

## WRF, análisis de rendimiento en clústeres HPC

Brayme L. Guamán Rivera<sup>1</sup>, Lizandro D. Solano Quinde<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería en Sistemas, Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril & Agustín Cueva, Cuenca, Ecuador.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril y Agustín Cueva, Cuenca, Ecuador.

Autor para correspondencia: lizandro.solano@ucuenca.edu.ec

Fecha de recepción: 25 de agosto de 2017 - Fecha de aceptación: 29 de septiembre de 2017

### RESUMEN

El modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*) es un sistema de predicción numérica del clima de mesoescala, diseñado tanto para las operaciones de predicción como para la investigación atmosférica, con énfasis en la escalabilidad, la eficiencia y la portabilidad, por lo que ha sido desplegado satisfactoriamente en clústeres HPC. Por lo tanto, la comprensión de la dependencia del WRF con los distintos elementos de hardware es crucial para realizar predicciones eficientes. Para esto analizamos la escalabilidad del WRF en base a tres parámetros; implementaciones MPI, velocidades de comunicación inter-nodo y procesos MPI por procesador. Se diseñaron varios escenarios para evaluar y entender la relación entre la escalabilidad y estos tres parámetros. Los resultados obtenidos muestran una dependencia de la escalabilidad del WRF con las comunicaciones inter-nodo, debido a que, al usar redes de alta velocidad, como Infiniband, se obtuvo una escalabilidad superior a los 2 nodos computacionales, que fue la escalabilidad máxima obtenida al usar redes con velocidades más bajas como Ethernet.

Palabras clave: WRF, HPC, rendimiento, Infiniband, escalabilidad paralela, CC.

### ABSTRACT

The WRF (*Weather Research and Forecasting*) model is a numerical weather prediction system, designed for both forecasting and atmospheric research, with an emphasis on scalability, efficiency and portability. It has been deployed successfully in HPC clusters. Therefore, the understanding of the dependency of the WRF with the different hardware elements is crucial to make efficient predictions. Because of this we analyzed the scalability of the WRF based on three parameters, respectively MPI implementations, inter-node communication speeds, and MPI processes per processor, enabling benchmarking that allows to understand the relationship between scalability and these three parameters. The results show a dependence of the scalability of the WRF with the inter-node communications; consequently, when using high-speed networks, such as Infiniband, a scalability higher than the 2 computational nodes was obtained, which was the maximum scalability achieved when using Networks with lower speeds like Ethernet.

Keywords: WRF, HPC, performance, Infiniband, parallel scalability, CC.

## 1. INTRODUCCIÓN

La predicción climática es de gran relevancia, ya que el clima tiene una gran influencia en campos que son pilares de la sociedad actual. Los autores (Michalakes, Loft, & Bourgeois, 2001; Shainer *et al.*, 2009) sostienen que la predicción climática fue una de las primeras aplicaciones en requerir un alto coste computacional y para esto el uso de la predicción numérica del clima (NWP, por sus siglas en

inglés) es una de las principales herramientas que los meteorólogos usan actualmente como ayuda para la predicción del clima. Los modelos NWP cada vez aumentan su complejidad para mejorar su precisión. Los dominios y las escalas de tiempo también crecen, lo que demanda una gran capacidad de cómputo. Actualmente la mayoría de los pronósticos requieren de millones de operaciones por segundo, por esto y para mejorar las predicciones, el progreso en las tecnologías de computación ha sido fundamental. Por estas razones es crucial tener una comprensión de los sistemas HPC (*High Performance Computer*), y así alcanzar porcentajes razonables de máximo rendimiento teórico.

El WRF es uno de los modelos más importantes y utilizados por gran cantidad de investigadores involucrados en el área de predicción climatológica. Además, este modelo ayuda a obtener información sobre el rendimiento de un clúster, por sus implementaciones en modelos paralelos. Por esto, es importante realizar un análisis de rendimiento de este modelo y conocer cuáles son sus requerimientos para tener un desempeño óptimo.

Trabajos relacionados con esta temática son realizados por el HPC Advisory Council (2017), quienes realizan pruebas de rendimiento, utilizando tecnologías diferentes de procesadores y comunicaciones inter-nodo, para mostrar las mejores prácticas en la ejecución del WRF. Gualán & Solano-Quinde (2014) realizaron pruebas de rendimiento utilizando una red *Ethernet*, concluyendo que existe sensibilidad a la velocidad de comunicación inter-nodo, dichos resultados concuerdan con los encontrados por Shainer *et al.* (2009). La relevancia del presente trabajo es el análisis de rendimiento de dos clústeres HPC en la ciudad de Cuenca, que actualmente sirven para la investigación de docentes, estudiantes y profesionales, que trabajan en líneas de investigación que necesiten un alto costo computacional; además el análisis tiene un mayor grado de profundidad, debido a la separación de tiempos de aplicación y comunicación, y las revisiones de manejo de la pila de software para el uso de Infiniband, por las diferentes implementaciones MPI (*Message Passing Interface*). Por otro lado, al realizar el análisis sobre el modelo WRF potencializa los resultados, puesto que actualmente el pronóstico climático es una de las áreas más relevantes de investigación en el Austro Ecuatoriano.

