



Revista de CIENCIAS AMBIENTALES



Tropical Journal of Environmental Sciences

FORO

El renacimiento del monitoreo ambiental dentro de nuevos paradigmas científicos y operacionales

The Revival of Environmental Monitoring within New Scientific and Operational Paradigms

Arturo Sánchez-Azofeifa^a

^a Ingeniero civil, doctor y catedrático, Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Atmósfera. Director, Centro de Investigaciones en Sistemas de Observación Terrestre, Universidad de Alberta, Canadá. arturo.sanchez@ualberta.ca

Director y Editor:

Dr. Sergio A. Molina-Murillo

Consejo Editorial:

Dra. Mónica Araya, Costa Rica Limpia, Costa Rica
Dr. Gerardo Ávalos-Rodríguez. SFS y UCR, USA y Costa Rica
Dr. Manuel Guariguata. CIFOR-Perú
Dr. Luko Hilje, CATIE, Costa Rica
Dr. Arturo Sánchez Azofeifa. Universidad de Alberta-Canadá

Asistente:

Rebeca Bolaños-Cerdas

Editorial:

Editorial de la Universidad Nacional de Costa Rica (EUNA)



Los artículos publicados se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) basada en una obra en <http://www.revistas.una.ac.cr/ambientales>, lo que implica la posibilidad de que los lectores puedan de forma gratuita descargar, almacenar, copiar y distribuir la versión final aprobada y publicada del artículo, siempre y cuando se mencione la fuente y autoría de la obra.



FORO

El renacimiento del monitoreo ambiental dentro de nuevos paradigmas científicos y operacionales

The Revival of Environmental Monitoring within New Scientific and Operational Paradigms

Arturo Sánchez-Azofeifa^a

Resumen

La ciencia del monitoreo ambiental está sufriendo de dos fenómenos importantes: un crecimiento exponencial en la habilidad para obtener gran cantidad de datos, y la manera en que los comunicamos. Hoy se busca desarrollar métodos para unificar experimentos teóricos con simulaciones que tomen en consideración los tera-bites de información que se están generando como resultado del desarrollo en las telecomunicaciones inalámbricas, y luego analizarlos en tiempo real y comunicarlos a las audiencias pertinentes en un tiempo relativamente corto. En este sentido, uno de los sistemas emergentes más interesantes aplicado al monitoreo ambiental es lo que se llaman redes inalámbricas de monitoreo ambiental, conocidas por sus siglas en inglés como *wireless sensor networks* (WSN). Acá se presentan y se explican algunas de sus aplicaciones, ventajas y desafíos.

Palabras clave: Análisis de grandes datos, cambio climático, redes de monitoreo, comunicación científica.

Abstract

The science of environmental monitoring is suffering from two major phenomena: exponential growth in the ability to obtain large amounts of data, and the way we communicate them. Today we are looking to develop methods to unify theoretical experiments with simulations taking into consideration the tera-bites of information that are being generated as a result of the development in wireless telecommunications, and then analyze them in real time and communicate them to relevant audiences relatively short after. In this sense, one of the most interesting emerging systems applied to environmental monitoring is what are called wireless sensor networks (WSN). Here they are presented, and some of their uses, advantages and challenges are explained.

Keywords: Big data analysis, climate change, monitoring networks, scientific communication.

Albert Einstein hace más de 50 años escribió que si uno no puede explicar algo en términos sencillos es porque no lo entendemos bien; estas palabras en cierta medida se reflejan en la manera en que realizamos monitoreo ambiental en nuestros países latinoamericanos hoy en día. Esto parcialmente es controlado por desarrollos tecnológicos en donde la ciencia dedicada al monitoreo ambiental está evolucionando, pero a un paso más lento que la tecnología que se usa para apoyarla. En tal sentido la ciencia del monitoreo ambiental está sufriendo de dos fenómenos importantes: 1) los niveles de datos y la habilidad para obtenerlos crece en forma exponencial, y 2) la manera en que comunicamos ciencia, especialmente ciencia asociada al

^a Ingeniero civil, doctor y catedrático, Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Atmósfera. Director, Centro de Investigaciones en Sistemas de Observación Terrestre, Universidad de Alberta, Canadá. arturo.sanchez@ualberta.ca



monitoreo ambiental, que también está cambiando. En el primer caso, nos vemos con el reto de ver cómo desarrollamos nuevas síntesis en muchos casos con información que nos llega en tiempo real, lo cual está relacionado con nuevas técnicas para manejar, analizar y visualizar tera-bites de información. En el segundo caso, el reto es cómo comunicamos la síntesis de esos tera-bites de información en una manera que sea clave, concisa y útil no solamente para los políticos y tomadores de decisión, pero también para la sociedad civil en general.

