

# La Nueva era de los Supercomputadores Vectoriales

María Fernanda Navas, Deisy Katherine Rangel, and Wilder Rojas

## Resumen

Vector architectures have long been the better choice for building supercomputers. They first appeared in early seventies and had a long period of unquestioned dominance until 1991, but in this new century they have raised again with new vector supercomputers that can solve the major problem of the memory bandwidth. We present a brief summary of the past and present of this supercomputers and also the paper that they have gained in scientific purposes, we also dig in some questions of why the lost of popularity of this machines. In addition we present you the vector supercomputer SX-Aurora TSUBASA and compare with some of the newest machines in the market. Finally we talked about how in Colombia we can implement this machines.

Las arquitecturas vectoriales por mucho tiempo han sido la mejor opción para la construcción de supercomputadoras. Tuvieron su primera aparición en inicios de los setentas y tuvieron un largo periodo de dominancia hasta 1991, pero para este nuevo siglo han vuelto a surgir con nuevos modelos que resuelven uno de los mayores problemas en arquitectura que es el memory bandwidth. Presentamos un corto resumen del pasado y presente de estas máquinas, también del papel que han ganado para propósitos científicos, de igual forma divagamos en ciertas preguntas como por ejemplo el por qué de la pérdida de popularidad de los supercomputadores vectoriales. Adicionalmente presentamos el supercomputador vectorial SX-Aurora TSUBASA y lo comparamos con los nuevos supercomputadores del mercado. Por último hablamos de como estas máquinas pueden ser implementados en Colombia.

## I. INTRODUCCIÓN

La computación vectorial también llamada procesador vectorial es un diseño de CPU que puede realizar operaciones de carácter científico, matemático con múltiples datos en forma simultánea. En la actualidad casi todas las CPU incluyen algunas instrucciones de procesamiento de tipo vectorial, conocidas como SIMD. En particular, las consolas de videojuegos y las tarjetas gráficas hacen un uso de este tipo de procesamiento. Una máquina vectorial consta de una unidad escalar segmentada y una unidad vectorial. La unidad vectorial dispone de  $M$  registros vectoriales de  $N$  elementos y de unidades funcionales vectoriales como de suma/resta, multiplicación, división y de carga/almacenamiento entre otras que en conjunto trabajan sobre los registros.

Los Sistemas de supercomputación han tomado un papel importante en las infraestructuras sociales, debido a esto se ha generado alta demanda de estas máquinas sobretodo en el ámbito científico. Ahora para satisfacer esta demanda computacional se han implementado técnicas avanzadas para asegurar un alto performance computacional.

Un ejemplo de esto se ve en los procesadores actuales y aceleradores que utilizan tecnología many-core que por su nombre integra miles de cores en un chip. además que las técnicas de cálculo vectorial han sido adoptadas en procesadores scalar y aceleradores al igual que los procesadores vectoriales.

Sin embargo, mientras estas técnicas solo mejoran la capacidad computacional, existe un espacio entre un performance teórico y un performance sostenido, conocido como el memory wall problem. Debido a que mejorar el performance de memoria es más complicado que el performance computacional dicho espacio va creciendo. además, las aplicaciones de memory-intensive están limitadas por el bajo rendimiento de memoria por lo tanto tienen menor performance sostenido. los sistemas de vector supercomputing están diseñados para un alto rendimiento de memoria como de sostenimiento, incluso en aplicaciones con memoria intensiva. Estos supercomputadores alcanzan rendimientos bastante altos en sostenimiento con respecto al porcentaje del pico de rendimiento denominado eficiencia.

Debido a que el rendimiento de memoria ha ganado a través del tiempo bastante importancia, un nuevo supercomputador vectorial llamado SX-Aurora TSUBASA el cual contiene la mayor banda de memoria que se ha sacado al mercado. El SX-Aurora TSUBASA está diseñado para dos requerimientos importantes alta usabilidad y sostenibilidad, para cumplir esto el SX-Aurora TSUBASA incorpora un nuevo sistema de arquitectura y una nueva tecnología de integración de memoria. Su estructura consiste en un motor de vectores (VE) equipados con procesador vectorial y un vector host (VH) de un nodo estándar x86 de linux. A pesar de que puede ser similar a la arquitectura de un acelerador convencional, su ejecución es totalmente diferente.

