

# Arquitecturas Multiprocesador en HPC: Software, Métricas y Aplicaciones.

De Giusti Armando<sup>1,2</sup>, Tinetti Fernando<sup>1,3</sup>, Naiouf Marcelo<sup>1</sup>, Chichizola Franco<sup>1</sup>, De Giusti Laura<sup>1</sup>, Villagarcía Horacio<sup>1,3</sup>, Montezanti Diego<sup>1</sup>, Encinas Diego<sup>1</sup>, Pousa Adrián<sup>1</sup>, Rodríguez Ismael<sup>1</sup>, Eguren Sebastián<sup>1</sup>, Iglesias Luciano<sup>1</sup>, Paniego Juan Manuel<sup>(1)</sup>, Pi Puig Martín<sup>(1)</sup>, Dell'Oso Matías<sup>(1)</sup>, Mendez Mariano<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigación en Informática LIDI (III-LIDI)

Facultad de Informática – Universidad Nacional de La Plata

<sup>2</sup>CONICET – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

<sup>3</sup>CIC - Comisión de Investigaciones de la Provincia de Buenos Aires

<sup>4</sup>Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires

{degiusti, fernando, mnaiouf, francoch, ldgiusti, hvw, dmontezanti, dencinas, apousa, ismael, seguren, li, mmendez, jmpaniego, mpipuig, mdelloso}@lidi.info.unlp.edu.ar, marianomendez@gmail.com

Con la colaboración en la dirección de Tesis de Posgrado de la Universidad Autónoma de Barcelona (España) y la Universidad Complutense de Madrid (España).

## Resumen

Caracterizar las arquitecturas multiprocesador distribuidas enfocadas especialmente a cluster y cloud computing, con énfasis en las que utilizan procesadores de múltiples núcleos (multicores, GPUs y Xeon Phi), con el objetivo de modelizarlas, estudiar su escalabilidad, analizar y predecir performance de aplicaciones paralelas, estudiar el consumo energético y su impacto en la performance así como desarrollar esquemas para detección y tolerancia a fallas en las mismas.

Profundizar el estudio de arquitecturas basadas en GPUs y su comparación con clusters de multicores, así como el empleo combinado de GPUs y multicores en computadoras de alta performance. Iniciar investigación experimental con arquitecturas paralelas basadas en FPGAs. En particular estudiar performance en Clusters “híbridos”.

Analizar y desarrollar software de base para clusters, tratando de optimizar el rendimiento.

Investigar arquitecturas multicore asimétricas, desarrollar algoritmos de planificación en el software de sistema operativo para permitir la optimización del rendimiento y consumo energético en aplicaciones de propósito general.

Estudiar clases de aplicaciones inteligentes en tiempo real, en particular el trabajo colaborativo de robots conectados a un cloud.

Es de hacer notar que este proyecto se coordina con otros proyectos en curso en el III-LIDI, relacionados con Algoritmos Paralelos, Sistemas Distribuidos y Sistemas de Tiempo Real.

**Palabras claves:** *Sistemas Paralelos. Multicore. GPU. FPGAs, Cluster y Cloud Computing. Cluster híbridos. Performance y eficiencia energética. Tolerancia a fallas en Sistemas paralelos. Modelos de programación de arquitecturas paralelas. Planificación. Scheduling. Cloud Robotics.*

## Contexto

Esta línea de Investigación está dentro del proyecto 11/F018: “Arquitecturas multiprocesador en HPC: Software de base, Métricas y Aplicaciones acreditado por el Ministerio de Educación y de proyectos específicos apoyados por organismos nacionales e internacionales.

El III-LIDI forma parte del Sistema Nacional de Cómputo de Alto Desempeño (SNCAD) del MINCYT y en esta línea de I/D hay cooperación con varias Universidades de Argentina y se está trabajando con Universidades de América Latina y Europa en proyectos financiados por CyTED, AECID y la OEI (Organización de Estados Iberoamericanos).

En la Facultad de Informática de la UNLP (a partir del equipo del proyecto) se han incorporado asignaturas optativas en la curricula de grado de las carreras de Licenciatura en Informática, Licenciatura en Sistemas e Ingeniería en Computación relacionadas con Cloud Computing, Big Data y Programación sobre GPGPUs. Además, la Facultad aprobó y financia el proyecto “Cloud Computing y Big Data. Aplicaciones a HPC y Cloud Robotics”.