Desde un punto de vista científico es importante visualizar la situación actual en términos de los cambios de paradigmas científicos. Un paradigma es algo que se considera resuelto, no cuestionable y que en general todas las personas lo aceptamos. Por ejemplo, que la tierra rota alrededor del sol es quizás uno de los paradigmas más simples. Pero estos paradigmas tienden a evolucionar, tal como lo presentó Jim Gray cuando definió la presencia de cuatro clases de paradigmas a lo largo de la historia de la humanidad. Según Gray, el primer paradigma existió por miles de años, especialmente en tiempos de los egipcios, las culturas mesopotámicas y los mayas. En esos años la ciencia era de naturaleza empírica y orientada a describir fenómenos naturales tales como eclipses solares o bien el movimiento de las estrellas. Este paradigma estuvo presente por miles de años hasta que un segundo paradigma emergió. Este segundo paradigma se dio a mediados del siglo XVI con el desarrollo de la rama teórica de la ciencia en donde modelos y generalizaciones se dieron para explicar fenómenos naturales. Un caso específico fueron las leyes del movimiento de Newton ($Fuerza = masa \times aceleración$) y la necesidad de tener que desarrollar nuevos conceptos matemáticos para apoyar estos modelos y generalizaciones. Este paradigma se mantuvo por doscientos a trescientos años hasta que el tercer paradigma de la ciencia emergió. Este paradigma estuvo asociado en el desarrollo de los ordenadores y sistemas de computación actuales a mediados de la década de 1940 en adelante, con un pico en las décadas de 1960 y 1970 con el desarrollo de sistemas como IBM y Apple. El objetivo de este nuevo paradigma fue ayudar en la simulación de fenómenos naturales complejos tales como corrientes marinas o bien la necesidad de poner un ser humano en la luna. Este paradigma se mantuvo vigente por unas pocas décadas hasta que el cuarto paradigma de la ciencia apareció. Este último busca básicamente el desarrollar métodos para unificar experimentos teóricos con simulaciones tomando en consideración los tera-bites de información que se están generando actualmente como resultado del desarrollo en las telecomunicaciones celulares. Este paradigma está enraizado en la necesidad de que la ciencia analiza los datos con el fin de observar procesos en tiempo real y luego predecir que va a suceder en un tiempo relativamente corto. Este paradigma es conocido hoy en día como “eScience” y está controlado por el concepto de “analytics” que busca entender acciones y respuestas de sistemas actuales con el fin de predecir respuestas a futuro. El caso más simple de esto es la bolsa de valores en donde analistas estudian tendencias para decidir si se compra o vende algo.

En el mundo del monitoreo ambiental, el cuarto paradigma de la ciencia se observa con el desarrollo de instrumentos que tienen mayor frecuencia de observación, tales como los sistemas de medición de flujos turbulentos asociados con el estudio del secuestro de carbono. Estos sistemas miden flujos turbulentos con frecuencias de 20 Hz (20 medidas por segundo) o bien algunos sistemas de temperatura y humedad relativa que están midiendo información cada 2 Hz.



El problema fundamental es que el nivel de información producido ya no puede ser analizado utilizando programas de computación como Excel, Matlab o Sigmaplot. Tecnologías más poderosas en términos de procesamiento en línea que utilicen la nube y la neblina (interacción entre la nube y el ordenador) son necesarios.

Uno de los sistemas emergentes más interesantes dentro del marco del cuarto paradigma de la ciencia aplicado al monitoreo ambiental es lo que se llama redes inalámbricas de monitoreo ambiental conocido por sus siglas en inglés como *wireless sensor networks* (WSN). Las WSN representan tres niveles de desarrollo científico: 1) sensores y su conectividad a sistemas inteligentes (denominado aquí Sensor), 2) desarrollo de sistemas de recolección de información (denominado aquí como nodo), y 3) transmisión de información de sistema a sistema hasta que se llega a un distribuidor (denominado aquí agregador), el cual a su vez manda esta información a una estación base en donde la información se envía a una plataforma de “analytics”. La **Figura 1** presenta el concepto básico de cómo sensores, nodos y agregadores se combinan para cubrir grandes áreas geográficas y su envío de información a la plataforma de análisis de datos definida como Enviro-Net.

