

Infraestructura tecnológica para el modelamiento objetivo de pronóstico del tiempo y predicción del clima del Ideam para Colombia

Autores

Jeimmy Yanelly Melo Franco
José Franklyn Ruiz Murcia

*Grupo de modelamiento numérico
de tiempo y clima*

INFRAESTRUCTURA TECNOLÓGICA PARA EL MODELAMIENTO OBJETIVO DE PRONOSTICO DEL TIEMPO Y PREDICCIÓN DEL CLIMA

RESUMEN

El pronóstico del tiempo y la predicción climática son ejemplo de los mayores éxitos técnico-científicos de los últimos años. Hoy en día, los Servicios Meteorológicos (SM) producen de forma rutinaria pronósticos y/o predicciones que tienen un impacto positivo importante en muchos sectores socioeconómicos. Éste éxito ha estado intrínsecamente vinculado a las mejoras en la supercomputación, que han aumentado en varios órdenes de magnitud, lo que ha permitido sustentar aumentos en la complejidad y resolución de los modelos. Por lo tanto, se necesita utilizar los recursos no sólo para hacer el mejor uso dentro de la trayectoria tecnológica actual, sino también para innovar simultáneamente en nuevas tecnologías que permitan garantizar la generación de un valor agregado en el futuro. En este documento se plasma la infraestructura tecnológica para modelamiento numérico de tiempo y clima con la que cuenta actualmente el Ideam y porqué las condiciones actuales impiden mejorar el modelamiento numérico para ofrecer mejores pronósticos y predicciones al país. En la sección 2 se presenta una conceptualización básica de lo que es la computación de alto rendimiento, La sección 3 muestra la evolución histórica de la supercomputación al interior del Ideam. Las secciones 4 y 5 presentan la composición del clúster de tiempo y clima en la actualidad y finalmente, la sección 5 presenta los puntos de mejora que deberían realizarse al interior del Ideam para mejorar la predicción numérica durante los próximos años.

Como resultado y con el fin de mejorar los modelos de pronóstico del tiempo y predicción del clima, el Ideam al menos requiere tener una capacidad mínima de procesamiento de aproximadamente 620 cores, 950Gb de memoria RAM y duplicar su capacidad de almacenamiento a 24Tb. El resultado no considera necesidades adicionales asociadas al modelamiento dinámico del clima ni al modelamiento dinámico-estadístico del cambio climático; no obstante, este proceso al menos necesitaría adicionalmente 468 cores, 500Gb de memoria RAM y 25Tb de almacenamiento. Cuando no se use este recurso, jugaría un papel importante en la investigación sobre modelación meteorológica en Ideam.

Palabras claves: HPC, Modelos meteorológicos.

ABSTRACT

Weather forecasting and climate prediction are examples of the greatest technical-scientific successes of recent years. Today, Meteorological Services (MS) routinely produce forecasts and/or predictions that have a significant positive impact on many socioeconomic sectors. This success has been intrinsically linked to improvements in supercomputing, which have increased by several orders of magnitude, supporting increases in the complexity and resolution of the models. Therefore, it is necessary to use resources not only to make the best use within the current technological trajectory, but also to simultaneously innovate in new technologies that guarantee the generation of added value in the future. This document reflects the technological infrastructure for numerical modeling of weather and climate that Ideam currently has and why current conditions prevent improving numerical modeling to offer better forecasts and predictions to the country. Section 2 presents a basic conceptualization of what high-performance computing is. Section 3 shows the historical evolution of supercomputing within Ideam. Sections 4 and 5 present the composition of the weather and climate cluster at present and finally, section 5 presents the improvement points that should be made within the Ideam to improve numerical prediction during the coming years.

As a result, and in order to improve weather forecasting and climate prediction models, the Ideam at least requires having a minimum processing capacity of approximately 620 cores, 950Gb of RAM and doubling its storage capacity to 24Tb. The result does not consider additional needs associated with dynamic climate modeling or dynamic-statistical modeling of climate change; However, this process would at least additionally require 468 cores, 500Gb of RAM and 25Tb of storage. When this resource is not used, it would play an important role in meteorological modeling research at Ideam.

Keywords: HPC, Meteorological models.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN 4

2. SUPERCOMPUTACIÓN o HPC 6

2.1. TERMINOLOGÍA ASOCIADA A LA SUPERCOMPUTACIÓN 7

3. EVOLUCIÓN DE LA SUPERCOMPUTACIÓN EN EL IDEAM 9

3.1. CLÚSTER DE CORRIDA MODELOS DE PRONÓSTICO DEL TIEMPO 11

3.2. CLÚSTER DE CORRIDA MODELOS DE PREDICCIÓN CLIMÁTICA 12

4. CONCLUSIONES 15

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 17

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento, se ha convertido en un activo muy importante cuando se busca generar valor dentro de las organizaciones públicas y privadas; este permite desarrollar las capacidades en las personas y, por lo tanto, generar acciones en las empresas para crecer y cumplir con sus objetivos. Características como la usabilidad y el intercambio son claves para crear nuevo conocimiento. Al igual que la información, el conocimiento requiere de gestión y surge en las entidades por la necesidad de capturar y comunicar todo el trabajo intelectual acumulado evitando la pérdida de este.

El estudio de la atmósfera y los fenómenos meteorológicos han utilizado diversas herramientas a lo largo de los años que han permitido que los sensores de medición de las variables atmosféricas representen durante siglos, la base del estudio del tiempo, la climatología y la meteorología de una región, lo que ha hecho que a hoy sean parte fundamental para el conocimiento y la predicción de la atmósfera. Su avance tecnológico ha sido acelerado en las últimas décadas y ha traído como consecuencia, avances en el modelamiento numérico de tiempo y clima que representan una revolución técnico-científica silenciosa, pues es el resultado de una acumulación constante de conocimiento científico y avances tecnológicos durante muchos años que no han sido relacionados con avances físicos fundamentales. No obstante, su impacto puede ser considerado uno de los más grandes de cualquier área de las ciencias físicas; puesto que, si nos detenemos a analizarlo como un problema computacional, podemos encontrar que el modelamiento numérico puede ser comparable con la simulación del cerebro humano y la evolución del universo temprano.

