

Computación de alto rendimiento para el procesamiento de imágenes digitales*¹

[High-performance computing for digital image processing]

MANUEL BOLAÑOS GONZÁLEZ², JOSÉ MARÍA MUÑOZ³, MARIO MONTENEGRO⁴

RECIBO: 20.11.2013 – APROBACIÓN: 08.04.2014

Resumen

En este proyecto se planteó la integración de un prototipo de malla computacional con un clúster heterogéneo fuertemente acoplado, con el propósito de aprovechar la capacidad de cómputo de estas tecnologías en el procesamiento de imágenes digitales obtenidas a través de un satélite durante el monitoreo del volcán Galeras. En el desarrollo de la investigación se utilizaron cuatro computadores, en los que mediante máquinas virtuales se implementó un prototipo de malla computacional y un prototipo del clúster. Estas máquinas se comunican a través de uno de los servicios de la malla, permitiendo enviar información de una imagen digital al clúster para realizar el tratamiento y el proceso de renderización de la imagen en paralelo, posteriormente se regresa el archivo resultante a la malla computacional, así los usuarios especializados pueden tomar decisiones relacionadas con procesos de sismografía o verificación de la emisión de ozono entre otros.

* Modelo para la citación de este artículo:

BOLAÑOS GONZÁLEZ, Manuel; MUÑOZ, José María & MONTENEGRO, Mario (2014). Computación de alto rendimiento para el procesamiento de imágenes digitales. En: Ventana Informática No. 30 (ene-jun). Manizales (Colombia): Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Manizales. p. 55-65. ISSN: 0123-9678

- 1 Artículo de investigación científica y tecnológica proveniente del proyecto *Malla computacional para el procesamiento de imágenes digitales de registros sísmicos del Volcán Galeras*, ejecutado en el periodo 02.2011 a 07.2013, e inscrito en el grupo de investigación GRIAS de la Universidad de Nariño..
- 2 Ingeniero de Sistemas, MSc. de la Información y las Comunicaciones, DEA en Ingeniería Informática. Profesor Asistente, Facultad de Ingeniería, Universidad de Nariño (Pasto, Nariño, Colombia). Correo electrónico: mbolanos@udenar.edu.co
- 3 Ingeniero de Sistemas, Especialista en Redes y Telemática, Profesor Asistente, Facultad de Ingeniería, Universidad de Nariño (Pasto, Nariño, Colombia). Correo electrónico: jmmb65@yahoo.com
- 4 Estudiante Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería Universidad de Nariño (Pasto, Nariño, Colombia). Correo electrónico: monte77@gmail.vpm

Palabras clave: Malla computacional; clúster; middleware; procesamiento de imágenes; renderización.

Abstract

This project integrated a grid computing prototype with a tightly-coupled heterogeneous cluster, in order to leverage the computing power of these technologies in processing digital satellite images during the monitoring of the Galeras volcano. In the development of the research, four computers were used in which a prototype of grid computing and a cluster were implemented by using virtual machines. These machines of the cluster are communicating via one of the services of the grid, allowing delivering information digital from an image to the cluster for processing it and rendering it in parallel, then the resulting file is returned to the grid computing; thus, specialized users can make decisions related to processes or verification seismographic ozone emissions among others.

Keywords: grid computing; cluster; middleware; image processing; rendering.

Introducción

Dado el avance vertiginoso de las tecnologías de la información y la comunicación, la necesidad de las organizaciones de procesar datos cada vez es más grande en cuanto a volumen, cantidad y exigencia de cálculos aritméticos, todo esto con el fin de tomar decisiones de manera rápida, eficiente y oportuna; de otra parte, dentro de la problemática que manejan las entidades se contempla la necesidad de atender a grupos de trabajo, equipos o dispositivos que trabajan de manera colaborativa, pero que están apartados geográficamente, y además, se requiere que los equipos de cómputo donde se concentran o se consolidan los datos, cuenten con una mayor capacidad de cómputo para atender de forma óptima a los diferentes procesos y usuarios.