Se participa en iniciativas como el Programa IberoTIC de intercambio de Profesores y Alumnos de Doctorado en el área de Informática, así como el desarrollo de la Maestría y Especialización en Computación de Altas Prestaciones, acreditadas por CONEAU.

Por último, se tiene financiamiento de Telefónica de Argentina en Becas de grado y posgrado y se ha tenido el apoyo de diferentes empresas (IBM, Microsoft, Telecom, INTEL, AMAZON AWS) en las temáticas de Cloud Computing y Big Data.

## Introducción

La investigación en Paralelismo (a partir de arquitecturas multiprocesador distribuidas o

concentradas en supercomputadoras) es una de las líneas de mayor desarrollo en la Ciencia Informática actual [GRA03]. La utilización de clusters, multiclusters, grids y clouds, soportadas por redes de diferentes características y topologías se ha generalizado, tanto para el desarrollo de algoritmos paralelos orientados a HPC como para el manejo de aplicaciones distribuidas y/o servicios WEB concurrentes [GRA03][MCC12][DON03][BEN06].

El cambio tecnológico, fundamentalmente a partir de los procesadores multicore, ha impuesto la necesidad de investigar en paradigmas "híbridos", en los cuales coexisten esquemas de memoria compartida con mensajes [LEI12][POU11]. Asimismo la utilización de aceleradores (GPU, FPGA, Xeon Phi) presenta una alternativa para alcanzar un alto speedup en determinadas clases de aplicaciones [MON12][KIN09][SIN12][LIN11]. Debe notarse que el modelo de programación orientado a estas arquitecturas cambia sensiblemente y la optimización de código paralelo requiere nuevos recursos.

Por otro lado, recientemente han aparecido los procesadores multicore asimétricos (AMPs) que integran en un mismo chip diversos tipos de cores con distintas características (frecuencia, microarquitectura o consumo), pero con el mismo repertorio de instrucciones. Investigaciones previas han demostrado que los AMPs ofrecen un mayor rendimiento por watt y unidad de área que los multicores simétricos [SAE10][ANN12]. Además se ha demostrado que la integración de sólo dos tipos de core (rápidos y lentos) en el chip permite una utilización muy eficiente del área del procesador y simplifica considerablemente el diseño.

Es importante en este contexto re-analizar el concepto de *eficiencia* incluyendo tanto al aspecto computacional como el energético y considerar el impacto del consumo sobre arquitecturas con miles de procesadores que trabajan concurrentemente, este concepto extendido de eficiencia conduce a un estudio de nuevos lenguajes, paradigmas y herramientas [RUC16][BAL12].

Las arquitecturas tipo "*Cloud*" se presentan como una evolución natural del concepto de *Clusters* y *Grids*, integrando grandes conjuntos de recursos virtuales (hardware, plataformas de desarrollo y/o servicios), fácilmente accesibles y utilizables por usuarios distribuidos, vía WEB [MIL08][VAQ09][FOS10]. Estos recursos pueden ser dinámicamente reconfigurados para adaptarse a una carga variable, permitiendo optimizar su uso. Al enfocarnos en Cloud Computing aparecen problemas clásicos de la Ciencia Informática, extendidos para este nuevo modelo de arquitectura: planificación, virtualización, asignación dinámica de recursos, migración de datos y procesos [ARD09][VAZ09]. En el proyecto se ha

abierto una línea específicamente dedicada a Cloud Computing, incluyendo los temas de configuración y administración eficiente de Cloud, así como las aplicaciones sobre Cloud incluyendo las de "big data", y aquellas que requieren centralizar el accionar de "robots" distribuidos en tiempo real (Cloud Robotics) [MAY13].