Para resolver las expresiones que definen un modelo matemático se recurre al modelamiento numérico, entendiéndose por modelo numérico cuando se implementan dichas expresiones en un entorno de cálculo computacional que hoy en día implica el uso de un soporte informático. Durante las últimas décadas se ha producido un crecimiento vertiginoso de la capacidad de cálculo y almacenamiento de los ordenadores. Este hecho ha desencadenado un crecimiento acelerado de la cantidad de información que se almacena diariamente en distintas bases de datos (simulaciones científicas, observaciones, etc.), y ha hecho más fácil y rápido el acceso masivo a las mismas (por ejemplo, en tiempo real a través de Internet o de GRID). Mirando en retrospectiva y compartiendo el avance tecnológico requerido, es importante conocer que la primera predicción por computador se ejecutó en 1950 a través del supercomputador ENIAC, donde se realizó la primera integración numérica de un modelo meteorológico, abriendo la puerta a la predicción meteorológica tal como se conoce hoy en día. Posterior a ello, en 1957 la compañía CDC (Control Data Corporation) crea las supercomputadoras CRAY con potencias de cálculo de MFLOPS (Mega Flops), GFLOPS (Giga FLOPS) y memoria compartida permitiendo la producción de forma operacional de predicciones por conjuntos y/o ensambles. Es a partir de 1994, cuando se realiza el paso a sistemas de memoria distribuida y por lo tanto se realiza la recodificación de los modelos de predicción meteorológica para el uso de computación en paralelo mediante paso de mensajes (MPI, Message Passing Interface) llegando a potencias de cálculo de 300 GFLOPS. Entre los años 2002 al 2015, se avanzó tecnológicamente de procesadores vectoriales a procesadores escalares impulsando el uso de redes de baja latencia junto al incremento progresivo del número de servidores y procesadores, llevando a capacidades de cálculo entre el 200 al 500% superiores en cada clúster y generando más de 6 petabytes de almacenamiento con capacidad para intercambiar sistemas de archivos con potencia de TFLOPS; demostrando así, que la predicción está estrechamente relacionada con la supercomputación y que de ella depende el cálculo y procesamiento de miles de millones de datos en tiempos ajustados a las necesidades de los meteorólogos.

Ahora, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, tiene entre sus funciones generar información y conocimiento hidrometeorológico y ambiental, que si se gestionan con el apoyo de modelos y herramientas tecnológicas de información le permitirá desempeñar mejor su misión, su visión, sus objetivos estratégicos y por ende apoyo a la sociedad. Por ello, el grupo de modelamiento numérico de tiempo y clima (*que tiene como objetivo coordinar y realizar actividades y funciones relacionadas con el modelamiento numérico de tiempo y clima mediante el uso de modelos dinámicos, estadísticos e híbridos, permitiendo operar e implementar modelos numéricos del tiempo y el clima con el fin de suministrar sus productos a usuarios internos, validar y ajustar los resultados de estos modelos y desarrollar procesos de retroalimentación y complementarios que mejoran la eficiencia de los modelos*), implementa modelos de pronóstico del tiempo y predicción climática y, a la medida de sus capacidades desarrolla soluciones de post-proceso útiles para distintos usuarios internos y externos; además de apoyar en la planeación, actualización, operación, normalización y control de los

recursos computacionales e infraestructura, utilizados para la ejecución de dichos modelos, conjuntamente con la oficina de informática.

Desde el año 2000 el Ideam viene trabajando en la implementación de sistemas de cómputo que le permitan suplir las necesidades de capacidad de procesamiento computacional a nivel meteorológico a través de la implementación de computación de alto rendimiento o supercomputación (también llamado HPC), como un instrumento capaz de generar respuestas para la apropiada gestión de información meteorológica realizando la mayor cantidad de operaciones computacionales en el menor tiempo posible usando la menor cantidad de recursos, es decir, buscando la realización de procesos lo más eficientemente posibles. En la realización de estos procesos el sistema computacional del Ideam logró ocupar el puesto 80 entre los 500 PC-Clúster del mundo durante el 2001 (Ideam, 2009). Éste clúster constaba de 54 nodos, 108 procesadores, 13.5 Gb de memoria RAM, disco duro de 0.7 TB mediante una arquitectura de red de vecindad plana que permitía un desempeño máximo teórico de 102.9 GFlops (Melo, 2004)

Actualmente, el centro de alto rendimiento computacional del Ideam no cuenta con actualización tecnológica constante, lo que muestra que aún falta mucho camino por recorrer en comparación de países como Chile y Brasil donde entienden que implementar infraestructura de alto rendimiento computacional es clave y muy necesario en el desarrollo de la ciencia, la meteorología y de la propia industria. Un factor crucial en éste tipo de proyectos es la formación de recursos humanos.

Si bien es cierto que adaptar los modelos de predicción numérica meteorológica (NWP) a HPC con un número cada vez mayor de procesadores es extremadamente complejo debido a la sobrecarga que implica compartir datos entre nodos y los problemas de escalabilidad relacionados a los algoritmos numéricos científicos subyacentes (Adams et al., 2019), también es cierto que la meteorología y la habilidad predictiva tanto de pronósticos del tiempo como de predicciones climáticas ha mejorado significativamente durante los últimos años, estando intrínsecamente ligada a las mejoras en la supercomputación, todo ello como consecuencia directa de la acumulación de décadas de investigación científica y desarrollo tecnológico poco glamorosos, que han permitido a los Servicios Meteorológicos Nacionales (SMN) de todo el mundo producir, de manera rutinaria, pronósticos meteorológicos increíblemente sofisticados, computacionalmente tan complejos como simular la evolución del Universo. y, además, de gran utilidad, siendo fundamentales para la toma de decisiones

2. SUPERCOMPUTACIÓN o HPC

A lo largo de la historia y evolución de las computadoras han surgido diversos conceptos para definir la supercomputación, también llamada Computación de Alto Rendimiento o incluso Computación de Alto Desempeño, por sus siglas en inglés, HPC (High Performance Computing).

Como definición resumida del concepto de “supercomputación” podemos catalogarla como una “sinergia de los microprocesadores”. La idea central se basa en la realización de la mayor cantidad de operaciones computacionales en el menor tiempo posible, usando la menor cantidad de recursos (tiempo, mano de obra, energía, etc.) con una mayor potencia y capacidad de cálculo; es decir, se busca procesar grandes volúmenes de datos de la forma más eficiente posible.