El presente trabajo se estructura de la siguiente manera, la Sección 2, 3 y 4 describen brevemente el modelo WRF, componentes de los clústeres y el conjunto de datos, respectivamente. En la Sección 5 se proponen diferentes escenarios, con el fin de comparar implementaciones MPI, velocidades de comunicación y cantidad de procesos MPI por procesador; además se describe el método, y las versiones del software usadas.

## 2. MODELO WEATHER RESEARCH AND FORECASTING (WRF)

El modelo WRF es un sistema de predicción numérica del clima y de simulación atmosférica, diseñado tanto para aplicaciones de investigación como para predicción operativa. El modelo fue desarrollado por varias instituciones entre ellas: la *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), *Mesoscale and Microscale Meteorology* (MMM), la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). El software WRF tiene un alto nivel de organización, características adicionales son: manejo paralelo y de memoria compartida, separación el código científico del código de paralelización, soporte de la ejecución en una amplia gama de plataformas de computación distribuida, vectorial, escalar y aceleradores como GPUs; lo que permite el uso eficiente de la computación paralela masiva y así poder aprovechar los avanzados sistemas HPC (Skamarock *et al.*, 2008).

## 3. DESCRIPCIÓN DEL CLÚSTER

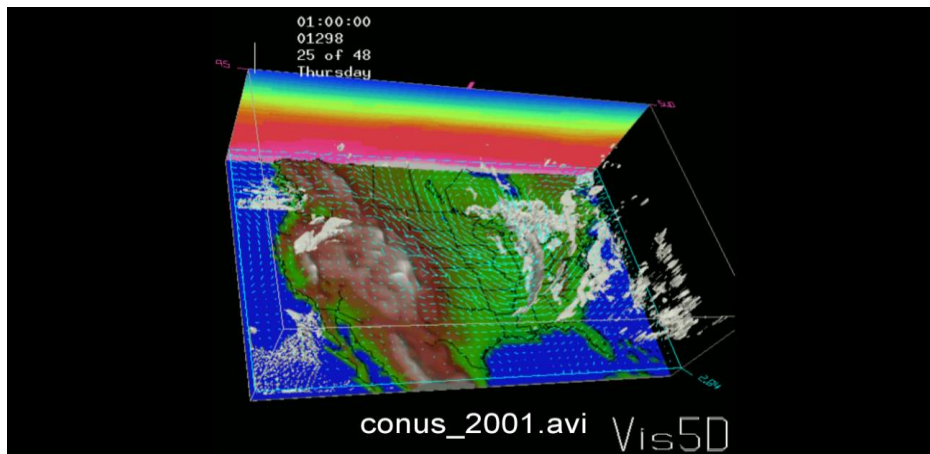
Para la ejecución de las diferentes simulaciones, se dispone de dos clústeres HPC, el clúster de la Universidad de Cuenca, y el de CEDIA. La Tabla 1 muestra la descripción de cada clúster.

**Tabla 1.** Descripción de clústeres.

Nombre	Universidad de Cuenca	
	UCUENCA	CEDIA
Nodos disponibles	8	8
Procesadores por nodo	2 Intel Core i7 de 8 núcleos	2 Intel Core i7 de 6 u 8, núcleos.
RAM	94 GB	94 GB
RED	Infiniband 4x FDR 56 Gb/sec	Infiniband 4x QDR 40 Gb/sec Gigabit Ethernet 1 Gb/sec

#### 4. CONUS 12KM

Continental United States (CONUS) es un conjunto de datos proporcionado por los desarrolladores del WRF y considerado una referencia para realizar análisis de rendimiento. Tiene un dominio con una resolución espacial de 12 km, y un paso de tiempo de 72 segundos en un intervalo de 3 horas. El costo computacional para este dominio es de aproximadamente 28.5 mil millones de operaciones de punto flotante por cada 72 segundos (Shainer *et al.*, 2009).



**Figura 1.** Frame de la animación CONUS 12KM.

#### 5. EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO Y PROFILING

El programa de integración numérica *wrf.exe*, es considerado el de mayor exigencia computacional dentro de los componentes del modelo WRF y puede ser ejecutado en paralelo en entornos de memoria distribuida, debido a que incorpora funciones MPI, por lo que resulta idóneo para realizar los análisis y evaluaciones de rendimiento.

El comando “*time*” de Linux fue usado para la medición del tiempo de cada ejecución (Wall-clock time) y está representado en el formato *h:mm:ss*. *Wall-clock time* es una medida del tiempo real que transcurre de principio a fin de una tarea, incluyendo tiempos extras como la espera de recursos disponibles o los retardos al disco. *Wall-clock time* es la suma de tiempo de la CPU, tiempo de llamadas al sistema, y el retardo de canal de comunicación en caso de que los datos se distribuyen en varias computadoras. Debido a estas influencias para la obtención de *wall-clock time*, cada simulación se ejecutó 12 veces y se realizó un promedio, para así tener un valor representativo.