Las aplicaciones científicas con un uso intensivo de datos utilizan software de E/S paralelo para acceder a archivos. Contar con herramientas que permitan predecir el comportamiento de este tipo de aplicaciones en HPC es de gran utilidad para los desarrolladores de aplicaciones paralelas. Por otro lado, el modelado basado en agentes y simulación (Agent-Based Modeling and Simulation, ABMS) [MAC06] ha sido utilizado para modelar problemas y sistemas complejos en diversas áreas de la ciencia. También es importante focalizar la investigación en los problemas de detección y tolerancia a fallos en arquitecturas paralelas, tratando de minimizar el overhead temporal y aprovechar la redundancia de hardware (nivel de ocupación de los núcleos) que caracteriza estas arquitecturas [GOL09][FIA11]. El manejo de fallos es una preocupación creciente en HPC; en el futuro, se esperan mayores tasas de errores, intervalos de detección más largos y fallos silenciosos, que tienen la capacidad de corromper los resultados de las aplicaciones. Debido a ello, sus impactos se vuelven relevantes, en especial cuando se consideran aplicaciones científicas de gran duración, debido al alto costo de relanzar la ejecución desde el comienzo en caso de resultados incorrectos. Se proyecta que, en sistemas de exaescala, los errores ocurran varias veces al día y se propaguen para generar desde caídas de procesos hasta corrupciones de resultados, con fallos no detectados en aplicaciones que siguen operando. Por ello, se han desarrollado herramientas de detección de fallos transitorios [MON12][MON14][MON15] basadas en replicación de software, detectando divergencias en las comunicaciones entre réplicas y evitando que la corrupción se propague a otros procesos y restringiendo la latencia de detección. De esta forma se permiten obtener ejecuciones fiables con resultados correctos o conducir al sistema a una parada segura.

Interesan también los problemas que significan integración de redes de sensores con modelos del mundo real (por ej. modelos meteorológicos, hídricos o de terreno) para prevención de emergencias [SIN06][GAU16]. En esta línea, el eje del proyecto sigue estando en la problemática del paralelismo combinado con sistemas de tiempo real, pudiendo contribuir a proyectos multidisciplinarios, en particular por temas de emergencias hídricas, exploración de recursos naturales y temas de atención sanitaria y evacuación de edificios en situaciones de emergencia.

## Líneas de Investigación, Desarrollo e Innovación

- Estudio y caracterización de arquitecturas paralelas: clusters, grids, clouds, aceleradores (GPU, FPGA, Xeon Phi), híbridos.
- Desarrollo de algoritmos de planificación de procesos orientado a procesadores asimétricos es una línea de interés por la posibilidad de especializar algunos núcleos a funciones específicas, optimizando el rendimiento general. Investigación en los diferentes niveles: sistema operativo, compiladores, técnicas de programación.
- Desarrollo de aplicaciones concretas (numéricas y no numéricas) sobre diferentes arquitecturas paralelas, y el estudio de paradigmas y patrones de programación. Técnicas de optimización de aplicaciones paralelas.
- Desarrollo de técnicas de tolerancia a fallas en sistemas paralelos y distribuidos, lo cual supone un avance en el estudio de las formas de aprovechar la redundancia de dichas arquitecturas que no resulten eficientemente utilizadas.
- Desarrollo de herramientas para la transformación de código heredado, buscando su optimización sobre arquitecturas paralelas.
- Integración de métricas de rendimiento computacional y energético. Predicción de performance de aplicaciones paralelas.
- Cloud Computing. Software de base. Desarrollo de aplicaciones de HPC (principalmente de big data).
- Sistemas inteligente distribuidos de tiempo real conectados al Cloud (Cloud Robotics).

## Resultados y Objetivos

- Estudiar modelos complejos, que integren redes de sensores en tiempo real y cómputo paralelo. Estrategias de predicción de catástrofes (inundaciones, incendios por ejemplo) se basan en estos modelos con alta capacidad de procesamiento y monitoreo de señales en tiempo real [GAU16].
- Se han desarrollado diferentes aplicaciones adaptadas para diferentes arquitecturas "híbridas" (que combinan multicore y aceleradores), y analizado/comparado el rendimiento obtenido [RUC16][POU15][MON12].
- Analizar y adaptar los patrones de programación eficiente de algoritmos híbridos que exploten simultáneamente el paradigma de mensajes y el de memoria compartida.[POU15][RUC16][MON12].
- Se está trabajando en técnicas de recuperación desde fallas transitorias a partir de múltiples puntos de verificación (checkpoints), que sirvan para garantizar la correcta finalización de

aplicaciones científicas sobre sistemas de HPC, que resultan afectadas por la ocurrencia de fallas externas y aleatorias [MON14][MON15]. Para ello deben realizarse múltiples checkpoints incrementales distribuidos (sin sobreescritura) y desarrollar técnicas de selección de versión en función de la presencia de un fallo latente no detectado previamente, integrando esta solución con las herramientas de detección desarrolladas previamente.