Por consiguiente, es necesario emplear nuevas técnicas de procesamiento de datos, algunas basadas en la unificación de varios equipos de cómputo para que trabajen como uno solo, aumentando la velocidad de procesamiento trayendo como consecuencia la disminución de tiempo. Dando respuesta a lo anterior, existe una tecnología denominada *clúster* que permite el aprovechamiento y procesamiento óptimo de la información, logrando por una parte la reducción de costos porque no es necesario invertir en grandes servidores, sino que se puede hacer uso de computadores disponibles a un costo bastante reducido y por

otra, brinda la posibilidad de compartir, acceder y gestionar información, mediante la colaboración y la flexibilidad operacional.

No obstante, la capacidad computacional necesaria para abordar los requerimientos de proyectos de carácter científico es cada vez más elevada, debido a la complejidad y cantidad de datos que manejan, lo cual implica contar con un gran potencial de procesamiento, muchos de estos proyectos, como lo señala Schwiegelshohn & Yahyapour (2004), también requieren de la colaboración de numerosos grupos de personas, las cuales, así como los recursos de los que disponen, pueden pertenecer a una misma área o dominio de conocimiento en la que realizan sus tareas, pero también pueden encontrarse distribuidos geográficamente.

En este orden de ideas, *grid computing* o Malla Computacional, es una evolución de los sistemas distribuidos, basada en tecnologías que le facilitan a las organizaciones compartir recursos heterogéneos geográficamente dispersos, para procesar datos usando una red de alta velocidad que hace ver a la malla computacional como un sistema *stand alone* y permite aplicar todo el potencial de las comunicaciones para la integración de datos y entregar resultados con mayor rapidez según Janakiram (2005, 7).

En el contexto regional del suroccidente de Colombia, el fenómeno Galeras es considerado de alta prioridad dado el *gran* impacto social, ambiental y sobre todo humano, que podría verse afectado por la ocurrencia de un evento eruptivo y las posibles consecuencias de los movimientos telúricos; por lo tanto, señala OVSP (2014), existe en la región el Observatorio Vulcanológico de Pasto, entidad de carácter gubernamental, siendo su actividad misional la vigilancia y la investigación de los volcanes de Colombia. Por otro lado, cuenta con unos sistemas de monitoreo, con los cuales realiza un seguimiento permanente de la actividad volcánica del Galeras, para tener una referencia al respecto, los sensores reportan cerca de 100 datos por segundo, de los cuales se toman únicamente algunos de ellos en forma aleatoria y por consiguiente la toma de decisiones, a partir de imágenes digitales obtenidas de los satélites se debe realizar de manera semiautomática, a raíz del elevado nivel de requerimiento en el procesamiento de dichos datos, lo cual exige una alta capacidad de cómputo para brindar información oportuna.

Por lo tanto, una malla computacional es la opción más acorde para el procesamiento de imágenes digitales de registros sísmicos del Volcán Galeras, ya que permite integrar en un prototipo sus ventajas con el potencial y la capacidad de procesamiento de un clúster, con el fin de agilizar el procesamiento de imágenes digitales, promovien-

do y facilitando el trabajo colaborativo, la innovación, la resolución de problemas y la pronta toma de decisiones relacionadas con el fenómeno Galeras.

1. Fundamento teórico

1.1 Computación Grid

Llamada también *Grid Computing* o Malla Computacional, es un término que, de acuerdo con Molina (2003), «apareció a mediados de los años 90 en los trabajos de Ian Foster y Carl Kesselman. La idea de *grid* está enfocada fundamentalmente al acceso remoto a recursos computacionales y pretende ser un paradigma de desarrollo sin centrarse en una tecnología concreta». Se puede definir como una infraestructura de hardware y software no centralizada que asocia de forma segura recursos heterogéneos de diferentes dominios de administración con diferentes o iguales políticas de uso para resolver un problema específico.

Es de anotar, que Hamar et al. (2004), considera a la *computación Grid* como una evolución de los sistemas distribuidos, que se basa en tecnologías que le facilitan a las organizaciones compartir recursos heterogéneos geográficamente dispersos, formando organizaciones virtuales, para, de acuerdo con Jacob et al. (2005, 3) procesar dicha información usando una red de banda ancha de alta velocidad que hace ver a la malla computacional como un sistema *stand alone* y permite aplicar todo el poder de las comunicaciones para la integración de datos y entregar resultados con mayor rapidez. Para Asonavic et al. (2006), una organización adscrita a una malla computacional puede tener dificultades de almacenamiento; este problema que puede ser resuelto haciendo uso de las bondades de la malla computacional.