Con propósitos de evaluación de rendimiento, en este trabajo se ejecutó el programa *wrf.exe* de la versión 3.8 del WRF, utilizando el conjunto de datos CONUS 12Km descrito en la sección 4. Se realizaron ejecuciones en un entorno de memoria distribuida, para analizar los siguientes puntos: (i) comparación de rendimiento usando diferentes tecnologías y velocidades de interconexión, *Infiniband*

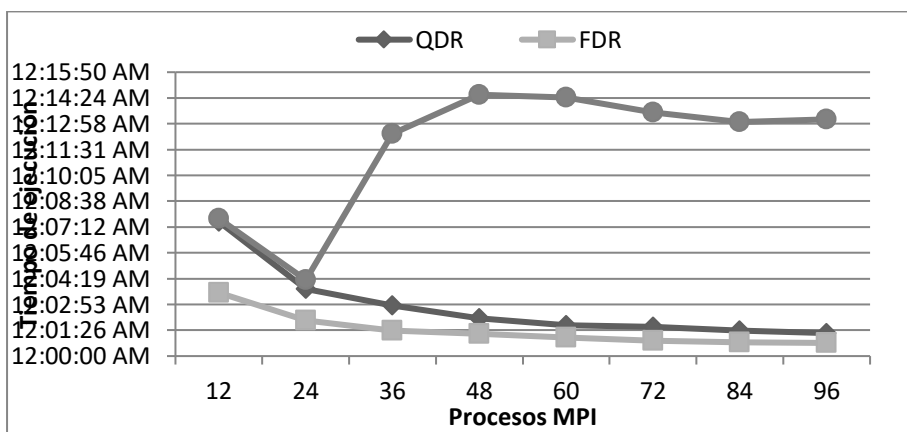
QDR, FDR y *Ethernet*; (ii) medición del rendimiento del WRF usando diferentes implementaciones de MPI (Intel MPI y Open MPI) sobre *Infiniband*; (iii) medición de rendimiento usando el máximo *ppn*; y (iv) análisis de utilización de red por el WRF.

**5.1. Escenario 1: Evaluación de rendimiento**

El escenario planteado evalúa el rendimiento y la escalabilidad del WRF en un entorno de memoria distribuida, utilizando 2 estándares de redes distintas, *Infiniband* y *Ethernet*; y dos velocidades en *Infiniband* QDR y FDR. El método consiste en ejecutar una cantidad determinada de veces la simulación, con cada estándar de red, aumentando secuencialmente la cantidad de nodos, y medir la cantidad de tiempo que se tarda en cada ejecución.

Para las ejecuciones se utilizaron hasta 8 nodos y 12 procesos MPI por nodo (*ppn*). Esto, porque el procesador con menor número de núcleos es 6 y cada nodo tiene 2 procesadores, dando un total de 12 *cores* por nodo. Otro aspecto a tener en cuenta es el proceso de *oversubscription*, éste se da cuando el número de procesos MPI es mayor al número de núcleos físicos y menor al número de núcleos lógicos (The Open MPI Project, 2016a). El *oversubscription* produce un deterioro en el rendimiento del WRF en diferentes pruebas realizadas en un único nodo (Gualán & Solano-Quinde, 2014), para no tener una sobreutilización de recursos, se ha utilizado la misma cantidad de núcleos físicos que procesos MPI. Además, para compilar el WRF se usó ICC e IFORT (compiladores Intel) y la implementación MPI usada fue Intel MPI.

La Figura 2 muestra la escalabilidad del WRF a través de los nodos, utilizando *Infiniband* QDR, FDR y *Ethernet*, observando que en el caso de *Ethernet* no se puede escalar más allá de 24 procesos MPI (2 nodos), concordando con (Gualán & Solano-Quinde, 2014). Si bien muestra una escalabilidad similar a *Infiniband*, a partir de la inclusión de más procesos MPI, el rendimiento decae hasta en un 243% utilizando 48 procesos MPI con relación a 24 procesos, que es el mayor rendimiento obtenido.



**Figura 2.** Tiempos de ejecución, sobre *Infiniband* QDR, FDR y *Ethernet*.

En contraste con *Ethernet*, la Figura 2 ilustra que *Infiniband* tiende a escalar más de 2 nodos, como una función exponencial decreciente con respecto al tiempo, así cada vez que duplicamos la cantidad de procesos MPI, el tiempo de ejecución tiende a disminuirse a la mitad. La aceleración máxima obtenida con *Infiniband*, QDR y FDR es de 3.31 y 5.8 veces más que la de *Ethernet* respectivamente.

Por otro lado, no se puede atribuir todo el aumento de rendimiento a la red FDR, debido al hecho que son 2 clústeres con diferentes procesadores. Sin embargo, los resultados obtenidos entre QDR y *Ethernet*, muestran que existe una dependencia entre la escalabilidad del WRF y la tecnología de conexión inter-nodo. Las ejecuciones posteriores, obtienen una mayor cantidad de información para analizar la influencia de las comunicaciones y demás elementos del clúster, para el comportamiento de rendimiento obtenido en este escenario.