- Realizar el desarrollo de nuevos planificadores de tareas para multicore asimétricos sobre diferentes sistemas operativos con el objetivo de maximizar el rendimiento y minimizar el consumo de energía [SAE15][POU15].
- Desarrollo de un modelo de la Entrada/Salida en HPC por medio de ABMS (Agent-Based Modeling and Simulation) que permita predecir cómo cambios realizados en los diferentes componentes del modelo afectan a la funcionalidad y el rendimiento del sistema [ENC15].
- Desarrollo de aplicaciones vinculadas con "Big Data", especialmente para resolver en Cloud Computing [BAS15]. (en relación con los otros proyectos del III-LIDI).
- Optimización de algoritmos paralelos para controlar el comportamiento de múltiples robots que trabajan colaborativamente, considerando la distribución de su capacidad de procesamiento "local" y la coordinación con la potencia de cómputo y capacidad de almacenamiento (datos y conocimiento) de un Cloud.
- Actualización y modernización de código fuente de Sistemas Heredados (Legacy Systems) de Cómputo Científico a través de la aplicación de un proceso de desarrollo iterativo e incremental dirigido por transformaciones de código fuente, apoyado fuertemente en las herramientas de desarrollo. Dichas transformaciones se implementan para ser aplicadas automáticamente en un entorno integrado de desarrollo [MEN14].
- Trabajar en la implementación de transformaciones que ayuden a la paralelización del código fuente, así como también en herramientas de análisis estático de Código fuente [TIN13].
- Adaptar las técnicas de scheduling y mapeo de procesos a procesadores de acuerdo a los objetivos actuales (en particular los relacionados con el consumo), considerando la migración dinámica de datos y procesos en función de rendimiento y consumo [GRA03][DEG10]. Se debe incluir la utilización de los registros de hardware de los procesadores para la toma de diferentes decisiones en tiempo de ejecución.
- Analizar y comparar las técnicas de migración en vivo de VMs, con el fin de implementar migraciones de VCs homogéneos y heterogéneos en Cloud Computing.

## Formación de Recursos Humanos

En cooperación con Universidades iberoamericanas se ha implementado la Maestría en Cómputo de Altas Prestaciones y se continúa dictando la Especialización en Cómputo de altas Prestaciones y Tecnología GRID. Asimismo se tiene un importante número de doctorandos (del país y del exterior) realizando el Doctorado en Ciencias Informáticas de la UNLP.

Se han organizado las III Jornadas de Cloud Computing & Big Data (JCC&BD), y se realizarán en junio de 2016 las IV JCC&BD, integrando una Escuela con cursos de Posgrado relacionados con la temática.

Existe cooperación a nivel nacional e internacional y dentro de la temática del proyecto se espera alcanzar 8 Tesis de Doctorado y 6 Tesis de Maestría en los próximos 4 años, en el país. Al menos tener 3 Doctorandos en el exterior o mixtos en el mismo período.

En 2015 se aprobaron 5 Tesis Doctorales [FRA15][WOL15][MIC15][RUC16][GAU15] y otra está entregada para evaluación. También se aprobaron 6 trabajos de Especialista, 1 Tesis de Magister y 2 Tesinas de grado.

## Referencias

[ANN12] Annamalai A., Rodrigues R., Koren I., Kundu S., "Dynamic Thread Scheduling in Asymmetric Multicores to Maximize Performance-per-Watt," 2012 IEEE 26th International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops & PhD Forum, pp. 964-971, 2012 IEEE 26th International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops & PhD Forum, 2012.

[ARD09] Ardissono L., Goy A., Petrone G., Segnan M. "From Service Clouds to User-centric Personal Clouds". 2009 IEEE Second International Conference on Cloud Computing.

[BAL12] Balladini J., Rucci E., De Giusti A., Naiouf M., Suppi R., Rexachs D., Luque E. "Power Characterisation of Shared-Memory HPC Systems". XII Workshop de Procesamiento Distribuido y Paralelo. CACIC 2012. ISBN: 978987-1648-34-4. Pág. 316-326. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina, Octubre 2012.

[BAS15] Basgall M. J., Aquino G., Lanzarini L., Naiouf M. "Un Enfoque Dinámico para la Detección de Relaciones entre Tópicos en Textos provenientes de Redes Sociales". III Jornadas de Cloud Computing y Big Data (JCC&BD). Facultad de Informática. UNLP. 2015.

[BEN06] Ben-Ari, M. "Principles of Concurrent and Distributed Programming, 2/E". Addison-Wesley, 2006.