A diferencia de un sistema distribuido, una *Grid* va más allá de una simple compartición o intercambio de información entre equipos, incluye también el acceso directo a recursos *hardware*, *software*, datos o cualquier elemento disponible y siempre dentro de un plan estratégico de colaboración para solucionar un problema específico.

Desde otra perspectiva, la computación *Grid*, de acuerdo con Díaz et al. (2005), es una estructura de recursos que utiliza estándares abiertos, protocolos de propósito general e interfaces dirigidos fundamentalmente a la autenticación, autorización, descubrimiento de recursos y acceso a los mismos permitiendo optimizar los propósitos.

«El origen de la computación *Grid* se encuentra en el cómputo distribuido, el cual trata los desafíos de la carga de trabajo agregando y asig-

nando los recursos disponibles de una organización para proporcionar potencia de procesamiento ilimitada» (Landa, 2011, 17), lo que, expresa Foster & Kesselman (1998, 6), ofrece aplicaciones, datos, almacenamiento y recursos de red compartidos con una perfecta integración de sistemas y dispositivos heterogéneos de tal manera que el cliente no tenga la necesidad de preocuparse de dónde se localiza ni en qué sistema operativo residen los datos y demás recursos.

En una malla computacional, según Berstis (2002, 3), se pueden reutilizar los recursos, ejecutar un trabajo el que puede estar desarrollándose en diferentes máquinas de la malla computacional y al finalizar el trabajo, los resultados se agrupan para ser devueltos al usuario final. Además, expresa Berstis (2002, 2), la capacidad de procesamiento paralelo es una de las características más atractivas de las mallas computacionales, dado que suplen necesidades puramente científicas, que aplica luego a las necesidades de las industrias tales como en el campo biomédico, modelamiento numérico, modelamiento financiero, exploración petrolera, modelamiento químico, movimiento y animación gráfica y muchas otras aplicaciones.

1.2 Clúster

El término clúster se aplica a los conjuntos o conglomerados de computadoras construidos mediante la utilización de componentes de hardware comunes. Juegan hoy en día un papel importante en la solución de problemas de las ciencias, las ingenierías y del comercio moderno.

«La tecnología de clusters ha evolucionado en apoyo de actividades que van desde aplicaciones de supercómputo y software de misiones críticas, servidores web y comercio electrónico, hasta bases de datos de alto rendimiento, entre otros usos (...).

El cómputo con clusters surge como resultado de la convergencia de varias tendencias actuales que incluyen la disponibilidad de microprocesadores económicos de alto rendimiento y redes de alta velocidad, el desarrollo de herramientas de software para cómputo distribuido de alto rendimiento, así como la creciente necesidad de potencia computacional para aplicaciones que la requieran» (Ideas múltiples, 2012).

De acuerdo con lo mencionado por Castillo (2006), las características de los clústeres son: estar compuesto por dos o más nodos, los nodos están conectados entre sí por al menos un canal de comunicación, y se necesita de un software de control.

2. Metodología

La metodología utilizada para el desarrollo de esta investigación consta de las fases y actividades relacionadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Fases y actividades desarrolladas en el proyecto

Fase	Actividades
1. Identificar los tipos de imágenes de registros sísmicos más sensibles del fenómeno Galeras, por medio de entrevistas y revisión directa de los archivos digitales existentes en el observatorio vulcanológico de Pasto.	1.1. Lectura de documentos referentes a fenómeno Galeras 1.2. Clasificación del tipo de imágenes que maneja el observatorio vulcanológico de Pasto 1.3. Seleccionar las imágenes que cumplen las características para ser procesadas en la Malla Computacional
2. Analizar y determinar el algoritmo computacional que optimice el tratamiento de imágenes, bajo el esquema de un clúster y una Malla Computacional	2.1. Revisión y estudio de diferentes algoritmos para el procesamiento de imágenes 2.2. Seleccionar por medio de pruebas el algoritmo más adecuado para el tratamiento del tipo de imágenes identificadas
3. Implementar el prototipo de la Malla Computacional y del Clúster con las características suficientes para el funcionamiento del algoritmo de procesamiento de imágenes.	3.1. Selección de los equipos de cómputo y comunicaciones, y configuración de la Malla Computacional y el clúster 3.2. Implementación del algoritmo para el procesamiento de imágenes de registros sísmicos 3.3. Documentación del proceso
4. Validar la Malla Computacional y el Clúster con la aplicación de un caso de estudio específico	4.1. Identificar y estudiar un caso de estudio específico 4.2. Aplicar el caso de estudio identificado en la Malla Computacional y el clúster 4.3. Elaboración de reporte técnico y presentación sobre la aplicación del caso de estudio