5.2. Escenario 2: Evaluación de rendimiento utilizando Open MPI e Intel MPI sobre Infiniband

Este escenario evalúa el rendimiento y escalabilidad del WRF sobre una misma red *Infiniband*, usando 2 implementaciones diferentes de MPI (Open MPI e Intel MPI). La importancia de este escenario está en que cada una de las implementaciones usa de manera diferente la pila de software *Infiniband*. *Infiniband* no proporciona un API, sino define semánticamente las funciones y acciones que se llevarán a cabo, como ejemplo el envío y recepción de datos, también conocidos como “*Infiniband Verbs*”; como resultado de esto se obtuvieron múltiples versiones de la pila del software de *Infiniband*, para estandarizar esto se formó la OpenFabrics Alliance (OFA), ofreciendo una pila para diferentes distribuciones Linux y Windows (Atchley *et al.*, 2011). La Figura 3 muestra la pila OFA, compuesta por varias capas de abstracción entre ellas la User APIs, ésta permite usar determinados servicios *Infiniband* como ejemplo RDMA (*Remote Direct Memory Access*), así software como MPI puede acceder directamente al hardware *Infiniband* evitando el kernel y el sistema operativo, mediante la API “*Infiniband Verbs*” a nivel de usuario, ubicada en esta capa. Existe una diferencia entre las dos implementaciones MPI, puesto que Intel MPI hace uso de la API “*Infiniband Verbs*” mediante la API uDAPL (Intel®, 2017), mientras que Open MPI puede usarla directamente (The Open MPI Project, 2016b).

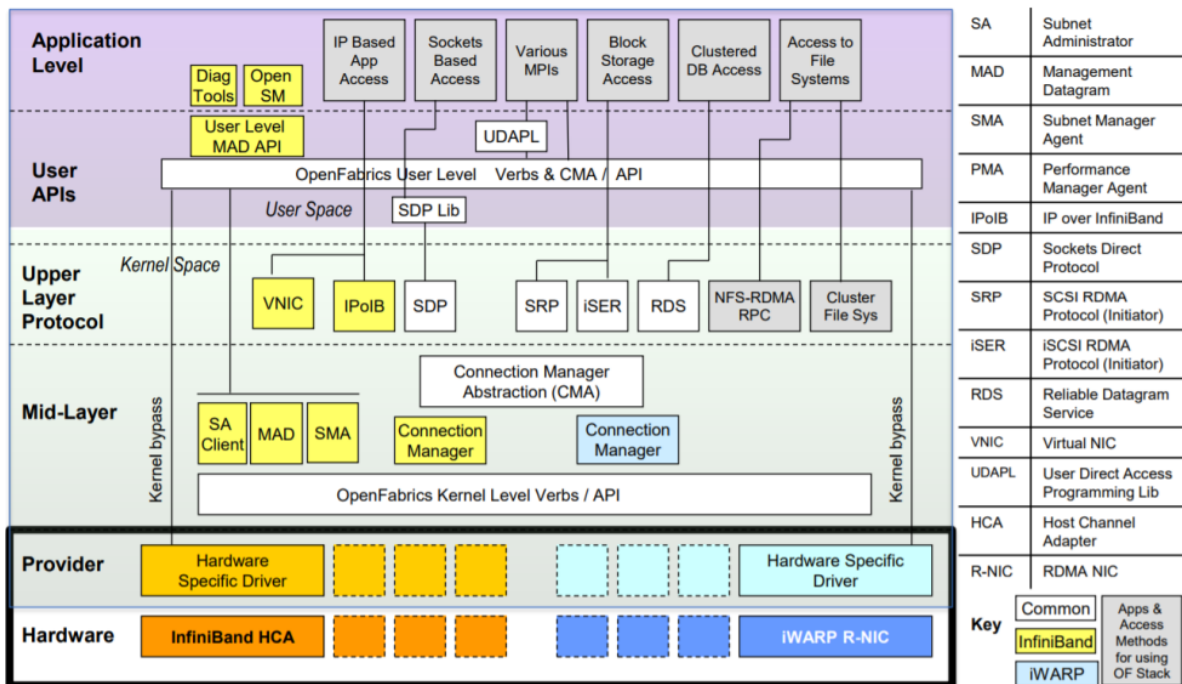


Figura 3. Pila de software proporcionada por OFA (OpenFabrics Alliance, 2015).

Para las ejecuciones en este escenario se usó OFED (Open Fabrics Enterprise Edition) 2.0 *software stack*, en cuanto a las compilaciones para tener una igualdad de condiciones tanto Open MPI, Intel MPI y WRF fueron compilados con ICC e IFORT.

La Figura 4 muestra un aumento de rendimiento de Open MPI, del 20.4% y 16% para 12 y 24 procesos, con respecto a Intel MPI, a partir de aquí el rendimiento tiende a ser similar entre las dos librerías. Por lo tanto, el uso de cualquiera de estas dos librerías no tiene influencia significativa en la escalabilidad del rendimiento del WRF.

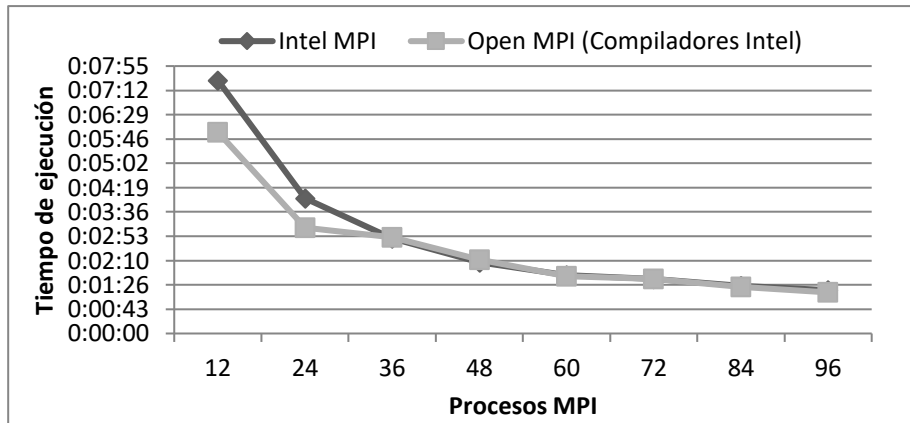


Figura 4. Tiempos de ejecución, Intel MPI y Open MPI.