En este paper se hará una breve presentación de los supercomputadores vectoriales y de algunos de sus productores, además nos enfocaremos en el supercomputador TX-Aurora TSUBASA divagando en su arquitectura, diseño y funcionamiento. Por último se hablara de la problemática actual de la falta de supercomputadoras vectoriales en Colombia y para finalizar se presentaran las conclusiones a partir de lo anterior nombrado.

## II. EL LEVANTAMIENTO DE LOS SUPERCOMPUTADORES VECTORIALES

A pesar de que el primer procesador vectorial data de 1976, hasta no hace mucho fue que se empezaron a ver estos procesadores en computadores personales. Actualmente existen varias empresas que fabrican procesadores de este tipo, incluyéndolos en los ordenadores actualmente, las dos principales son: Intel Corporation y AMD. Ambas crean sus procesadores vectoriales mediante distintas tecnologías que veremos a continuación.

Intel Corporation (Integrated Electronics Corporation) desarrollo su primer procesador vectorial en 1997 gracias a las instrucciones MMX, y se crearían las instrucciones SSE. MMX son un conjunto de instrucciones SIMD desarrollado a partir de otro conjunto introducido en el Intel i860; y las instrucciones SSE son una extensión de las instrucciones MMX.

AMD (Advanced Micro Devices, Inc.), desarrollo su primer procesador vectorial en 1998 con la introducción de las instrucciones 3DNow. Estas instrucciones fueron desarrolladas como una mejora al conjunto de instrucciones MMX de Intel, para poder operar con datos den como flotante además de datos enteros. Aun así, el único que maneja las supercomputadoras de vectores puros es NEC (Nippon Electric Company, Limited), y en su motor de procesamiento NEC SX Aurora TSUBASA, utiliza procesadores vectoriales de la familia Intel Xeon.

En el caso de las supercomputadoras con procesamiento de vectores, la primera implementación que tuvo éxito fue la Corporación de Datos de Control STAR-100 y la Computadora Científica Avanzada (ASC) de Texas Instruments.

La técnica vectorial fue desarrollada por completo en 1976 por el famoso Cray-1, que fue un supercomputador diseñado, fabricado y comercializado por Cray Research, y el cual es uno de los supercomputadores más exitosos de la historia. Otros ejemplos siguieron como CDC (Control Data Corporation) que intentó con su máquina ETA-10. A principios de la década de 1980, las empresas japonesas (Fujitsu, Hitachi y NEC (Nippon Electronic Corporation) ) introdujeron máquinas de vectores basados en registros similares al Cray-1, tratando de que sean más rápidas y más pequeñas.

A pesar de esto, Cray siguió siendo el líder en cuanto a rendimiento, presentando una serie de máquinas Cray-2, Cray X-MP y Cray-Y-MP. Desde ese momento las supercomputadoras se han centrado más en el procesamiento masivamente paralelo en lugar de mejorar las implementaciones de los procesadores vectoriales. No obstante, valorando los beneficios que tiene el procesamiento de vectores, IBM desarrolló la arquitectura virtual de vectores para su uso en supercomputadoras que combinan varios procesadores escalares para que actúen como procesadores de vectores.

Actualmente las supercomputadoras vectoriales que tienen similitud al Cray-1 no son tan populares, sin embargo, la compañía NEC continúa haciendo este tipo de computadoras hasta el día de hoy, con su serie de computadoras SX. Con su más reciente creación anteriormente vista que es el SX-Aurora TSUBASA. Por otro lado, en el caso de los procesadores vectoriales, existen varias empresas que fabrican procesadores de este tipo, incluyéndolos en los ordenadores actualmente, las dos principales son: Intel Corporation y AMD. Ambas crean sus procesadores vectoriales mediante distintas tecnologías; por ejemplo en nuestro caso vemos que el SX-Aurora TSUBASA utiliza la tecnología de Intel con su familia de procesadores Xeon.