3. Resultados y discusión

3.1 Descripción de resultados

Castro et al. (2010), utilizaron una infraestructura tecnológica de cuatro computadores disponibles en el laboratorio del grupo GRIAS, con los que se implementó un prototipo de malla computacional utilizando el *middleware Globus Toolkit 4*, sobre el sistema operativo GNU/Linux, distribución *Scientific Linux 4.4*, se conectaron los cuatro equipos y una máquina virtual a través de una red (Figura 1).

Los equipos *sred*, *ui*, *ui2*, *ui3* y *ca* forman la malla computacional, la cual se encarga de prestar los servicios *Grid* básicos. En cada computador se instaló el sistema operativo GNU/Linux, distribución

Scientific Linux 4.4 sobre el cual se instalaron todos los componentes necesarios para la construcción de la misma.

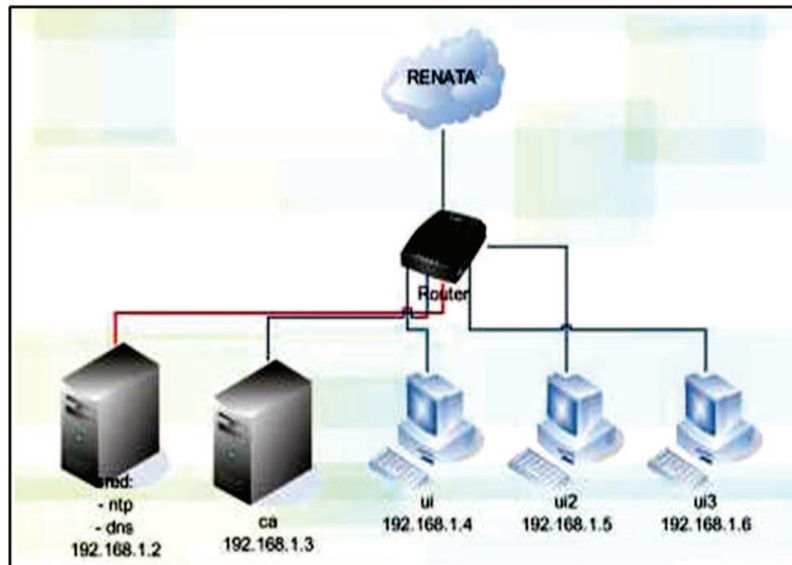


Figura 1. Prototipo malla computacional (Castro et al., 2010)

Luego se instaló *Globus Toolkit 4 (GT4)* en todos los computadores de la *Grid*, y se verificó el correcto funcionamiento de la implementación de GT4 corriendo los *Grid Services*, incluidos como parte del *Toolkit*. Estos *Grid Services* hacen, por defecto, uso de la seguridad provista por la implementación de GSI (*Grid Security Infrastructure*) de GT4.

Posteriormente, Vinueza, Jojoa & Bolaños (2010), desarrollaron la estructura topológica del *clúster* Tinku (Figura 2), utilizando una versión de *Rocks Chimichanga 5.2*, una distribución de software libre para alto rendimiento, gracias a sus características satisfacía las necesidades de este proyecto; el servidor *frontend*, es el único equipo que tiene monitor, teclado y mouse, es el primero en el cual se instaló el software *Rocks*. Este equipo es el encargado de enviar tareas a los demás nodos, almacena los paquetes de instalación para la posterior adición de nodos, configura los nodos para sincronización y crea el sistema de archivos en red.

Para el procesamiento de imágenes digitales, se implementó un algoritmo que sirve de interfaz entre la malla y el *clúster*, de manera que a través de uno de los servicios de la malla se envía la información de una imagen digital al *clúster*, el cual realiza el procesa-

miento utilizando *POV-Ray*, la cual consiste en una aplicación que crea imágenes tridimensionales utilizando la técnica de trazado de rayos, y *Zebra-Core*⁵.