### 5.3. Escenario 3: Evaluación del rendimiento, aumento de procesos por nodo

El presente escenario se centra en la evaluación del rendimiento del WRF, usando una mayor cantidad de procesos en los nodos que poseen procesadores con mayor cantidad de núcleos. El objetivo de esta evaluación es obtener el mayor rendimiento posible usando toda la capacidad de cómputo disponible.

Por motivos de igualdad entre ambos clústeres y para no producir *oversubscription* en los procesadores que poseen solo 6 núcleos, en los escenarios anteriores solo se usó 12 *ppn*, en este caso cada ejecución utiliza la máxima capacidad disponible del clúster UCUENCA (8 nodos y 16 *ppn*).

La Figura 5 muestra el tiempo de ejecución en función del número de nodos. En la parte superior se especifica el tipo de red *Infiniband* y los *ppn* usados. La Figura 6 proporciona el porcentaje del aumento de rendimiento de FDR con 16 *ppn* con respecto a FDR con 12 *ppn*, teniendo una mejora promedio de un 19.75%. Así, el tiempo de ejecución para 8 nodos con 16 *ppn* sobre la red *Infiniband* FDR es 38 segundos, siendo este el mejor tiempo obtenido.

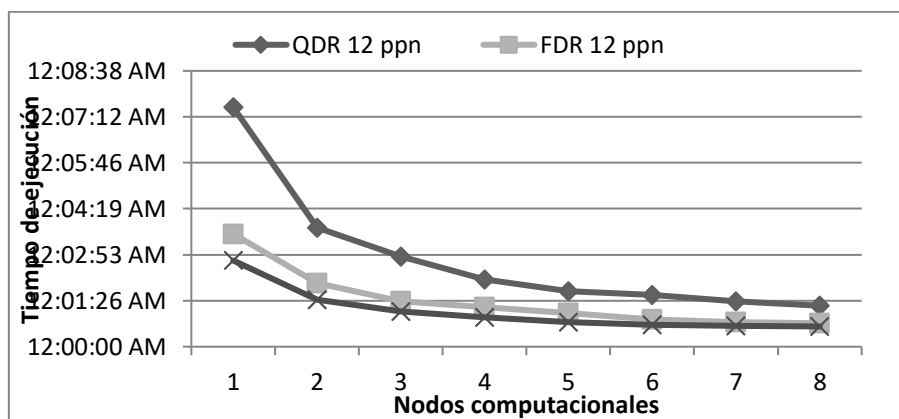


Figura 5. Tiempos de ejecución, *Infiniband* QDR FDR con 12 y 16 procesos por nodo.

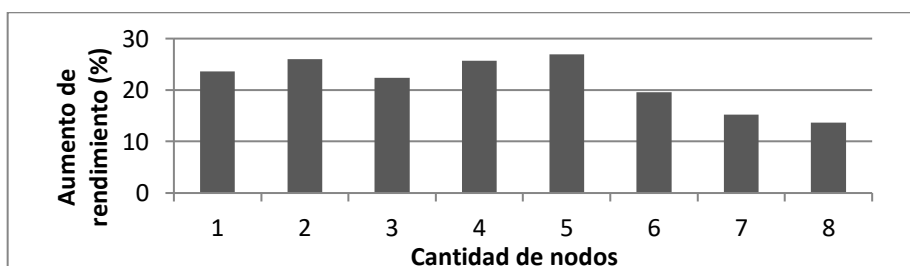


Figura 6. Aumento de rendimiento de *Infiniband* FDR con 16 *ppn* respecto a 12 *ppn*.

5.4. Escenario 4: Profiling de escalabilidad y uso de la red

Los escenarios anteriores se enfocaron en mostrar información sobre la escalabilidad del rendimiento a través del incremento de procesos MPI y nodos computacionales. Este escenario obtiene información sobre los procesos MPI, que sirve para analizar y entender el comportamiento del modelo WRF en un entorno de memoria distribuida.

En un entorno de memoria distribuida, el tiempo de ejecución total es dividido en 2 grupos: Tiempo de aplicación y Tiempo de rutinas MPI. El tiempo de aplicación es la duración de las tareas relacionadas a la aplicación como tal, en este caso *wrf.exe*; mientras que el tiempo de rutinas MPI es la duración de las rutinas MPI, que cumplen tareas del paso de mensajes entre procesos, por ejemplo: llamadas para transferir datos entre dos o más procesos, inicializar o finalizar comunicaciones, etc. Para realizar el análisis propuesto, es necesario utilizar la función *trace* de Intel MPI, que realiza una recolección de datos de una ejecución, posteriormente la herramienta ITAC (Intel ® Trace Analyzer and Collector, n.d.) se usa para la visualización de los datos recolectados.