A pesar de ser máquinas populares en el mercado desde el inicio de los noventa, los supercomputadores basados en el vector paradigma han perdido dominio en el mercado incluso cuando estas máquinas han alcanzado los mejores picos de rendimiento. Esto es debido al gran costo que representan, lo cual nos lleva a una pregunta ¿qué diferencia las supercomputadoras vectoriales del resto para aumentar su costo?.

Probablemente la razón más importante es que los sistemas scalar-parallel usan commodity-parts. Con el uso de commodity-parts, diseño y con los bajos costos de manufactura. Sí una máquina vectorial solo vende una docena de copias, entonces el costo de diseño fácilmente puede dominar el costo total.

La parte más costosa de un computador es usualmente el sistema de memoria. Como se ha nombrado antes los supercomputadores vectoriales proveen un alto rendimiento en los sistemas de memoria. Para alcanzar dicho performance los procesadores vectoriales dependen del alto rendimiento en el highly interleaved memory systems(entre 256 y 1024 bancos de memoria dependiendo en el procesador y configuración). Por lo tanto estas máquinas usan la tecnología más rápida disponible. Típicamente, un sistema vectorial de memoria esta compuesto por SRAM/SSRAM memory modules con ciclos de 10-20ns; esto permite mantener una latencia de memoria entre 10 a 30 processor cycles

Por ultimo, es importante notar que han habido relativamente poca inovación en la parte de arquitectura. Mientras tanto microprocesadores han adoptado varias características para incrementar el rendimiento manteniendo el bajo costo.

### III. PRESENTACIÓN GENERAL DEL SX-AURORA TSUBASA

NEC es la empresa creadora de dicho computador, la cual se ha mantenido en constante búsqueda del mejor performance sostenido en especial para aplicaciones científicas.

La arquitectura del SX-Aurora TSUBASA consiste principalmente en un VH y entre uno o más VEs. El VH es un servidor estandar de x86 linux que provee sistemas operacionales estandar(OS). VE OS es un OS por VEs que corre en un VH, y controla los VEs. Cada VE es implementado como un PCI Express(PCIe) card equipado en el procesador vectorial y conectado al VH.

El SX-Aurora TSUBASA no solo incluye una larga escala de supercomputador, pero también una pequeña configuración similar al de un computador personal.

#### III-A. Arquitecuta de la Máquina Vectorial

El proposito del diseño del procesador VE es mantener un alto rendimiento sostenido para aplicaciones con limitaciones de memoria haciendo uso del high memory bandwidth siendo razonables con la efectividad energética. Gracias a la disponibilidad de tan alta tecnología, el procesador provee the highest memory bandwidht en el mundo, 1.22TB/s por procesador.

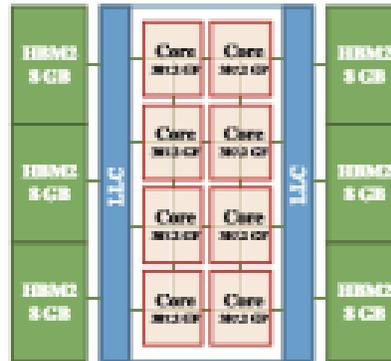


Fig. 1. Block diagram of a vector processor.

En la figura 1 observamos un diagrama de bloque del procesador VE. Este consiste en ocho vector chores, un 16 MB last-level cache(LLC), y seis modulos de memoria HBM2. Cada core provee 307.2 Gflop/s para double-precision(DP)y 614.4 Gflops para single-precision(SP) en cálculos de floating-point. El LLC se encuentra a ambos lados de los cores, y esta conectado a cada core por medio de un network bidimensional con un cache total de 3 TB/s. Este procesador es manufacturado con una tecnología de 16-nm FINFET. Aproximadamente 4.8 billones de transistores son integrados en el LS.