Para evidenciar el desempeño y rendimiento, se realizaron varias pruebas, las cuales se ejecutaron inicialmente sobre el clúster completo y gradualmente se fueron disminuyendo el número de nodos, hasta que un único nodo sea el que realice la misma prueba. Las pruebas realizadas en un solo nodo, se llevaron a cabo en el *frontend*, estas se ejecutaron de forma secuencial. Este proceso fue realizado con el objetivo de establecer el rendimiento del clúster frente a situaciones en las que se logre demostrar su potencia de procesamiento en paralelo, minimizando así el tiempo en la ejecución de las mismas.

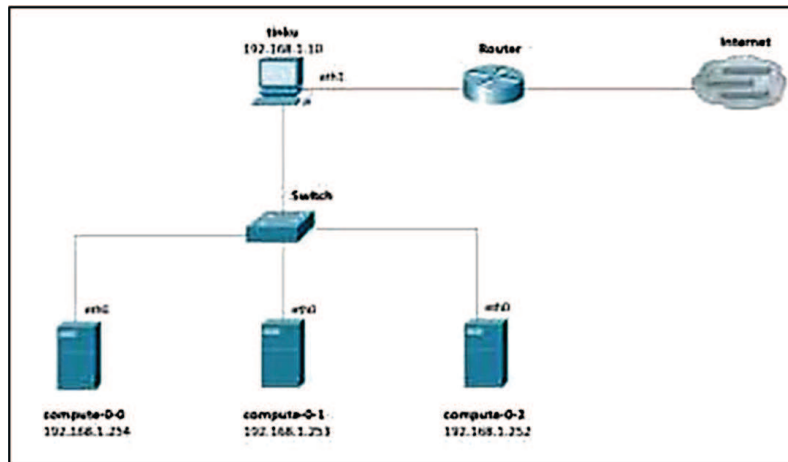


Figura 2. Prototipo de clúster (Vinuela, Jojoa & Bolaños, 2010)

Una de las pruebas consistió en generar seis imágenes de alta calidad y gran resolución a partir de dos archivos .pov, utilizando herramientas como *POV-Ray* y *Zebra-Core* previamente configuradas para realizar esta actividad. El objetivo de esta prueba es evidenciar el rendimiento del clúster en cuanto al tiempo de resolución a partir de dos archivos de escena, procedentes de una carpeta de escenas predefinidas de *POV-Ray*, que contienen archivos de extensión .pov, el cual a su vez contiene las características en formato texto de la escena que se desea *renderizar*.

⁵ Herramienta creada en la Universidad de Antioquia por Carolina Escobar, Diego Bedoya y Jorge Zuluaga, se encarga de la división y distribución de imágenes tridimensionales generadas mediante técnicas de trazado de rayos con *POV-Ray* sobre plataformas tipo clúster.

Más tarde, este archivo es procesado con tres distintas resoluciones (Figura 3), obteniendo un total de seis imágenes; básicamente este proceso consiste en ampliar la resolución de la imagen a procesar, con el objetivo de aumentar la dificultad en el proceso de *renderización* en el clúster, creando un mayor esfuerzo a la hora de trabajar, con lo que se podrá analizar mejor su comportamiento, además que al aumentar la resolución implica que el archivo generado incluye más detalles de mejor calidad en la imagen resultante. El archivo con la imagen de mejor calidad es enviada a la malla computacional que ese encarga de enviarla al usuario.