Las Figuras 7 y 8 muestran los resultados del tiempo de aplicación y rutinas MPI respectivamente. El tiempo de aplicación tanto de *Ethernet* como QDR es el mismo debido a que ambas están dentro del mismo clúster, en este caso CEDIA. El tiempo de aplicación de manera general muestra un decrecimiento exponencial, que es el esperado al realizar procesos de paralelización. Por otro lado, con estos resultados se aclara que el rendimiento obtenido en el escenario 1 de la red FDR no solo es debido a la velocidad de la red. Los resultados muestran un aumento promedio de rendimiento en el tiempo de aplicación de un 48%, y esta mejora se atribuye a los demás elementos de un clúster, mas no a las comunicaciones, así el promedio de aumento en el tiempo MPI de la red FDR, con respecto a QDR y Ethernet, es de un 55% y un 87% respectivamente.

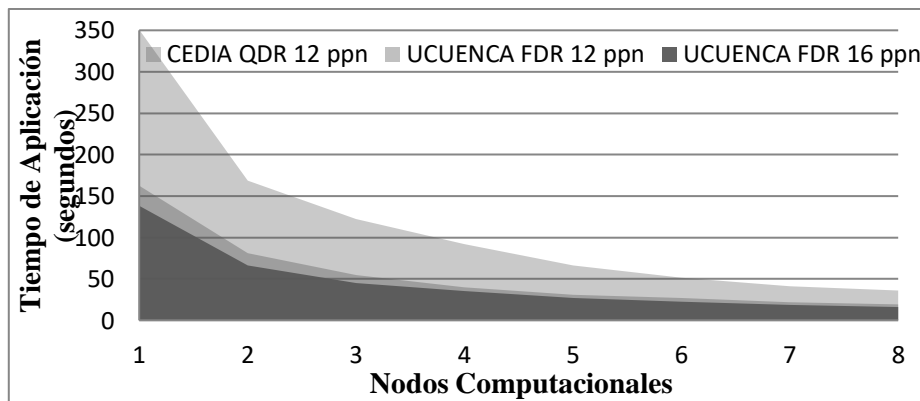


Figura 7. Tiempo de aplicación.

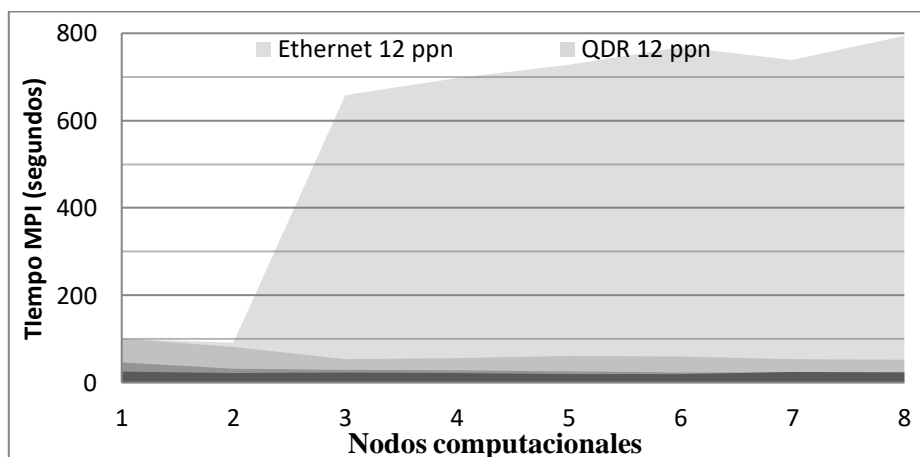


Figura 8. Tiempos de rutinas MPI.

Por otro lado, la disminución de los Tiempos MPI es de forma proporcional a la velocidad de la red, teniendo una escalabilidad a través de los nodos para las redes *Infiniband*, por su alta tasa de transmisión de datos, obteniendo un comportamiento deseable, debido al *overhead* bastante bajo impuesto por las comunicaciones. Mientras que para la red Ethernet, a partir de la inclusión de tres nodos (36 procesos MPI en este caso), el tiempo de rutinas MPI crece de una manera exagerada, por lo tanto, el comportamiento es totalmente indeseable debido a que el *overhead* impuesto es incluso más que el tiempo de aplicación.

Para reforzar el análisis, se incluye en la Figura 9 el porcentaje del tiempo de rutinas MPI del tiempo total, el porcentaje aumenta según incrementa los procesos MPI, hasta llegar ocupar un 60% del tiempo de ejecución, esto se debe a que el incremento de la cantidad de datos transmitidos entre procesos es proporcional a la cantidad de nodos de cómputo como se puede observar en la Figura 10, donde la inclusión de 3 nodos (36 procesos) es de 16.8 GB, siendo una carga bastante exigente para una red Ethernet. Por otro lado, la cantidad de datos transmitidos llegan hasta 139 GB, de donde 61.71 GB son inter-nodo, lo que ayuda a comprender las ganancias significativas mostradas en la Figura 2, al usar redes *Infiniband*, que soportan de manera eficiente toda la carga de comunicaciones.