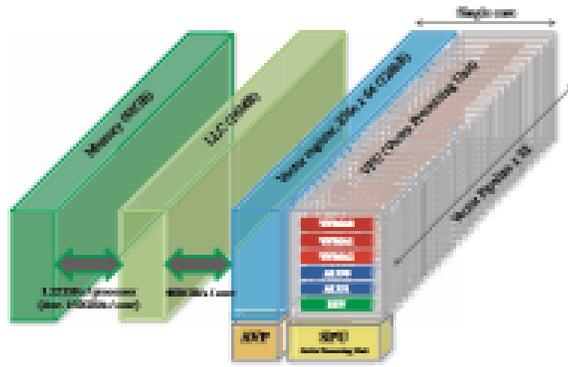


Fig. 2. Detail of a core in the VE processor.

La figura 2 muestra solo un core y sus registros, cache y jerarquía de memoria. El core consiste en tres unidades: una unidad de procesamiento escalar (SPU), una unidad de procesamiento vectorial (VPU), un memory addressing vector control y una unidad de network processor (AVP). El SPU trabaja como un core controlador. Que está estrictamente emparejado con el VPU y el VPA, cada core del procesador VE tienen la misma funcionalidad de un procesador moderno. En sus funciones se incluye fetch, decode, execution, branch, detection of exception, memory protection entre otros. Gran parte de estas funciones están soportadas por el SPU. Una de las ventajas de esta arquitectura es la organización del VPU.

El VPU tiene tres unidades vector fused multiply add (VFMA) que pueden ser operadas independientemente por diferentes instrucciones vectoriales. Cada unidad del VFMA tiene 32 vector pipelines (VPP). El vector length (VL) de esta arquitectura es de 256 elementos, cada uno con 8 B. Por lo tanto, una instrucción de vector ejecuta 256 operaciones aritméticas con ocho ciclos de reloj.

Como podemos observar en la figura 2, el número de registros vectoriales es de 64. El tamaño de cada vector registrado es de 2 KB, ya que  $256 \times 8B$  elementos que son iguales al VL son guardados en un vector registrer. Por lo tanto el vector registrer tiene un tamaño total de 128 KB por core. Esta capacidad es mayor a la de un cache L1 implementada en un procesador moderno escalar. El LLLC está directamente conectado al vector registrer y la conexión tiene un bandwidth de 400 GB/s. Debido al gran diseño del bandwidth entre la memoria y cada core, tres o cuatro cores pueden usar toda la memory bandwidth del procesador. Esta es una de las características para acelerar el aplicaciones memoy-intensive. El paquete del procesador VE es implementado en una tarjeta PCIe con una conexión Gen3 x 16. Esta tarjeta está diseñada para que el power consumption no exceda los 300 W.

#### IV. EJECUCIÓN DEL MODELO DEL SX-AURORA TSUBASA

El VE es totalmente responsable de ejecutar aplicaciones, mientras que el VH provee OS functions y administra el sistema de llamadas invocadas por la aplicación que está corriendo en el VE. TSUBASA a comparación de modelos anteriores no necesita que frecuentemente haya transferencia de datos entre el VE y el VH. Por lo tanto, los programadores no deben encargarse de las interacciones entre el VH y el VE, porque son encargados por un sistema de llamadas enviado al VH.

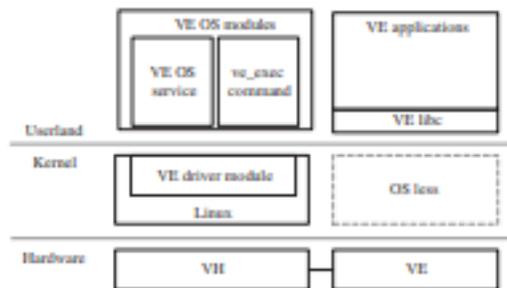


Fig. 3. Software stack of SX-Aurora TSUBASA.