Figura 1. Nodos de procesamiento del clúster de alto rendimiento de Ideam – Bogotá, año 2001

La supercomputación es una rama de la ciencia de la computación que busca la generación de métodos y procedimientos para que los microprocesadores, junto a otros recursos computacionales, trabajen de forma articulada y lo más eficientemente posible, de manera que puedan satisfacer diversos requerimientos de cálculo, cómputo o procesamiento de información. Para ello se combinan una serie de subdisciplinas del conocimiento de las ciencias de la computación, entre las que destacan algoritmos, computación paralela, arquitectura de computadores y computación distribuida.

Entre los principales recursos computacionales que debemos tener en cuenta a la hora de hablar de supercomputación están los microprocesadores con sus núcleos (CPU) (Fig. 1), los aceleradores gráficos (GPU), memorias, discos de almacenamiento, bus de comunicaciones de alta velocidad, sistemas operativos y las aplicaciones informáticas con funcionalidades de procesamiento paralelo.

De acuerdo con la Escuela de Computación de Alto Rendimiento (ECAR, 2013), la Computación de Alto Rendimiento (HPC) “constituye un área muy dinámica en la adopción y uso de recursos y nuevas tecnologías computacionales. Corresponde a un campo inherentemente interdisciplinario ya que las disciplinas en las que se utilizan estas herramientas se amplían día a día, teniendo que nutrirse tanto del know-how de los expertos en la rama puntual de la ciencia como también de las ciencias de la computación e ingenierías relacionadas”

La capacidad de procesamiento de un sistema computacional se mide en FLOPS, floating point operations per second, que significa “operaciones en punto flotante por segundo”. De acuerdo a diversos autores, el HPC comienza a partir de 1 teraflops (10 flops o 1000 gigaflops). Aunque en este caso, a finales del 2023, según el Top500, el HPC de mayor rendimiento es el “Frontier” ubicado en el Laboratorio Nacional Oak Ridge (ORNL) en Tennessee, que supera los 1.100 petaflops, unos 1'100.000 mil teraflops

2.1. TERMINOLOGÍA ASOCIADA A LA SUPERCOMPUTACIÓN

Los siguientes son términos utilizados de manera habitual cuando hacemos referencia a grandes sistemas de cómputo:

Algoritmos: Formas de resolución de un problema mediante una serie de pasos definidos, precisos y finitos. En este caso se resuelven en computadores.

Algoritmo paralelo: Algoritmo diseñado para que sus tareas o instrucciones se ejecuten por partes y a la vez. Sus salidas serán unidas para generar el resultado final del algoritmo.

Algoritmo secuencial: Algoritmo cuyas tareas o instrucciones se ejecutan una detrás de otra, es decir, siguen una secuencia de pasos. La salida de una es la entrada de la siguiente y así sucesivamente hasta el fin del algoritmo.

Ciencia de la Computación: Comprende el estudio de las bases teóricas de la información y la computación, así como su aplicación en sistemas computacionales. Existen diversos campos o disciplinas dentro de las Ciencias de la Computación o Ciencias Computacionales; algunos enfatizan los resultados específicos del cómputo (como los gráficos por computadora), mientras que otros (como la teoría de la complejidad computacional) se relacionan con propiedades de los algoritmos usados al realizar cálculos.

Clúster: Un clúster computacional (o de cálculo) es una red de computadoras que trabajan conjuntamente y en paralelo con el objetivo de resolver problemas complejos (Fig. 2).

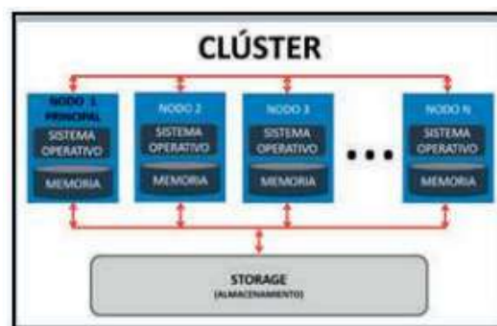


Figura 2. ilustración de arquitectura de clúster.

Computación paralela: Es una técnica de programación en la que muchas instrucciones se ejecutan simultáneamente en diversos núcleos e incluso en diversos procesadores y computadoras. Se basa en el principio de que los problemas grandes se pueden dividir en partes más pequeñas que pueden resolverse de forma concurrente ("en paralelo"). Es la principal técnica utilizada en supercomputación.

Computación científica: Comprende la construcción de modelos matemáticos y técnicos numéricos para resolver problemas científicos, sociales y de ingeniería.

CPU: "Unidad Central de Procesamiento", es la encargada de procesar absolutamente todas las operaciones de la computadora realizando sus operaciones de forma secuencial.

Escalabilidad: Es la capacidad de un código de ejecutarse cada vez más rápido al aumentar la capacidad de cálculo. La mayoría de los códigos tienen un límite asintótico donde el aumento de la capacidad no produce menores tiempos de ejecución.

FLOPS (floating point operations per second): operaciones de punto flotante por segundo, es una medida del rendimiento de un ordenador, especialmente en supercomputación. Los ordenadores personales suelen operar a unos cuantos GFLOPS mientras que los más rápidos supercomputadores del planeta alcanzan varias decenas de PFLOPS.

Núcleo o Core: Una unidad de procesamiento que lee las instrucciones y ejecuta las acciones específicas. Actualmente los procesadores vienen con más de un núcleo.

Procesadores escalares: permiten que cada instrucción de un procesador escalar opere sobre un dato cada vez.

Procesadores vectoriales: permiten una sola instrucción operando simultáneamente sobre un conjunto de datos.

Sistema de Alto Rendimiento Computacional: Conjunto de elementos asociados para facilitar servicios de procesamiento de grandes volúmenes de información. Entre los elementos se destacan: equipos de grandes capacidades de procesamiento, sistema de refrigeración, sistema eléctrico para acceso y respaldo de energía, sistema eléctrico de soporte, software de gestión, y personal encargado de la gestión y acceso.

Sistemas de memoria compartida: permiten mantener registros en un área común a varias unidades de procesamiento. En esta memoria se puede trabajar en paralelo utilizando hilos de procesamiento.

Sistemas de memoria distribuida: sistemas que no permiten mantener registros en un área común de memoria a varias unidades de procesamiento. En esta memoria se puede trabajar en paralelo utilizando software de paso de mensajes.

Sistemas híbridos: sistemas que tienen la capacidad de funcionar en paralelo conjuntamente como sistemas de memoria distribuida (paso de mensajes) y sistemas de memoria compartida (hilos).

Teraflops: Número de operaciones de punto o coma flotante por segundo que es capaz de realizar un procesador o núcleo. 1 gigaflops comprende 1000 millones de flops (10 flops), 1 teraflops comprende 1000 gigaflops, 1 petaflops comprende 1000 teraflops.