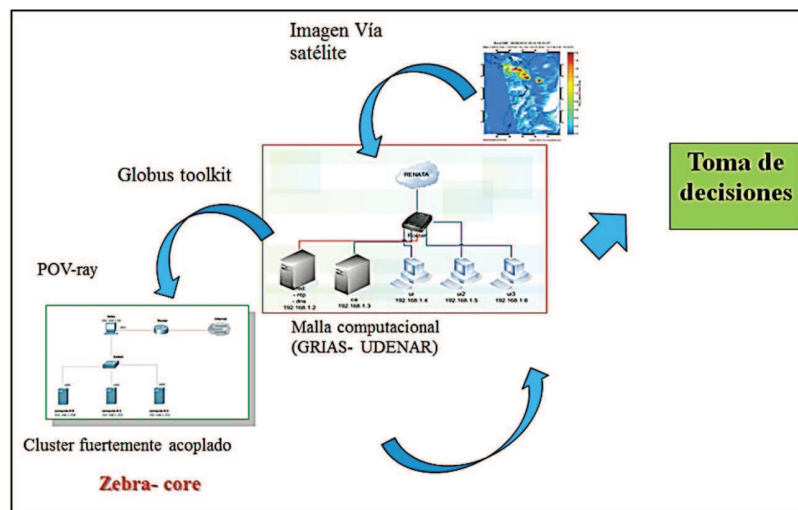


Figura 3. Procesamiento de imagen

3.2 Discusión de resultados

En las pruebas realizadas se tomó la comparación de tiempos de procesos de generación de imágenes distribuidas con la herramienta *POV-Ray secuencial*, usando como base para el tiempo secuencial, el tiempo de ejecución empleado por un solo procesador. Se puede afirmar que existe una diferencia importante en el tiempo de procesamiento utilizando un procesador, en comparación con el número de procesadores que usa el *clúster*, hay una disminución notable y se comprueba la veracidad de la teoría del alto rendimiento en la *renderización* de imágenes.

Además, se realizaron pruebas para comprobar la eficiencia del clúster con algoritmos de minería de datos, mediante técnicas de validación cruzada con tres algoritmos de clasificación distintos que permiten

particionar el conjunto de datos en subconjuntos y de esta forma pueden trabajar en paralelo. Las pruebas se ejecutaron comparando los tiempos de ejecución en un solo equipo y en el clúster, con una base de datos de cinco mil *tuplas* en formato ARFF. En las pruebas se aumentaba paulatinamente el número de procesadores, hasta llegar a utilizar la totalidad de los procesadores que conforman el sistema, luego se aumentó el número de *folds* o particiones de diez en diez hasta llegar a 30 *folds*. Al igual que ocurrió con el procesamiento de imágenes, se evidenció una disminución notable en el tiempo de procesamiento de los datos al utilizar el sistema clúster.

Los resultados obtenidos con las diferentes pruebas realizadas, permitieron evidenciar la eficiencia de la computación de alto rendimiento en el procesamiento de diferentes tipos de datos, y en especial en la *renderización* de imágenes digitales, por lo tanto es innegable que la implementación de esta tecnología sería de gran ayuda para el procesamiento de imágenes digitales del Volcán Galeras y la posterior toma de decisiones por parte de usuarios especializados.

4. Conclusiones

La computación *Grid* y la propuesta de diferentes estándares para la representación de datos, ofrece la posibilidad de solucionar los problemas de interoperabilidad entre diferentes sistemas, ya que los procesos actuales requieren mayor interactividad y permiten un mejor uso de herramientas de visualización, simulación y realidad virtual entre otras.

La computación en paralelo como paradigma de procesamiento ofrece ventajas significativas en el desarrollo de proyectos que generan o utilizan una gran cantidad y diversidad de datos que requieren una alta capacidad de cómputo.

La integración e interacción de los diferentes elementos que componen un clúster y una malla computacional, proveen una alternativa viable para resolver problemas de gran envergadura que requieran de ayuda computacional para su desarrollo, que hace algún tiempo solo supercomputadoras podían realizarlo.

Los beneficios que trae la implementación de un prototipo de malla computacional y de un clúster de alto rendimiento en la Universidad de Nariño, tanto por economía y desempeño demuestra claramente que no es necesario la adquisición de supercomputadores para resolver problemas que requieren de gran capacidad de procesamiento de datos.