[DEG10] De Giusti L., Chichizola F., Naiouf M., De Giusti A.E., Luque E. "Automatic Mapping Tasks to Cores - Evaluating AMTHA Algorithm in Multicore Architectures". IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 7, Issue 2, No 1, March 2010. ISSN (Online): 1694-0784. ISSN (Print): 1694-0814. Págs. 1-6.

[DON03] Dongarra J., Foster I., Fox G., Gropp W., Kennedy K., Torczon L., White A. "The Sourcebook of Parallel

Computing". Morgan Kauffman Publishers. Elsevier Science, 2003.

[ENC15] D. Encinas et al., Modeling I/O System in HPC: An ABMS Approach. The Seventh International Conference on Advances in System Simulation (SIMUL), ISBN: 978-1-61208-442-8, 2015

[FIA11] Fialho L. "Fault Tolerance configuration for uncoordinated checkpoints". Ph.D. Thesis, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España, Julio 2011.

[FRA15] Frati E. "Software para arquitecturas basadas en procesadores de múltiples núcleos. Detección Automática de errores de concurrencia" Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata, Marzo 2015.

[GAU15] Adriana Gaudiani. "Simulación y optimización como metodología para mejorar la calidad de la predicción en un entorno de simulación hidrográfica". Tesis de Doctorado en Ciencias Informáticas (Facultad de Informática – UNLP). 2015.

[GAU16] Adriana Gaudiani, Emilio Luque, Pablo García, Mariano Re, Marcelo Naiouf, Armando De Giusti. "How a Computational Method Can Help to Improve the Quality of River Flood Prediction by Simulation". Advances and New Trends in Environmental and Energy Informatics (part V). ISBN 978-3-319-23455-7. Pp337-351. 2016.

[GOL09] Golander A., Weiss S., Ronen R. "Synchronizing Redundant Cores in a Dynamic DMR Multicore Architecture". IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs Volume 56, Issue 6, 474-478. 2009.

[GRA03] Grama A, Gupta A, Karypis G, Kumar V. "Introduction to parallel computing". Second Edition. Pearson Addison Wesley, 2003.

[KIN09] Kindratenko, V.V.; Enos, J.J.; Guochun Shi; Showerman, M.T.; Arnold, G.W.; Stone, J.E.; Phillips, J.C.; Wen-Mei Hwu, "GPU clusters for high-performance computing," Cluster Computing and Workshops, 2009. CLUSTER '09. IEEE International Conference on , vol., no., pp.1,8, Aug. 31 2009-Sept. 4 2009

[LEI12] Leibovich F., Chichizola F., De Giusti L., Naiouf M., Tirado Fernández F., De Giusti A. "Programación híbrida en clusters de multicore. Análisis del impacto de la jerarquía de memoria". XII Workshop de Procesamiento Distribuido y Paralelo. CACIC2012. ISBN: 978987-1648-34-4. Pág. 306-315. 2012.

[LIN11] Lingyan Wang, Miaoqing Huang, and Tarek El-Ghazawi. "Towards efficient GPU sharing on multicore processors". In Proceedings of the second international workshop on Performance modeling, benchmarking and simulation of high performance computing systems (PMBS '11). ACM, New York, NY, USA, 23-24. 2011.

[MAC06] C. Macal, M. North, Tutorial on agent-based modeling and simulation part 2: how to model with agents, in: Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2006.

[MAY13] Mayer-Schönberger V., Cukier K., "Big Data: A revolution that will transform how we live, work and think" Houghton Mifflin Harcourt 2013.

[MEN14] "Integrating Software Metrics for Fortran Legacy into an IDE". Mariano Mendez, Fernando G. Tinetti. XI Workshop Ingeniería de Software – CACIC 2014. ISBN 978-987-3806-05-6. Pág. 771-780. San Justo, Buenos Aires, Argentina. Octubre 2014.

[MCC12] McCool M., Robison A., Reinders J. "Structured Parallel Programming" Elsevier-Morgan Kaufmann, 2012.