En la figura tres se muestra el diseño y la implementación del VE OS donde fueron inspirados por HPC operating systems for heterogeneous systems. En estos sistemas, el sistema de llamadas hecho por una aplicación son enviados a sus correspondientes

pseudo procesos en otro host de linux o core. En contraste, en el TSUBASA, no hay un kernel OS en un VE, en cambio, los modulos VE OS en el VH proveen la funcionalidad del OD para el VE. Los modulos VE OS consisten en ejecutar el comando ve-exec y el VE OS service. El ve-exec carga un programa VE, pide permiso para crear un proceso VE, y los servidores de los sistemas de llamadas y excepciones del proceso VE. El driver del VE instalado en VH linux kernel space es un PCI device driver que provee recursos, accesibilidad y interrupciones del VEs.

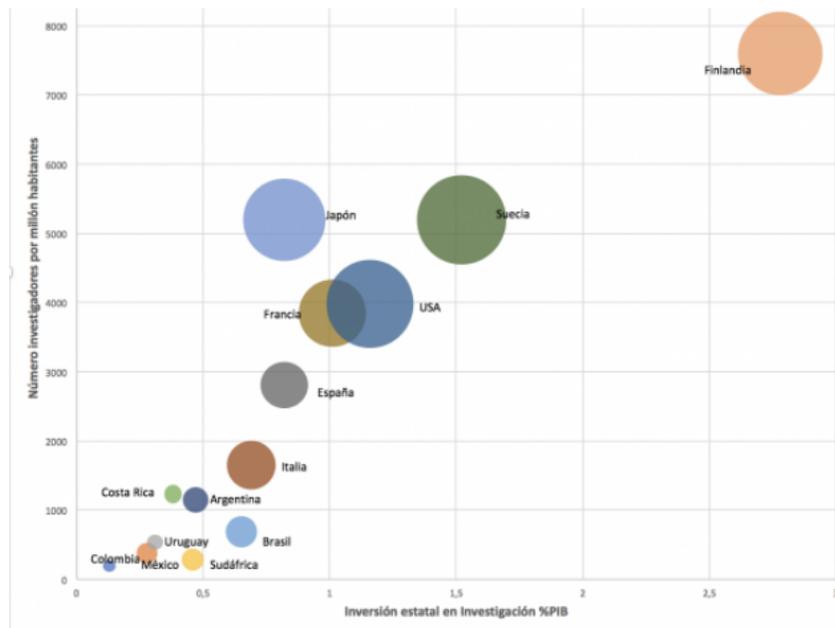
Programas de aplicación para el VE pueden usar una libreria estandar(A C library). Por lo tanto los programadores pueden escribir aplicaciones en programación estandar como C, C++ y Fortran sin tener en cuenta el uso de modelos especiales de programación. TSUBASA no requiere que los códigos de programas existentes sean la única cosa que necesita ser recompilado para utilizar.

Para ejecutar un programa VE, los usuarios usan ve-exec con un programa y sus argumentos. ve-exec viaja a través de la cabecera de un ejecutable and linkable format(ELF) y el encabezado del programa; luego lee cada segmento del programa en el buffer del ve-exec. Después pide al servicio VE OS crear un proceso VE y enviar los segmentos al VE process memory. Al mismo tiempo, ve-exec crea un proceso alternativo en el VH, llamado PSEUDO PROCESS.

### V. SUPERCOMPUTADORES VECTORIALES EN COLOMBIA

Vivimos en una economía del conocimiento y por tanto la ciencia, la tecnología y la innovación condicionan el desarrollo de un país. Para esto es muy útil algunos informes y conclusiones internacionales y nacionales de dominio publico y de reconocidas fuentes. Este es el reporte mundial de la ciencia, publicado por la Unesco cada cinco años, el ultimo fue en 2015 y fue construido a partir de datos recogidos de algunos países.