Referencias bibliográficas

- ASONAVIC, K.; BODIK, R.; CATANZARO, B.; GEBIS, J.; HUSBANDS, P.; KEUTZER, K.; PATTERSON, D.; PLISHKER, W.; SHALF, J.; WILLIAMS, S. & YELICK, K. (2006). The Landscape of Parallel Computing Research: A View from Berkeley [online]. Technical Report No. UCB/EECS-2006-183. Berkeley (CA, USA): Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkeley. 54 p. <<http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2006/EECS-2006-183.pdf>> [consult: 10/02/2011]
- BERSTIS, V. (2002). Fundamentals of Grid Computing [online]. Redbooks Papers. Austin (TX, USA): IBM Corp. 28 p. <<http://www.redbooks.ibm.com/redpapers/pdfs/redp3613.pdf>> [consult: 20/03/2014].
- CASTILLO, J. (2006). Implementación de un clúster OpenMosix para cómputo científico en el Instituto de Ingeniería. Trabajo de grado (Ingeniero en Computación). México (México): Universidad Nacional Autónoma de México. 82 p.
- CASTRO, D.; HURTADO, F.; JOJOA, A. LÓPEZ, A. & BOLAÑOS M. (2010) AG-Argos: Nodo Access Grid soportado en una Grid de servicios para apoyar procesos educativos en el Departamento de Sistemas de la Universidad de Nariño. Trabajo de grado (Ingeniero de Sistemas). San Juan de Pasto (Colombia): Universidad de Nariño. 76 p.
- DÍAZ, G.; HAMAR, V.; HOEGER, H.; MENDOZA, V.; RAMÍREZ, Y. & ROJAS, F. (2005). Herramientas GRID para la integración y administración de servicios de redes en Latinoamérica [en línea]. Mérida (Venezuela): Corporación Parque Tecnológico de Mérida, Universidad de Los Andes - FRIDA <<http://programafrida.net/theme/default/files/5.pdf>> [consulta: 13/03/2014]
- FOSTER, I. & KESSELMAN, C. (1998). The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure. Berkeley (CA, USA): Morgan Kaufmann. 701 p. ISBN: 1-55860-475-8
- HAMAR, V.; HOEGER, H. MENDOZA, V. & RAMÍREZ, Y. (2004). Grids en la ULA [en línea]. Mérida (Venezuela): Universidad de los Andes. <<http://www.cecalc.ula.ve/bioinfo2004/archivos/hoeger/Grid-ULA-Vzla.pdf>> [consulta: 17/03/2014]
- IDEASMULTIPLES (2012). Cluster para hosting de alto rendimiento [en línea]. Lima (Perú): Ideas Múltiples. <http://www.ideasmultiples.com/imvps/cluster_de_servidores.php> [consulta: 18/03/2014]
- JACOB, B.; BROWN, M.; FUKUI, K. & TRIVEDI, N. (2005). Introduction to Grid Computing. Redbooks. IBM: International Technical Support Organization. International Business Machines Corporation. 268 p.
- JANAKIRAM, D. (2005). Grid computing: A research monograph. Noida (UP, India): Tata McGraw-Hill Education. 307 p. ISBN 0-07-060096-1.
- LANDA LÓPEZ, C. (2011). Computación Grid vertiente de la tecnología verde para el desarrollo sustentable [en línea]. Monografía de grado (Licenciado en Sistemas Computacionales Administrativos), Zalapa-Enríquez (Veracruz, México): Universidad Veracruzana, Facultad de Contaduría y Administración. 69 p. <<http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/30312/1/Carina%20Landa.pdf>> [consulta: 17/03/2014]
- MOLINA, J.M. (2003). Grid Computing [en línea]. Madrid (España): Centro de Difusión de Tecnologías, Universidad Politécnica de Madrid. <http://www.ceditec.etsit.upm.es/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=22&Itemid=78&lang=es> [consulta: 20/03/2014]
- OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO Y SISMOLÓGICO DE PASTO, OVSP (2014). Historia de OVS [online]. Pasto (Colombia): OVSP. <http://www.sgc.gov.co/Pasto/Sobre-Nosotros/rese-na_OVSP.aspx> [consult: 05/03/2014]
- SCHWIEGELSHOHN, U. & YAHYAPOUR, R. (2004). Chapter 4: Attributes for Communication between Scheduling Instances. In: NABRZYSKI, J.; SCHOPF, J.M. & WĘGLARZ, J. (2004). Grid Resource Management: State of the Art and Future Trends. International Series in Operations Research & Management Science, Vol. 64. New York (NY, USA): Springer US. p. 41-52. ISBN: 978-1-4613-5112-2.
- VINUEZA, E.; MORA, J. & BOLAÑOS, M. (2010). TINKU – Implementación en la Universidad de Nariño, de un clúster heterogéneo de alto rendimiento, fuertemente acoplado. Trabajo de grado (Ingeniero de Sistemas). San Juan de Pasto (Colombia): Universidad de Nariño. 133 p.