3. EVOLUCIÓN DE LA SUPERCOMPUTACIÓN EN EL IDEAM

El avance tecnológico y computacional comercial permitió al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, durante la década de los noventa, crear el clúster de pc's (entiéndase por clúster el conjunto de computadoras construidas mediante la utilización de componentes de hardware que se comportan como si fuesen una única computadora (Buyya, 1999) para computación de alta velocidad para modelamiento de tiempo y clima usando tecnología Beowulf (Ver Fig 3b) con balanceo de carga y sistema operativo Linux en su distribución Red Hat, realizando las modificaciones necesarias en el Kernel para trabajar con OpenMosix, y administrando el mismo a través de la herramienta bWatch, logrando con ello un proceso paralelo de tareas cada vez que se ejecutara alguna aplicación, analizando aplicaciones de ingeniería para posteriormente proporcionar resultados, realizando cuadros comparativos en base a tiempo máquina y destacando la importancia de compartir tareas con n equipos de cómputo para la obtención de resultados en tiempos cortos. El clúster de computadores para cómputo masivo constaba de 8 racks de 19", cinco de ellos con división para 8 nodos, 6 Switches Catalyst 3548 XL de 48 puertos 10/100 Base T FastEthernet, 54 nodos con 108 procesadores y el equipo correspondiente al mdk para salida a Internet, con tecnología SMP (multiprocesamiento simétrico) como una de las modalidades de multiprocesamiento en paralelo. Los 54 nodos estaban divididos en dos tipos de nodos con tres tarjetas y, 3 nodos principales que poseían 4 tarjetas de red con características específicas, además de agruparse en 4 grupos de acuerdo a la arquitectura de vecindad plana implantada (arquitectura tetraedro, Fig. 3a). En cuanto a configuración de software, Los nodos esclavos tenían instalación local completa; es decir, que todo el software, tanto del sistema operativo como de las aplicaciones, eran instalados en los discos internos de cada nodo cliente, configuración que reducía a cero el tráfico NFS para obtener el sistema operativo o cualquier otra aplicación por parte de los nodos esclavos. Para el monitoreo de los nodos, se tuvo en cuenta: un sistema de diagnóstico para Linux de Compaq para servidores proliant ML350, con el fin de poder observar la temperatura de los procesadores y una herramienta bWatch (Beowulf Watch) -programa TCL/TK- que mostraba en una ventana un conjunto de información acerca de cada uno de los nodos que conformaban el clúster. (Melo, 2005)

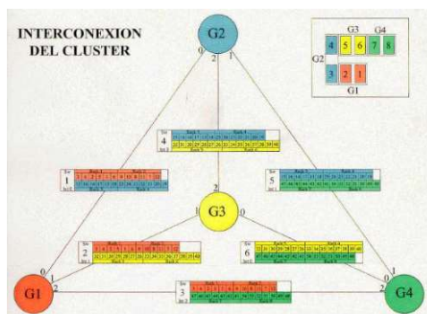


Figura 3a. Arquitectura tetraedro clúster Ideam

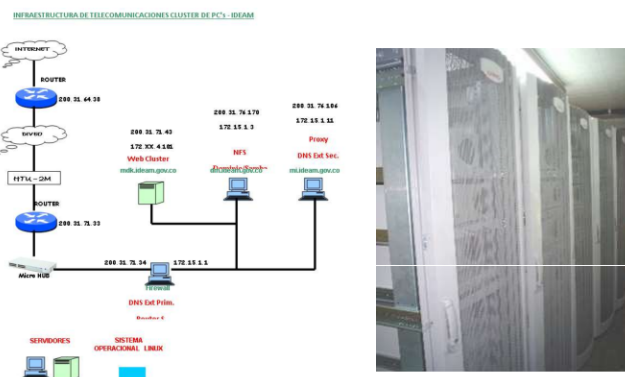


Figura 3b. Diagrama inicial Clúster Beowulf Ideam 2001 (Beowulf clúster, 2010)

Conforme se fue avanzando y explotando los recursos tanto de hardware como de software, se empezaron a tener otras necesidades a la medida, como por ejemplo una mayor capacidad de procesamiento, de almacenamiento temporal (usado para que coordinadamente con el procesador se pueda realizar con mayor rapidez las tareas solicitadas), de almacenamiento secundario (el cual aumenta en proporciones gigantescas, debido a la necesidad de guardar volúmenes de información de forma permanente y de manera prioritaria) y de comunicación a través de la red (comunicarse al mundo exterior o simplemente compartir la información que se tiene de una computadora a otra). Es por ello que en 2015 se actualiza el Clúster a un Power Edge M1000e Blade Enclosure con 16 nodos de diferentes características (6 blades DELL M610 con 2 procesadores de 8 cores, 32Gb RAM y 300GB y 12 blades DELL con 2 procesadores de 10 cores sin hyperthreading, 32 Gb RAM y 900Gb) y 4 switches Dell PowerConnect M6220 con diferentes propósitos (Ver fig. 4), el cual contó con un sistema de configuración web para administrar todos los nodos y switches a través del Chassis Management

Controler (CMC), accediendo de manera visual a: nodos, tareas administrativas del sistema operativo, administración de las máquinas virtuales del sub-clúster de visualización y switches. El sistema de almacenamiento era una SAN 3par administrada por la oficina de informática y conectada al Enclosure vía iSCSI con capacidad de 27 Tb, las cuales fueron asignadas a los máster de los distintos sub-clúster cuyo uso y acceso se realizaba a través de directorios compartidos y dinámicos del RocksCluster usando NFS (Network File System), debido a que de ésta manera los procesos paralelizados pudieran hacer uso de los datos de la SAN a través de los nodos de procesamiento.