- [MIC15] Micolini O. "Arquitectura asimétrica multicore con procesador de Petri" Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata, Marzo 2015.
- [MIL08] Miller M. "Cloud computing: web-based applications that change the way you work and collaborate online". Que Publishing. USA 2008.
- [MON12] Diego Montezanti, Dolores Rexachs, Enzo Rucci, Emilio Luque, Marcelo Naiouf, Armando De Giusti. "Caracterización de una estrategia de detección de fallos transitorios en HPC". XXI CACIC 2015 (Congreso de Ciencias de la Computación) - XV Workshop de Procesamiento Paralelo y Distribuido (WPDP). ISBN: 978-987-3724-37-4.
- [MON12] Diego Montezanti, Fernando Emmanuel Frati, Dolores Rexachs, Emilio Luque, Marcelo Naiouf, Armando De Giusti. "SMCV: a Methodology for Detecting Transient Faults in Multicore Clusters". CLEI Electronic Journal, Volumen 15, Número 3 (Diciembre 2012). Páginas: 49 a 59. ISSN 0717- 5000.
- [MON12] Montes de Oca E., De Giusti L., De Giusti A., Naiouf M. "Comparación del uso de GPU y cluster de multicore en problemas con alta demanda computacional". XII Workshop de Procesamiento Distribuido y Paralelo. CACIC2012. ISBN: 978987-1648-34-4. Pág. 267-275. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina, Octubre 2012.
- [MON14] Diego Montezanti, Enzo Rucci, Dolores Rexachs, Emilio Luque, Marcelo Naiouf, Armando De Giusti. "A tool for detecting transient faults in execution of parallel scientific applications on multicore clusters". Journal of Computer Science & Technology (JCS&T), Volumen 14, Número 1 (Abril 2014). Páginas: 32 a 38. ISSN: 1666-6038.
- [FOS10] Foster I. "There's Grid in them thar Clouds". 2 de Enero, 2008.<http://ianfoster.typepad.com/blog/2008/01/theres-grid-in.html>. Noviembre, 2010.
- [POU11] Pousa A., Sanz V., De Giusti A. "Análisis de rendimiento de un algoritmo de criptografía simétrica sobre arquitecturas multicore", Proceedings del XVII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC 2011), La Plata (Argentina), 2011, ISBN: 978-950-34-0756-1. Págs: 231-240.
- [POU15] Adrian Pousa, Victoria Sanz, Armando De Giusti. Comparación de rendimiento de algoritmos de cómputo intensivo y de acceso intensivo a memoria sobre arquitecturas multicore. Aplicación al algoritmo de criptografía AES. CACIC 2015 (XXI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación). 2015.
- [RUC16] Rucci, Enzo. "Evaluación de rendimiento y eficiencia energética en sistemas heterogéneos para bioinformática". Tesis de Doctorado en Ciencias Informáticas (Facultad de Informática – UNLP). 2016.
- [SAE10] Sáenz J. C. "Planificación de Procesos en Sistemas Multicore Asimétricos". Ph.D. Thesis, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, Diciembre 2010.
- [SAE15] Juan Carlos Saez, Adrian Pousa, Daniel Chaver, Fernando Castro, Manuel Prieto Matias. ACFS: A Completely Fair Scheduler for Asymmetric Single-ISA Multicore Systems. ACM SAC 2015 (The 30TH ACM/SIGAPP Symposium on applied computing). 2015.
- [SIN06] Singh B. D. "Influence of Digital Elevation Models Derived from Remote Sensing on SpatioTemporal Modelling of Hydrologic and Erosion Processes". Thesis for Degree of Doctor of Philosophy. pp 370. Cranfield University Siloe England. 2006.
- [SIN12] Sinha, R.; Prakash, A.; Patel, H.D., "Parallel simulation of mixed-abstraction SystemC models on GPUs and multicore CPUs," Design Automation Conference (ASP-DAC), 2012 17th Asia and South Pacific, pp.455,460, Jan. 30 2012-Feb. 2 2012.
- [TIN13] "Restructuring Fortran legacy applications for parallel computing in multiprocessors". Fernando G. Tinetti, Mariano Méndez, Armando De Giusti. The Journal of Supercomputing, May 2013, Volume 64, Issue 2, ISSN 0920-8542, DOI 10.1007/s11227-012-0863-x, pp 638-659.
- [VAQ09] Vaquero L.M. et al. "A Break in the Clouds: Towards a Cloud Definition". ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol. 39, num. 1, páginas 50-55, ISSN 0146-4833. Enero 2009.
- [VAZ09] Vázquez Blanco C., Huedo E., Montero R. S., Llorente I. M. "Elastic Management of Cluster-based Services in the Cloud". Proceedings pp. 19-24, ACM Digital Library 2009. ISBN 978-1-60558-564-2.
- [WOL15] Wolfmann G. "Parallel Execution Model based on Petri Nets" Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata, Febrero 2015.