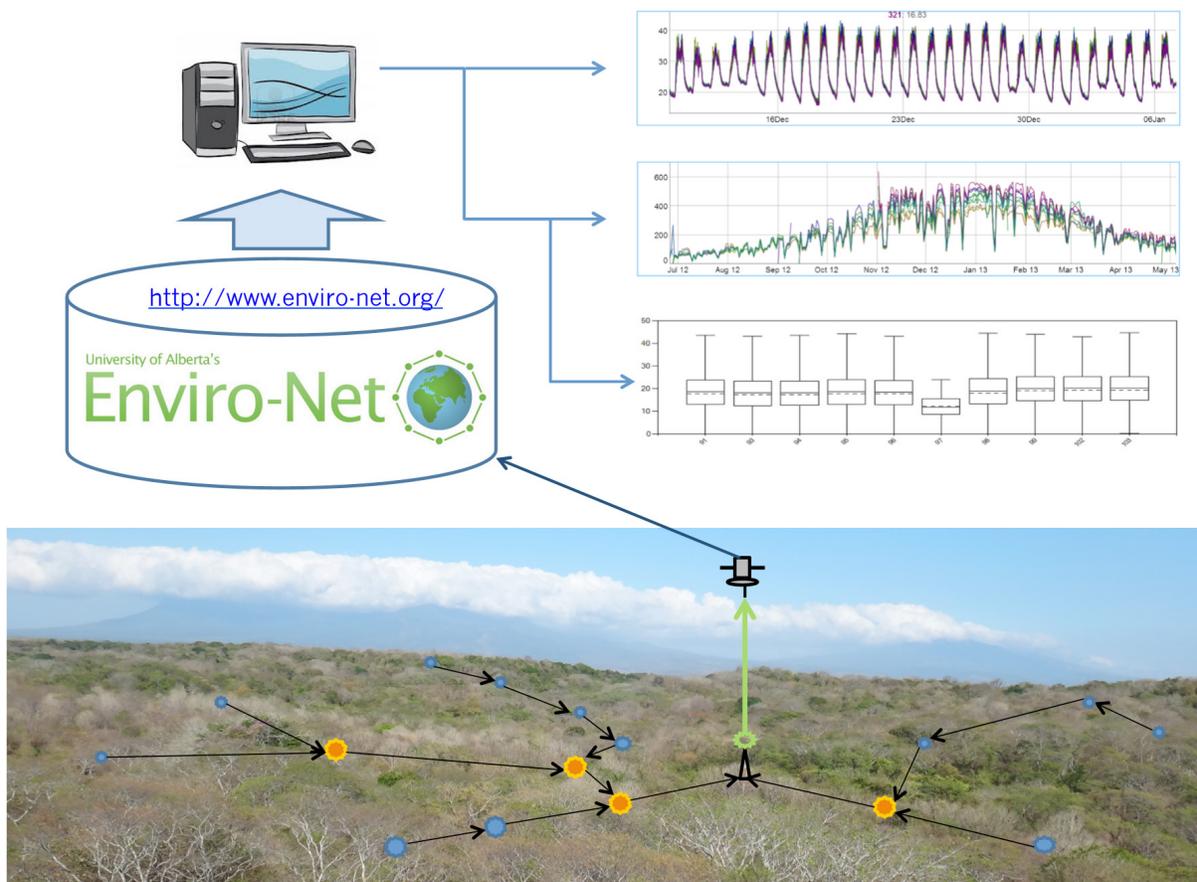


Figura 1. Concepto básico de cómo sensores, nodos y agregadores se combinan para cubrir grandes áreas geográficas y su envío de información a una plataforma de análisis de datos como Enviro-Net.



El proceso de desarrollo de sistemas inteligentes para el monitoreo ambiental requiere de la integración de cinco procesos básicos, todos en secuencia: diseño de sensor, prueba y control de calidad del sensor, instalación del sensor en campo, desarrollo de protocolos de comunicación, análisis de datos en tiempo real, y comercialización de la tecnología (**Figura 2**). Cada uno de estos mismos es complicado por sí solo, quizás el más difícil es el aspecto de comercialización, dado que en muchos casos seguimos apegados a otro paradigma que no es científico; pero sí operacional.