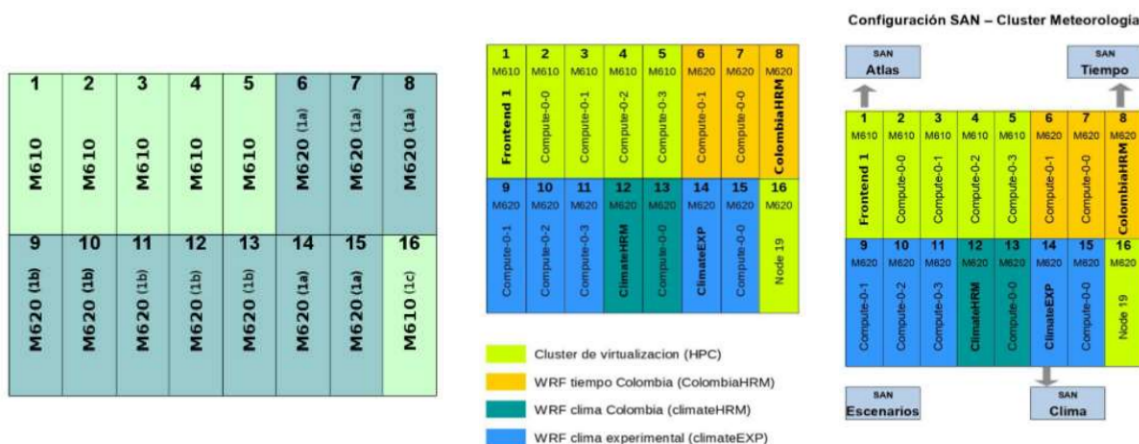


Figura 4. Clúster de Meteorología (Blades, Sub-clústers y SAN)

En 2017 se decide realizar la implementación de modelos numéricos con mejor resolución espacial y temporal automatizando los esquemas de verificación para evaluar el ajuste de bondad de los modelos, por lo que fue necesario realizar la migración a una solución de hiperconvergencia VX BLOCK (Fig. 5), pasando de una herramienta de virtualización (hipervisor SO Linux) a una solución de software de virtualización multiplataforma para equipos compatibles con arquitectura X86, RockCluster 6.2, sistema operativo Linux Centos.48 cores y 11 TB de almacenamiento.

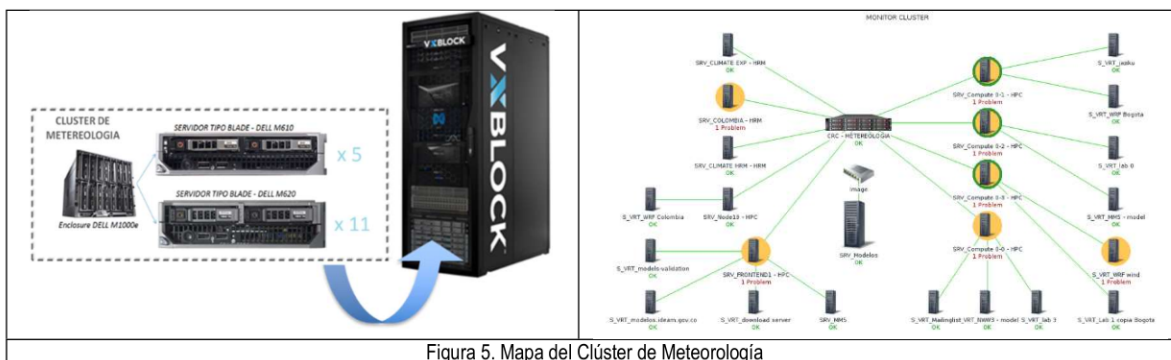


Figura 5. Mapa del Clúster de Meteorología

A lo largo de la vigencia 2023, el Grupo de Modelamiento Numérico de Tiempo y Clima continúa avanzado en la implementación de los modelos dinámicos de pronóstico del tiempo y dinámico-estadísticos de predicción climática, con miras a tener continuidad en estos procesos, mejorar los mismos, reestablecer aquellos que sufrieron pérdida e incluso contar con modelamiento correspondiente a Cambio Climático.

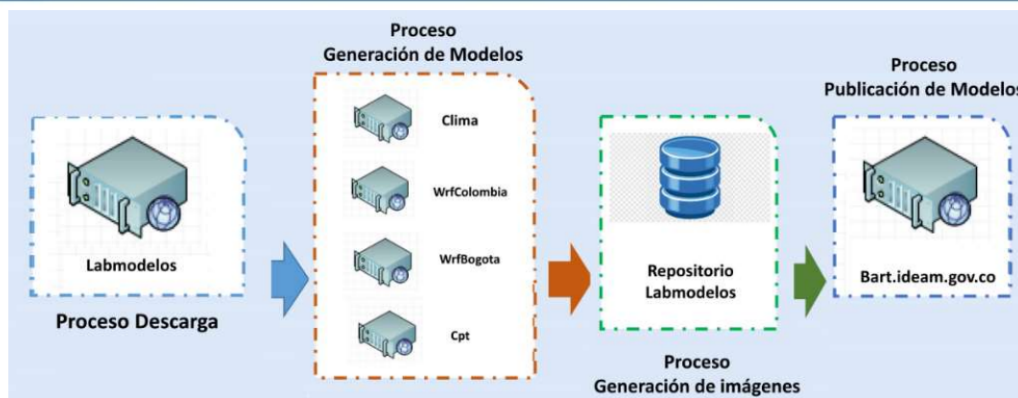


Figura 6. Sistema de Modelamiento Numérico VxBlock Subdirección de Meteorología

Actualmente este sistema de información de modelamiento numérico (Fig. 6) no satisface totalmente las necesidades y requerimientos del proceso de generación de conocimiento e investigación, debido a la deficiencia de la actual infraestructura tecnológica que lo soporta en cuanto a procesamiento, memoria y almacenamiento que son insuficientes para procesar los altos volúmenes de información, la cantidad de cálculos y demás procesamientos que consumen demasiado tiempo, lo que conlleva a no mejorar productos de pronóstico y predicción por parte del IDEAM con el fin de mejorar la alerta, la planeación sectorial e incluso la formulación de políticas con bases en decisiones climáticamente inteligentes soportadas objetivamente desde la modelación.

3.1. CLÚSTER DE CORRIDA MODELOS DE PRONÓSTICO DEL TIEMPO

En la actualidad, el grupo de modelamiento continúa operando los modelos globales y regionales de pronóstico del tiempo que tiene implementados operativamente y que se actualizan diariamente en el portal web del IDEAM y en el portal web de modelamiento (<http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/tiempo.html>). En este clúster se corren los modelos meteorológicos de tiempo GFS (global) y WRF y se comparte el pronóstico diario para Colombia a una resolución de 10kmX10Km, con resolución temporal de 60 segundos, salidas cada hora y a un horizonte de pronóstico de 7 días. Igualmente se hace un ejercicio en alta resolución para Bogotá con un dominio madre de 15kmX15km (sobre el centro del país) y doble anidamiento, el primero de 5KmX5km para Cundinamarca y el segundo de 1.6kmX16km para Bogotá.