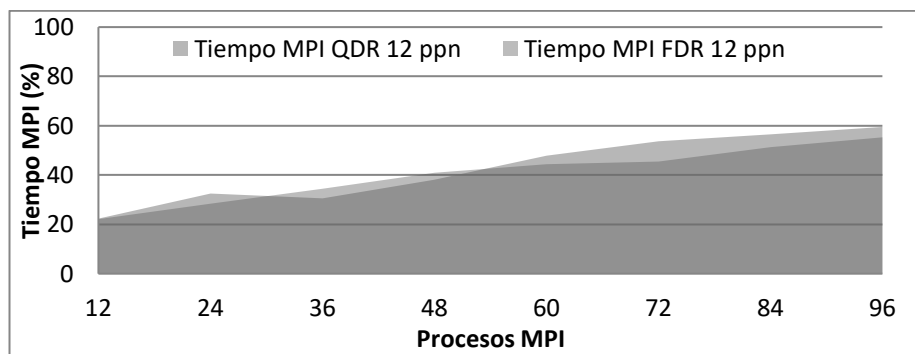


Figura 9. Porcentaje del tiempo MPI del tiempo total.

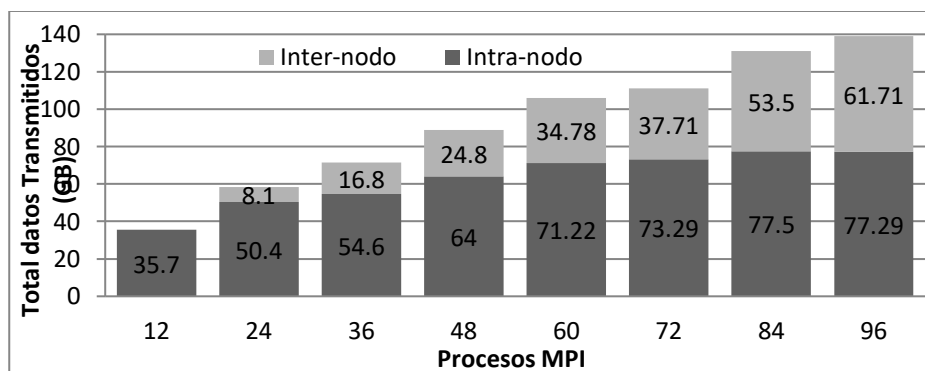
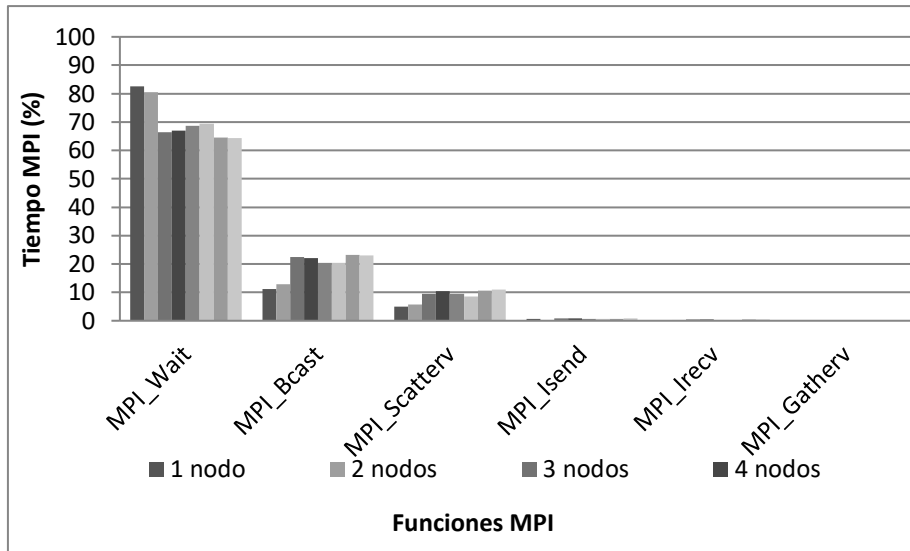


Figura 10. Total de datos transmitidos, con 12 procesos por nodo.

Otro aspecto que ayuda a comprender el aumento de rendimiento al usar redes *Infiniband*, son las funciones MPI que mayor tiempo consumen en cada ejecución, así podemos observar en la Figura 11 que la función “*MPI\_Wait*” es la de mayor consumo. Esta es una función bloqueante que sirve para la finalización del envío y recepción de datos entre procesos, lo que implica que puede existir un retardo en el caso de que este proceso dure demasiado debido al volumen de datos transmitidos, siendo este el caso de *Ethernet*, puesto que la cantidad de datos transmitidos entre procesos va desde los 1 y 3 GB, a partir de 2 nodos computacionales. Por el contrario, *Infiniband* tiene la capacidad de solventar de manera eficiente grandes volúmenes de datos.





**Figura 11.** Tiempo de rutinas MPI en porcentaje para las funciones MPI más utilizadas, de 1 hasta 8 nodos.

Los resultados de este escenario afirman que la escalabilidad del WRF, usando una red *Ethernet*, no puede escalar más allá de 2 nodos, debido a los grandes requerimientos del WRF a nivel de comunicación, causando un cuello de botella. Este no es el caso para las redes *Infiniband*, que logran tener una escalabilidad más allá de 2 nodos, por sus altas tasas de transmisión de datos. Por lo tanto, los resultados también muestran que al usar redes *Infiniband* con una mayor tasa de transmisión de datos, como es FDR respecto a QDR, se logra un mayor rendimiento.