El paradigma operacional actual en que vivimos involucra ir al campo, recolectar la información, llevarla a una oficina o laboratorio, y ahí esperar que sea procesada por alguien. Esto nos lleva al proceso de detectar muchos meses después que “algo pasó” o que “una tendencia comenzó a darse hace algún tiempo”. Este proceso se denomina como el *paradigma de descubrimiento posterior de datos* o en inglés “*batch paradigm*”. Este paradigma restringe significativamente procesos de comercialización de redes de monitoreo inalámbricas, ya que el público usuario o institución no tiene la capacidad instalada o bien el desarrollo tecnológico para procesar y actuar con información en tiempo real. En este sentido, y como explicamos con respecto a la evolución de *eScience*, un nuevo paradigma operacional está emergiendo con los actuales procesos de comercialización. Este paradigma es definido como un *paradigma de baja latencia* o en inglés “*low latency paradigm*”. Este nuevo paradigma está asociado con el procesamiento de datos en movimiento o en tiempo real, esto significa que antes de que un dato sea almacenado, este se integra y se analiza; en otras palabras, en lugar de almacenar datos, almacenamos conocimiento. Es decir, pasamos del concepto de que “algo pasó” a “está pasando”.

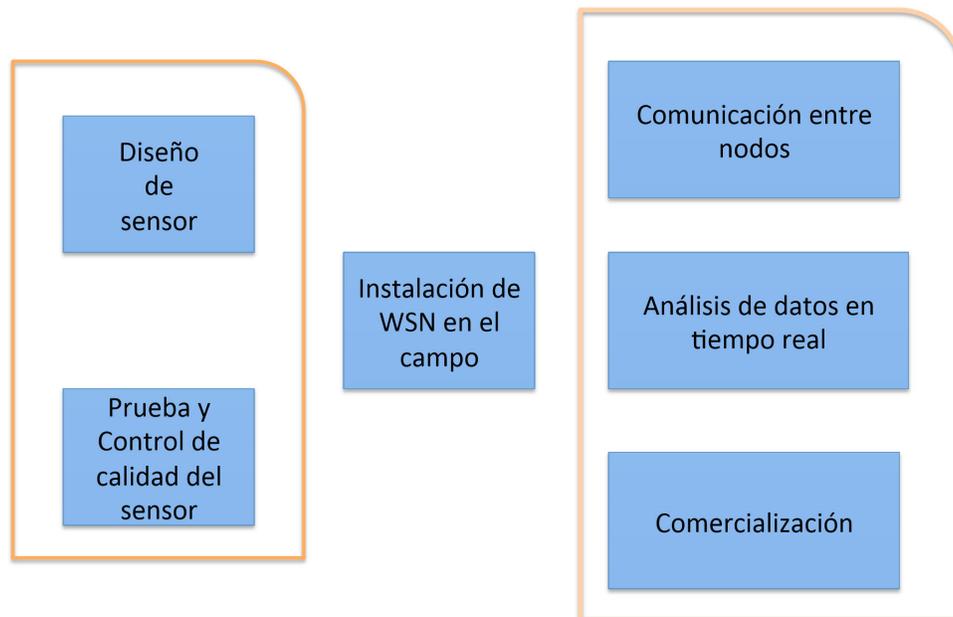


Figura 2. Esquema de integración de procesos básicos en el desarrollo de sistemas inteligentes para el monitoreo ambiental.



Dentro de este concepto de cambios de paradigmas tanto científicos como operacionales, hay un elemento unificador: manejo de la carga energética. En cierta medida, la evaluación del éxito en el desarrollo del vínculo entre sensor-nodo-agregador solo puede ser si se considera la operación de este mismo con niveles de consumo de energía mínimos, dado que su costo operativo puede ser imposible si se tienen que estar cambiando baterías constantemente. De tal forma, el desarrollo clave no solo está en la interacción de sistemas sensor-nodo-agregador que sean eficientes, sino también en el desarrollo de sistemas que sean inteligentes dentro del concepto de manejo energético. Los sistemas actuales más modernos de WSN no solamente incluyen celdas solares sino también pequeños programas de inteligencia artificial que ayudan al nodo y al agregador a manejar su energía o bien definir cuándo y cómo se colecta información. Por ejemplo, dos nodos pueden estar midiendo la misma temperatura, aunque esto no sea necesario, de ahí que programas inteligentes le pueden indicar a un nodo que se apague o bien se mantenga a la expectativa de un cambio por encima de un cierto nivel, y luego se envía un mensaje para “despertarlo” y continuar con el monitoreo. Estos sistemas, que utilizan inteligencia artificial, también son usados para definir cuáles son las mejores rutas para enviar preguntas a un nodo específico a lo largo de una red. Esta optimización de ruta es fundamental para el ahorro de energía en la red inalámbrica.