La infraestructura tecnológica empleada para tal fin, se encuentra repartida en los servidores WRFColombia y WRFBogota y consta cada uno de:

- 22 cores
- 32 GB en memoria RAM
- 11 TB de almacenamiento compartido además con el servidor Cpt
- Sin asimilación continua
- Modelo global GFS a 0.5° (00Z y 12Z)
- Modelo global GFS a 0.25° (06Z y 18Z)
- Modelo regional WRF 10 km X 10 Km con 2 actualizaciones diarias a un horizonte de 7 días.

En 2021, el cambio en la estructura del modelo global de pronóstico de tiempo de la NOAA, que evolucionó de la versión GFS a GFS-FV3; obligó al IDEAM a reestructurar y cambiar las líneas de código informático (programas personalizados) que cubren desde la descarga de los datos de dicho modelo hasta la corrida operacional del modelo regional WRF en alta resolución; cambios que exigen a los servicios meteorológicos tener versiones superiores a 4.0 del modelo WRF al menos en su módulo de pre-procesamiento (WPS).

Coyuntural a lo anterior, la nueva implementación de dichos modelos se realizó de forma paralela en la nueva arquitectura tecnológica que adquirió el IDEAM, denominada VxBlock; lo cual no fue tarea fácil por diferentes motivos: tanto a nivel informático como a nivel de sistema operativo. Lo anterior obligó al grupo de modelamiento a abarcar varias fases: primero,

a entender la nueva tecnología de procesamiento de información en la máquina mencionada y, segundo, a realizar varias pruebas y experimentos por parte de la Subdirección en el nuevo sistema para que la Oficina de Informática asignara paulatinamente recurso para la descarga de los datos y la corrida de los modelos sobre dicha plataforma tecnológica.

En vista de que el sector de la máquina entregada por parte de la Oficina de Informática solamente contaba con el sistema operativo base, desde la Subdirección de Meteorología se realizaron sobre el VxBlock tareas de pruebas de entorno del sistema, prueba de verificación de compiladores (gfortran y gcc), instalación de librerías (netcdf, mpich, zlib, libpng y jasper), pruebas de compatibilidad de las librerías e instalación del modelo WRF (WRF, WPS, ARWpost) para posteriormente automatizar la instalación del nuevo modelo WRF4.0 incluyendo: instalación de librerías mínimas que requiere el sistema operativo como administrador y/o usuario con permisos de instalación sobre sistema operativo Linux en distribuciones CentOS (Para clúster y VxBlock). Así mismo para generar adicionalmente algunos productos desde el modelo global fue necesaria la instalación de librerías para decodificar datos del modelo global GFS-FV3 (wgrib2 de NOAA y grib_api del ECMWF), configuración e instalación de software para generar datos, gráficos y salidas en shape y/o raster a partir de los modelos GFS-FV3 y WRF4.0 (GrADS). La implementación también incluyó la descarga de datos estáticos en alta resolución que requiere el modelo WRF (USGS y MODIS) y la adaptación de los mismos con cartografía de IGAC. Finalmente, se incluyó la instalación de software para manipulación de archivos gráficos (Imageworks y gifscicle) con el fin de hacer mosaicos de imágenes y animaciones respectivamente.

Una vez realizado lo anterior, se implementó la corrida del modelo WRF tomando condiciones iniciales de la última versión del modelo GFS-FV3; esto implicó cambios en los scripts de descarga con el fin de tener 4 descargas diarias del modelo GFS-FV3 para 2 corridas diarias del modelo WRF (00Z y 12Z). Desafortunadamente con el fin de tener salidas en tiempos operativos, las condiciones iniciales utilizadas para correr el modelo WRF son las 0.5° de resolución espacial del modelo global GFS-FV3; ya que la velocidad de internet no es lo suficientemente rápida. En su configuración se cambió el número de niveles en la coordenada vertical (de 32 a 34), se parametrizó el modelo con la physic-suite TROPICAL en la física, se mejoró la resolución espacial para Colombia (de ~25kmX25km a 10kmX10km) y se amplió el horizonte para la corrida horaria extendiéndolo a 7 días. Aunque con las salidas de las 06Z y 18Z el modelo GFS-FV3 no se realiza una reducción de escala dinámica con el modelo WRF si se generaron rutinas para descargar y obtener resultados de pronósticos a quince días de horizonte de tiempo a una resolución de 0.25°. Todo lo anterior implementado en la sección de VxBlock (/U01, /wrfcolombia y /wrfbogota2) que nos fue asignada.

Finalmente, es importante mencionar que en la nueva versión del portal de modelos meteorológicos, el usuario final no solo tiene disponibles mapas, gráficos y tablas; sino que también cuenta con la opción de descarga de las salidas de los modelos meteorológicos con archivos en formatos grib2, netcdf y ráster; esto con el fin de darle al usuario final la opción de realizar análisis de forma más flexible dependiendo del formato que mejor manipule y, aproveche al máximo, las más de 80 variables que deriva el modelo WRF de la forma más conveniente para sus necesidades (interfaz usuario Global Framework for Climate Services - GFCS).

Sin embargo, debido a los avances científicos en la modelación, como el paso de pronósticos determinísticos a probabilísticos basado en la evolución de pronósticos por conjuntos o ensambles; se requieren nuevos requerimientos y necesidades de infraestructura tecnológica. La proyección del grupo de modelamiento estima que para realizar lo anterior se necesita la ampliación del sistema de cómputo mínimo a 440 cores con el fin de correr el modelo WRF para cada uno de los 20 miembros que hacen parte del modelo GEFS (Global Ensemble Forecast System) (22coresX20miembros=440cores), además de ello se requiere 600 GB de memoria RAM, ~ 20 TB de almacenamiento, implementación de asimilación con metodologías 3D-Var o 4D-Var incorporando además de estaciones de superficie, datos de radiosondas y de radares meteorológicos, y finalmente con una mejora de la velocidad de descarga de internet realizar corridas 4 veces al día tomando condiciones iniciales (00Z, 06Z, 12Z y 18Z) y de frontera del modelo global con resoluciones espaciales 0.25°, para ampliar el horizonte de pronóstico de 7 a 10 días.