## 6. CONCLUSIONES

El presente trabajo evaluó el rendimiento y la escalabilidad del WRF en clústeres de alto rendimiento, para lo cual se seleccionó el programa *wrf.exe*, por ser el de mayor exigencia computacional. Se diseñaron 4 escenarios, utilizando dos clústeres HPC disponibles (UCUENCA y CEDIA). El primer escenario midió el tiempo de ejecución de una simulación, con 12 *ppn* MPI y 8 nodos sobre redes *Infiniband* FDR, QDR y *Ethernet*; el segundo escenario con diferentes implementaciones MPI (Intel MPI y Open MPI). El tercer escenario buscó obtener el mejor tiempo posible y la comparación de rendimiento con el incremento de *ppn*, se usó 12 y 16 *ppn* MPI sobre la red *Infiniband* FDR y QDR. El cuarto escenario, con un enfoque diferente, consistió en separar el tiempo de ejecución en tiempo de rutinas MPI y aplicación, usando las redes *Infiniband* FDR, QDR y *Ethernet*, con 12 y 16 *ppn*, esto para analizar la relación entre las comunicaciones y la escalabilidad del WRF.

Los diferentes escenarios planteados mostraron que existe un crecimiento proporcional entre la cantidad de datos transmitidos entre procesos y los procesos MPI, por eso en *Ethernet* se produce un cuello de botella en la comunicación a partir de la inclusión de 3 nodos de cómputo, mientras que para el caso *Infiniband* el cuello de botella desaparece, ya que puede soportar las grandes cargas de comunicación, escalando hasta los 8 nodos disponibles. Esta exigencia del WRF en las comunicaciones se mostró más explícita cuando los resultados mostraron que la función que más consume tiempo de las rutinas MPI es la función *MPI\_Wait*, que es una función que espera que un proceso de envío y recepción de datos sea completado. Por otro lado, si bien el rendimiento del WRF mejoró al aumentar de 12 a 16 *ppn*, el mayor rendimiento se obtuvo al usar una red *Infiniband* FDR, que mejoró un 55% con respecto a *Infiniband* QDR, y un 87% con respecto a *Ethernet*; haciendo hincapié en que no es útil aumentar la capacidad computacional de los procesadores, si no hay disponibilidad de una red que pueda soportar las exigencias de comunicación del WRF.

Los clústeres UCUECA y CEDIA pueden soportar aplicaciones de gran exigencia como el WRF, haciendo uso de las redes *Infiniband* disponibles. Estos resultados pueden ser considerados como una ampliación del trabajo realizado por Gualán & Solano-quinde, (2014), y sirven como referencia para las investigaciones que son realizadas en la Ciudad de Cuenca que requieran de un alto costo computacional.

## AGRADECIMIENTOS

La presente investigación no podría haber sido posible sin la ayuda de la RED CEDIA y la Universidad de Cuenca, por la prestación de los clústeres HPC para realizar las diferentes evaluaciones y análisis, por este apoyo fundamental expresamos un agradecimiento especial a estas dos instituciones.

## REFERENCIAS

- Atchley, S., Dillow, D., Shipman, G., Geoffray, P., Squyres, J. M., Bosilca, G., Minnich, R. (2011). *The Common Communication Interface (CCI)*. En: IEEE 19th Annual Symposium on High Performance Interconnects, pp. 51-60. <https://doi.org/10.1109/HOTI.2011.17>
- Gualán, R., Solano-Quinde, L. (2014). *Análisis de rendimiento y profiling del modelo WRF en un clúster HPC*. En: Actas del Congreso TIC.EC 2014, pp. 151-162. <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/730>.
- HPC Advisory Council. (2017). *HPC Advisory Council - Best Practices*. Retrieved September 22, 2017 from [http://hpcadvisorycouncil.com/best\\_practices.php](http://hpcadvisorycouncil.com/best_practices.php)
- Intel®. (n.d.). *Intel® Trace Analyzer and Collector | Intel® Software*. Retrieved June 16, 2017 from <https://software.intel.com/en-us/intel-trace-analyzer>
- Intel®. (2017). *Intel® MPI Library | Intel® Software*. Retrieved June 18, 2017 from <https://software.intel.com/en-us/intel-mpi-library>
- Michalakes, J., Loft, R., Bourgeois, A. (2001). *Performance-portability and the Weather Research and Forecast Model*. 11 p. Disponible en <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.8.3781&rep=rep1&type=pdf>
- OpenFabrics Alliance. (2015). *OpenFabrics Software*. Retrieved May 14, 2017 from <https://www.openfabrics.org/index.php/openfabrics-software.html>
- Shainer, G., Liu, T., Michalakes, J., Liberman, J., Layton, J., Celebioglu, O., ... Cownie, D. (2009). *Weather Research and Forecast (WRF) Model: Performance Analysis on Advanced Multi-core HPC Clusters*. The 10th LCI International Conference on High Performance Clustered Computing, 1-14.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhi, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., ... Powers, J. G. (2008). *A description of the advanced research WRF Version 3*. NCAR Tech, 113. <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>
- The Open MPI Project. (2016a). *FAQ: Running MPI jobs*. Recuperado el 10 de mayo de 2017 a partir de <https://www.open-mpi.org/faq/?category=running#oversubscribing>
- The Open MPI Project. (2016b). *FAQ: Tuning the run-time characteristics of MPI OpenFabrics communications (InfiniBand, RoCE and iWARP)*. Recuperado el 18 de junio de 2017 a partir de <https://www.open-mpi.org/faq/?category=openfabrics#ib-components>