El eje horizontal muestra el porcentaje de inversión del Estado con respecto al PIB (producto interno bruto), el vertical presenta el número de investigadores por millón de habitantes, y el tamaño de los círculos es proporcional a la inversión en investigación y desarrollo por habitante



Gráficamente vemos que la situación de Colombia es mala entre otros países de Latinoamérica, Colombia invierte menos como porcentaje del PIB, su inversión por habitante es una de las más bajas y tiene un número de investigadores muy pequeño para su población. Un dato muy relevante en este reporte es la proporción de la inversión privada con respecto a la pública. Mientras que en Colombia el sector privado invierte algo menos de un dólar por cada dólar del Estado, en Estados Unidos la proporción es de 2,5 y en Japón y Corea, de 4,4. Otro fenómeno que describe la situación actual de la ciencia en el país es el crecimiento en el número de estudiantes que finalizan sus doctorados en países diferentes al propio, en el 2013 el numero ascendía a 4,4 millones, Colombia no aparece como país receptor.

Un dato importante del informe muestra que Alemania en el año 2012 se graduaron 315 doctores por cada millón de habitantes, en Brasil setenta y en Colombia, cinco.

Resultados parecidos trae el Índice Global de Innovación 2015 de la Universidad de Cornell. En él ocupamos el puesto 67 entre 141 naciones. Califica 79 factores, y las peores calificaciones las tiene en conocimiento, productos tecnológicos y eficiencia para innovar. Es decir, tenemos un buen potencial, pero no lo sabemos utilizar. Entre las debilidades que aparecen en este informe, entre otras, la pequeña escala del sistema de innovación y las limitaciones en capital humano y en recursos para investigación. Las amenazas señalan la incapacidad para actualizar los conocimientos y la falta de incorporación del sistema de innovación a las empresas y al tejido social.

Un informe nacional importante es el de Indicadores de Ciencia y Tecnología en Colombia (2016), producido anualmente el Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología (OCyT). Por discusiones sobre cómo se calcula la inversión nacional, el observatorio decidió ofrecer dos indicadores. Uno es el de I + D (investigación y desarrollo), que es el internacional. El otro indicador Acti es el de inversión en actividades relacionadas con ciencia y tecnologías. Ese es un poco mayor, y con la entrada de las regalías llegó a ser del 0,74 por ciento el 2014, pero el 2015 empezó a descender y, seguramente, después del traslado de más de un billón de pesos de las regalías de ciencias a carreteras, descenderá más.

La inversión de las empresas es apenas un 46 por ciento de la que hace la nación. El Estado invierte en investigación que hacen las empresas diez veces más de lo que ellas invierten en universidades.

La información más preocupante del informe de OCyT es la notable disminución de grupos y de investigadores activos. Para el 2015, la caída de los grupos es de 30 por ciento; la de los investigadores es mayor. Más preocupante aún es el análisis que se hace por edades. Mientras que el número de investigadores mayores de sesenta años disminuye ligeramente (debido posiblemente a causas biológicas), el de investigadores de 30 a 50 cae a casi la tercera parte. Por falta de oportunidades no solo no se incorporan al sistema los graduados recientes, sino que abandonan algunos ya vinculados.

Debido al contexto en que se encuentra inmerso nuestro país donde no hay mucha inversión en tecnología y en donde el estado es el único que invierte un poco más en investigación y ciencia es claro que la inversión en procesadores vectoriales para dichos campos es de gran utilidad e importancia ya que ayudaría a acelerar el proceso de investigaciones importantes que conllevan cientos de datos los cuales necesitan ser procesados eficientemente para su debido propósito, esto implicaría que Colombia avanzara un poco mas en investigaciones importantes para la sociedad en general. Lo anterior no quiere decir que los procesadores vectoriales no sean necesarios para los sectores privados este sería de gran utilidad en diversos campos entre ellos se pueden destacar las diversas ramas de la ingeniería, en el sector de la salud y la medicina, hasta en la economía y las finanzas donde se maneja una enorme cantidad de datos que con un procesador escalar demoraría mucho tiempo lo cual dejaría de ser implementado por la insuficiencia del proceso.