3.2. CLÚSTER DE CORRIDA MODELOS DE PREDICCIÓN CLIMÁTICA

En éste clúster, el grupo de modelamiento corre en baja resolución, las salidas de predicción mensual del conjunto de modelos del ensamble norteamericano de la NOAA conocido como NMME (North American Multi-Model Ensemble) que es el que utiliza el Centro de Predicción Climática (CPC, por sus siglas en inglés) de la NOAA para emitir sus pronósticos mensuales y estacionales sobre las condiciones de océano-atmósfera, así como de algunas variables meteorológicas. De

igual manera se realiza la descarga de datos en formato GrADS desde el portal <https://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/International/nmme/> y a partir de ellas, se elaboran las predicciones mensuales a un horizonte de 6 meses del cambio de porcentaje de precipitación mensual y la anomalía de temperatura media para Colombia con respecto a las climatologías de referencia, igualmente en baja resolución, pero para cada uno de los modelos que hacen parte del NMME. Con la información anterior, se realiza operativamente y de manera mensual la reducción de escala estadística usando análisis de correlación canónica con la herramienta Climate Predictability Tool (CPT) para obtener el ensamble de la predicción climática mensual en Colombia; a un horizonte de predicción de 6 meses, pero en alta resolución espacial (~5kmX5m).

Para la realización de éstas tareas, se cuenta con 2 servidores del clúster hiperconvergente (Clima y Cpt), con las siguientes características:

Servidor Cpt

- 24 cores de procesamiento
- 128 GB de memoria RAM
- Downscaling estadístico para 8 modelos globales de clima y predicción climática

Servidor Clima (CFSR-WRF)

- 1 nodos de 32 cores de procesamiento,
- 32 Gb de memoria RAM
- 1 TB de almacenamiento que se borra cada dos días.

Desde el 2019, con respecto al modelo de predicción climática estadística se ha venido realizando por parte del grupo de modelamiento, el mantenimiento operativo de la corrida basada en SST, la compilación de la última versión 15.7.10 de la herramienta Climate Predictability Tool (CPT) para sistema operativo Linux, instalación de la última versión de R y Rstudio para Linux, instalación de librerías de GDAL de Linux CentOS para generación de archivos ráster, cambio y mejora continua de la metodología de predicción climática **#NextGen** (MOS usando Análisis de Correlación Canónica) junto con la implementación y actualización de los mapas de habilidad predictiva para 6 meses de pronóstico (Pearson, Spearman, Kendall Tau, Hit-Score y los ROC), generando productos tanto de predicción determinística como de predicción probabilística mensual de varias variables meteorológicas a un horizonte de 6 meses y a una resolución espacial de 5kmX5km, usando datos procedentes de estaciones meteorológicas, derivados de satélite como CHIRPS y DL-ENACTS, y de reanálisis ERA5.

Con respecto al modelo dinámico, se implementó y se ha mantenido operativa la corrida de predicción climática del modelo CFSv2. Esto ha incluido actividades como: descarga de la climatología de referencia 1981-2010 del Re-análisis CFSR a una resolución de 0.5°, reducción de escala dinámica de la climatología de referencia CFSR con WRF a 15kmX15km de resolución espacial y resolución temporal de 90 segundos, salidas del modelo en consolidado diario e implementación y corrida diaria del modelo (WRF) de predicción climática en modo clima (lectura de SST); tomando condiciones iniciales y de frontera del modelo de predicción climática CFSv2 para 4 miembros de ensamble y para los siguientes 3 meses de predicción. Lo anterior permitió generar scripts que realizaran el ensamble de las corridas diarias y elaborara de manera automática productos como mapas, series de tiempo y tablas de la predicción climática en valor, cambio de porcentaje y anomalía de varias variables meteorológicas a un horizonte de 3 meses.

Al igual que para el clúster anterior, en los servidores Cpt y Clima se tiene la necesidad por parte del grupo de realizar múltiples configuraciones dinámicas y estadísticas; donde estas últimas involucren además de las variables meteorológicas actuales, más predictandos y predictores. Por lo anterior, se requiere ampliación tanto de la de memoria RAM como del sistema de almacenamiento; así como, mejorar la velocidad de descarga de los datos procedentes de fuentes internacionales.

En cuanto a procesamiento, y particularmente para el servidor Cpt se evaluó la necesidad de aumentar en mínimo a 27 cores más para un total de 51 cores con el fin de implementar además de las predicciones procedentes de NMME (8 modelosX3cores=24 cores) las procedentes del programa Copernicus C3S (9 modelosX3cores=27cores); lo anterior,

posiblemente obligue a duplicar la memoria RAM y llevarla a 256Gb. En el caso del servidor Clima (CFSR-WRF) sí requiere cuadruplicar tanto el procesamiento como el almacenamiento expuesto, con el fin de usar diariamente las 4 salidas diarias del modelo de predicción CFSv2 como condiciones iniciales y de frontera para el modelo WRF y a su vez ejecutarlos para los 4 miembros operativos que comparte el modelo global; es decir, se obtendrían 16 salidas diarias para un total aproximado de 480 salidas mensuales que conformarían el ensamble de predicción climática por reducción de escala dinámica para un horizonte de predicción de 3 meses, a una resolución espacial de 15X15km, y con salidas de pronóstico diarias.

Se considera que los principales factores que actualmente afectan el continuo desarrollo de la supercomputación son los siguientes:

- Reducido número de profesionales de informática capacitados en computación de alto rendimiento dentro del Ideam.
- Mínima inversión del sector estatal en proyectos de infraestructura computacional de alto rendimiento (incluye capacitación, uso del software, redes de alta velocidad).
- Reducido número de laboratorios o centros de alto rendimiento computacional en Colombia; lo que coincide con la escasa inversión económica, escasos proyectos con necesidades de procesamiento e incluso por las equivocadas prioridades de las instituciones. Algo que suele suceder en la mayoría de los países sudamericanos.
- Si nos referimos a las entidades del estado, el sistema de adquisiciones con fondos públicos es un factor limitante, considerando la cantidad de trámites, el tiempo de cada proceso, tiempos de importación, las condiciones y los requisitos que deben cumplir las empresas proveedoras. Esto encarece los costos y desanima o limita a todos los actores.
- Escasa producción científica e innovación (a menor producción científica y/o innovación, menor necesidad de procesamiento).

4. CONCLUSIONES

El Grupo de Modelamiento Numérico del Tiempo y Clima considera que dado el alto volumen de información que maneja y gestiona, es necesario contar con una infraestructura tecnológica mixta compuesta de recursos tecnológicos de computación en la nube y en sitio (on premise) que permita apalancar el proceso analizado y su servicio de acuerdo las necesidades y los nuevos retos que se dan en el ámbito social que exigen que el proceso y todo su contexto operativo y funcional sea más eficiente, y seguro, para la generación los pronósticos y predicciones que contribuya a la toma de decisiones, brindando la confianza digital que se espera del mismo.

