaluadores de la literatura científica y aplicarlos a las fuentes de información y a los participantes en las comunidades en línea. Un problema relacionado es la aplicación de esos sistemas a los motores de búsqueda, dada su dificultad para incluir como filtro en los resultados una evaluación a la credibilidad y a la experiencia pertinente.
- Herramientas software de inteligencia colectiva que utilicen técnicas de *crowdsourcing* –tercerización masiva–, para mejorar la calidad de las evidencias y el análisis para las acciones en el Cambio Climático. El desafío particular es lograr que los pasos utilizados en el análisis cuantitativo y cualitativo sean visibles y abiertos para permitir la colaboración masiva, de modo que una amplia comunidad colaborativa puede probar y ajustar los supuestos y ver cómo se utilizan en el análisis, para vincular esos pasos con las fuentes de las evidencias.
- Herramientas software de soporte para contabilizar el carbono, especialmente para los reguladores y para la toma de decisiones corporativas. El desafío es lograr una evaluación precisa del uso de combustibles fósiles en el proceso de toma de decisiones, de manera que las emisiones de carbono se puedan manejar como un recurso comercializable.

3.3 GREEN IT.

El tercer desafío se orienta a optimizar la energía que los productos de la Ingeniería de Software, y de todas las cosas que controlan, requieren para funcionar. Este tipo de investigación incluye:

- Energía para computación consiente, incluyendo una mejor gestión de la energía en todos los sistemas informáticos, desde dispositivos móviles hasta los servicios de computación en la nube y los centros de datos, tal como lo propone el trabajo de Aebischer [18].
- Controladores inteligentes, para optimizar y equilibrar el consumo en “todo” lo que necesite energía para funcionar, y proporcionarles retroalimentación apropiada a los usuarios para que puedan ajustar el uso de estos dispositivos para alcanzar mayor eficiencia y eficacia.
- Diseño de software “verde”, en el que la sostenibilidad se considere como un requisito de primer orden en todas las etapas de desarrollo del producto, con lo que se reduciría el impacto ambiental de los nuevos sistemas. El desafío consiste en identificar las formas en que se entrelaza el software y la actividad humana, lo que daría lugar a sistemas software que reducirían las opciones disponibles para la sostenibilidad.

4. CONCLUSIONES.

El Cambio Climático es un problema serio y urgente cuya solución demanda una movilización de esfuerzos desde muchas y diferentes disciplinas. Los problemas que se discuten en este documento no se pueden resolver sólo con una adecuada aplicación de la Ingeniería de Software, pero sus productos y el pensamiento computacional son componentes críticos de la solución. Se identificaron tres áreas clave en las que se podrían enfocar los esfuerzos: 1) productos para apoyar a la ciencia en la comprensión del Cambio Climático, 2) productos para apoyar la toma de decisiones colectivas a nivel global y 3) productos para reducir la huella de carbono del desarrollo tecnológico moderno.

Además, se aboga por un debate continuo acerca de cómo enfocar las habilidades y el conocimiento de la comunidad y la investigación en Ingeniería de Software para hacer frente al desafío del Cambio Climático. Para lograrlo se necesita una movilización masiva de talentos, tal como lo han hecho otras disciplinas a través de respuestas disciplinares a este desafío [3, 19, 20]. Por todo esto es momento que la comunidad que investiga en Ingeniería de Software haga presencia con propuestas efectivas y eficientes.

La otra cuestión importante es que una adecuada formación en Ingeniería de Software, para los científicos y demás personas relacionadas con el problema del Cambio Climático, permitirá que en el futuro los productos software respondan a un menor consumo de energía, y a que los procesos involucrados aporten para lograr una huella de carbono mucho menor que se proyecta actualmente.

5. REFERENCIAS.

- [1] ALLISON, Ian et al. The Copenhagen Diagnosis: Climate Science Report, 2009. Updating the World on the Latest Climate Science. Sydney: The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC), 2009. 62 p.
- [2] PARRY, Martin L. et al. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: Cambridge University Press, 2007. 976 p.
- [3] CAMPBELL-LENDRUM, Diarmid et al. Health and climate change: a roadmap for applied research. The Lancet Vol. 373, No. 9676, p. 1663-1665. USA: Elsevier, 2009.
- [4] RAMANATHAN, Veerabhadran and YAN Feng. On avoiding dangerous anthropogenic interference with the climate system: Formidable challenges ahead. PNAS Vol. 105, No. 38, p. 14245-14250. USA: Harvard University, 2008.
- [5] MACKAY, David J. C. Sustainable Energy - Without the hot air. Cambridge: UIT Press, 2009. 384 p.
- [6] THE CLIMATE GROUP. SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age. Brussels: The Global eSustainability Initiative, 2008. 87 p.
- [7] EDWARDS, Paul N. A Vast Machine: Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming. Cambridge: MIT Press, 2010. 552 p.
- [8] HANSEN, James et al. Global surface temperature change. Reviews of Geophysics Vol. 48, No. 4, p. 1-29. USA: Wiley, 2010.
- [9] REED, Sarah. Oxburgh report clears controversial climate research unit. Science No. 328, p. 415. USA: AAAS, 2010.
- [10] SLINGO, Julia Mary et al. Developing the next-generation climate system models: challenges and achievements. Philosophical Transactions of the Royal Society A Vol. 367, No. 1890, p. 815-831. UK: The Royal Society, 2009.
- [11] EASTERBROOK, Steve M. and TIMOTHY C. Johns. Engineering the software for understanding climate change. Computing in Science and Engineering Vol. 11, No. 6, p. 65-74. USA: American Institute of Physics, 2009.
- [12] COLLINS, Nancy et al. Design and implementation of components in the earth system modeling framework. International Journal of High Performance Computing Applications Vol. 19, No. 3, p. 341-350. UK: DeepDyve, 2005.
- [13] DUNLAP, Rocky et al. Earth system curator: metadata infrastructure for climate modeling. Earth Science Informatics Vol. 1, No. 3-4, p. 131-149. USA: Elsevier, 2008.
- [14] PIPITONE, Jon. Software quality in climate modelling. Toronto, Canada, 2010, 75 p. Master's thesis. University of Toronto. Department of Computer Science.
- [15] BOX, George E.P. Science and Statistics. Journal of the American Statistical Association Vol. 71, No. 356, p. 791-799. USA: American Statistical Association, 1976.
- [16] WEINBERG, Gerald M. An Introduction to General Systems Thinking. UK: Dorset House, 2001. 320 p.
- [17] WING, Jeannette M. Computational thinking. Communications of the ACM Vol. 49, No. 3, p. 33-35, 2006.
- [18] AEBISCHERI, Bernardo. Hacia la eficiencia energética en la computación. Ing. USBMed Vol. 1, No. 1, p. 29-38. Medellín: Universidad de San Buenaventura, 2010.
- [19] NAGEL Joane, DIETZ Thomas and BROADBENT Jeffrey. Workshop on Sociological Perspectives on Global Climate Change. Arlington: National Science Foundation, 2009. 156 p.
- [20] SWIM, Janet et al. Psychology & Global Climate Change. USA: American Psychological Association, 2009. 108 p.