## VI. CONCLUSIONES

los procesadores vectoriales desde sus inicios en los años 70 se han convertido en una gran ayuda para todas las necesidades de conocimiento que tiene el ser humano, pues a medida que este evoluciona su intelecto también lo hace su tecnología y esto crea un sin número de conocimientos que en un futuro serán aplicables a casi todas las actividades que realizara el hombre como ser inmerso en una sociedad que cambia para facilitar la vida de las personas.

Las supercomputadoras con procesamiento de vectores tuvieron su éxito en la década de los 70, con grandes modelos como el Cray-1, y algunas empresas japonesas poco después introdujeron muchas máquinas de vectores con algunos cambios; pero a pesar de las ventajas de estas, se prefirió el procesamiento paralelo, por lo que esta tecnología fue perdiendo su auge de manera considerable. Esto debido a su alto costo en la industria ya que si no se vendían masivamente su costo de manufactura aumentaría considerablemente.

La compañía que siguió apostándole a las supercomputadoras con procesamiento de vectores, y que actualmente sigue creando este tipo de computadoras, es NEC, lo cual ya lo hemos visto con su última creación ya mencionada, el SX-Aurora-TSUBASA

Con el SX-Aurora TSUBASA se busco una forma de innovar en la arquitectura de las supercomputadoras vectoriales ya que esto no se veía desde inicios de los 90, lo cual trajo increíbles beneficios sobretudo al rendimiento sostenido y de memoria, en donde se podrían correr programas con alta exigente de memory bandwidth sin ningún inconveniente.

Para finalizar con el exhaustivo análisis de dichas máquinas se planteó una hipótesis del por qué la falta de supercomputadoras vectoriales en Colombia.

Todos estos informes y análisis citados solo nos llevan a la conclusión de que en Colombia el avance de la tecnología es algo muy lento ya que no hay la inversión suficiente por parte del estado ni por parte de las entidades privadas, a esto se suma la falta de investigadores, de científicos y los pocos grupos de investigación que trabajan con las uñas para poder mostrar algo al mundo y ser parte de un pequeño porcentaje que representa a Colombia en términos de ciencia y tecnología.

#### REFERENCIAS

- [1] .unesco.org (2016) Informe de la Unesco sobre la ciencia.  
Available at: <https://es.unesco.org/unesco-science-report/>.
- [2] [2] ocyt.org (2016) observatorio colombiano de ciencia y tecnología  
<https://www.ocyt.org.co/proyectos-y-productos/informe-anual-de-indicadores-de-ciencia-y-tecnologia-2016/>
- [3] cornell.edu (2015) el Índice Global de Innovación.  
<http://www.cornell.edu/video/global-innovation-index-2015-highlights-soumitra-dutta/embed>
- [4] El tiempo (2017) Cinecia, tecnología e innovación en Colombia hoy  
<https://www.eltiempo.com/vida/ciencia/ciencia-tecnologia-e-innovacion-en-colombia-hoy-99494>
- [5] Vector Procesor  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Vector\\_processorCray-1](https://en.wikipedia.org/wiki/Vector_processorCray-1)  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Cray-1>
- [6] Vector Engine  
[https://www.nec.com/en/global/solutions/hpc/sx/vector\\_engine.html?SX-A500-64](https://www.nec.com/en/global/solutions/hpc/sx/vector_engine.html?SX-A500-64)  
<https://www.nec.com/en/global/solutions/hpc/sx/A500-64.html>
- [7] Procesadores vectoriales  
[http://www.atc.uniovi.es/info\\_superior/4atc/trabajos/paralelas/2-ProcesadoresKazuhikokomatsu,MitsuoYokokawa,ToshikazuAyoma](http://www.atc.uniovi.es/info_superior/4atc/trabajos/paralelas/2-ProcesadoresKazuhikokomatsu,MitsuoYokokawa,ToshikazuAyoma)
- [8] Roger Espasa, Mateo Valero, James Smith. *Vector Architectures: Past, Present and Future*.