La necesidad de que el IDEAM adopte para la Subdirección de Meteorología nuevas tendencias tecnológicas como Cloud Computing y VxBlock, herramientas disruptivas de cuarta generación industrial, aseguran mejorar la calidad, la productividad y el alto desempeño que exigen los procesos de modelación numérica de pronóstico del tiempo y predicción climática bajo un estudio costo-beneficio.

Los requerimientos y necesidades anteriormente expuestos para el Grupo de Modelamiento Numérico del Tiempo y Clima de acuerdo a sus especialistas se podrían satisfacer implementando las siguientes soluciones de TI:

- Una arquitectura HPC (high-performance computing o HPC) con escalamiento horizontal para procesamiento en paralelo, con el objetivo de satisfacer las necesidades de alto rendimiento para tareas informáticas complejas y procesamiento de grandes volúmenes de información para la predicción meteorológica, que exige contar con una infraestructura tecnológica con capacidades de computación/procesamiento, memoria, almacenamiento y conectividad que satisfaga necesidades de alto desempeño específicamente para el modelamiento que realiza el grupo. Dentro los requerimientos que debe contemplar la arquitectura HPC se estima contar con 444 núcleos, 500 Gb en RAM, 100 Tb de almacenamiento, con SO Linux CentOS (Librería Rocks-Cluster), Software de evaluación de los modelos, Compiladores Fortran y C++, Librerías netcdf, hdf5, wgrib2, GrADS, mpich, OpenMPI, zlib, libpng, Jasper, Software R, Rstudio, python (Spyder) y QGIS para Linux.
- O un fortalecimiento de las capacidades de memoria, almacenamiento, conectividad y procesamiento de la arquitectura convergente VxBlock con la que se cuenta actualmente.

Teniendo en cuenta las necesidades que se requieren para realizar la predicción climática, posiblemente solo para realizar reducción de escala dinámica de los escenarios de cambio climático tomando como entrada los 39 modelos propuestos por el proyecto Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) se requerirían 468 cores ($39 \text{ modelos} \times 4 \text{ escenarios} \times 3 \text{ cores} = 468 \text{ cores}$) y el uso de ello, se requieren al menos 500Gb en RAM y una capacidad de almacenamiento del orden de 25Tb.

La adopción, adaptación e implementación de estas herramientas disruptivas de cuarta generación industrial, especialmente la sugerida en la alternativa de solución basada en infraestructura HPC como servicio IaaS Cloud Computing escalable (es decir, como alquiler de servicios de infraestructura en la nube con servicios individuales incluidos servidores, máquinas virtuales, recursos de redes y almacenamiento) y el aprendizaje automático (ML), pero también otras como la realidad virtual/aumentada y el procesamiento del lenguaje natural, son cruciales para el nuevo enfoque requerido en la investigación científica y la creación de cadenas de valor de la meteorología en Colombia; pues permitiría asegurar la calidad, la productividad, mayor resolución espacio-temporal, mayor horizontes de tiempo, optimización de tiempos de respuestas, aumentar los pronósticos y predicciones para satisfacer la alta demanda y el alto desempeño que exigen los procesos de modelación numérica de pronóstico del tiempo y predicción climática.

Las condiciones tecnológicas actuales al interior del Ideam son una amenaza existencial para la predicción meteorológica, necesitamos evolucionar rápidamente utilizando el modelo de ciclo de vida tecnológico (Tushman y Anderson, 2004) como herramienta de diagnóstico.

Las capacidades mejoradas de HPC sustentan una mejor investigación y permiten una mayor resolución y complejidad del modelamiento numérico, conduciendo a una mejor capacidad de pronóstico que luego se convierte en mayores beneficios socioeconómicos y productivos al interior del Ideam; pues los pronósticos meteorológicos son perecederos (un pronóstico para mañana es más valioso hoy que mañana) y mover y analizar tales volúmenes de datos de manera oportuna ya no es factible con las infraestructuras de tecnologías de información obsoletas y/o tradicionales.

Es necesario que la oficina de informática decida de una manera responsable entre explotar las tecnologías existentes (continuar utilizando recursos para generar mejoras e ingresos decrecientes ahora); o Explorar nuevas tecnologías y enfoques (utilizando recursos en lugar de innovar y generar valor en el futuro) teniendo en cuenta la separación entre la innovación del Producto (es decir, la generación de pronósticos meteorológicos en sí) y la innovación de Procesos posteriores (la combinación de tecnologías nuevas y existentes para hacer que el Producto sea más valioso para los usuarios), ya que el instituto hace parte de una comunidad global (OMM) que solicita una innovación incremental por parte de los servicios meteorológicos nacionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbe, C., 1901. "The physical basis of long-range weather forecasts". Mon. Wea. Rev. 29, 551–561, <https://doi.org/10.48420/17104439.v1>
- Adams, S.V., Ford, R.W., Hambley, M., Hobson, J.M., Kavčič, I., Maynard, C.M., Melvin, T., Müller, E.H., Mullerworth, S., Porter, A.R., Rezny, M., Shipway, B.J., Wong, R. (2019). LFRic: "Meeting the challenges of scalability and performance portability in Weather and Climate models". Journal of Parallel and Distributed Computing, 132, 383-396.
- Bjerknes, V. Das Problem der Wettervorhersage betrachtet vom Standpunkt der Mechanik und Physik. Meteorol. Z. 21, 1–7 (1904).
- ECAR, 2013. Escuela de Computación de Alto Rendimiento. Mendoza: ECAR, 2013. Disponible en: <http://ecar2013.hpclatam.org>.
- IDEAM, 2009. "Diagnóstico del Estado de la Meteorología en el Ideam". Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Subdirección de Meteorología.
- Melo F., J.Y., 2004: "Informe sobre el Sistema de multiprocesamiento en paralelo – Clúster de PC's IDEAM". Subdirección de Meteorología. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, Colombia.
- _____, 2005: "Fichas Técnicas - Clúster de PC's IDEAM". Subdirección de Meteorología. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, Colombia.
- Top500, Top500 List - November 2023 [En línea]. Waibstadt: Top500, 2016. Disponible en: <https://www.top500.org/lists/top500/2023/>