Otro aspecto fundamental es cómo implementamos estos sistemas de monitoreo inalámbricos en el campo. Es importante indicar primero que estos sistemas no están diseñados para sustituir sistemas de monitoreo meteorológicos como aquellos manejados por instituciones en nuestros países. Las redes de sistemas de monitoreo inalámbrico son diseñadas específicamente para satisfacer las necesidades operativas de sitios claves en redes nacionales, por ejemplo, en sitios donde se estudia el impacto de cambio climático en el secuestro de carbono. Estos sitios, en general, requieren de un alto nivel de información ambiental adquirida a altas frecuencias y con un alto nivel de distribución espacial que permita cubrir grandes áreas. En la **Figura 3** se presenta un ejemplo de tal sistema y cómo se encuentra instalado en el *super sitio de monitoreo ambiental* del Parque Nacional de Santa Rosa, Costa Rica, América Central. Este super sitio de monitoreo ambiental permite observaciones en tres sitios diferentes con respecto al secuestro de carbono en tres estados de sucesión del bosque seco tropical. Ahí las WSN instaladas permiten obtener información en variables tales como humedad del suelo, temperatura y humedad del aire (dentro del bosque), y la fracción de la radiación fotosintética (FPAR en inglés) que se utiliza por las plantas para crecer y secuestrar carbono. Estas variables se ligan después en forma integrada para estimar cuánto carbono se pierde o se gana año con año y así tener una idea vía modelaje matemático, como los bosques secos de las Américas podrían estar respondiendo al cambio climático.

La **Figura 4** muestra, por ejemplo, cómo el bosque seco en la estación biológica Chamela, Jalisco, México, reaccionó en términos de fenología a diferentes efectos de sequía para los años 2008, 2009 y 2010. En esta se puede observar que, en años con sequía, la fenología del bosque seco comienza hasta 30 días después de un año normal. Este tipo de observación, con un alto nivel de temporalidad no puede ser observado hasta el momento con ningún sistema de observación terrestre, dado que la frecuencia de estos sistemas es de proveer información cada 16 días, mientras que la WSN provee información cada 15 minutos. Definitivamente, los WSN llegan a complementar información de satélite y ambiental que no teníamos hasta al día de hoy.



Figura 3. Sistema inalámbrico del super sitio de monitoreo ambiental del Parque Nacional de Santa Rosa, Costa Rica, América Central.

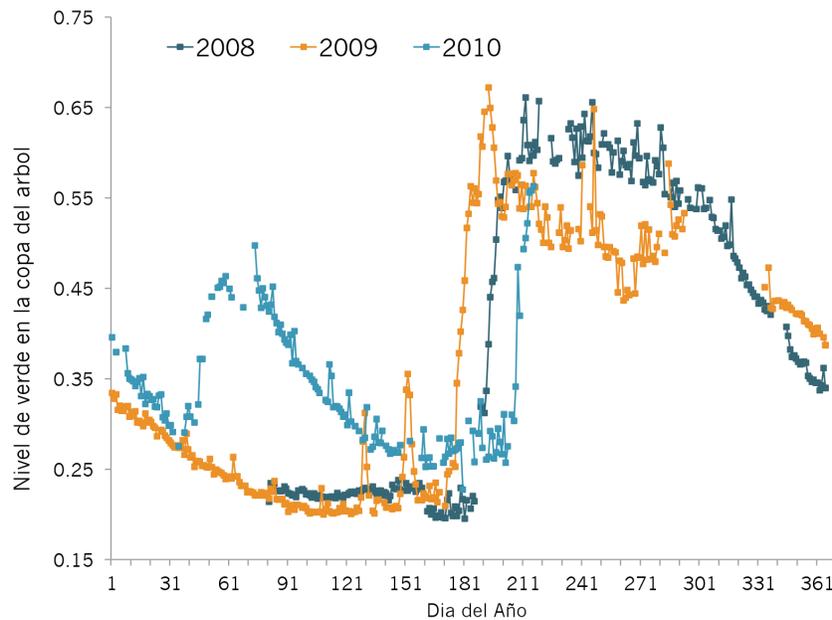


Figura 4. Ejemplo de cómo el bosque seco en la estación biológica Chamela, Jalisco, México, reaccionó en términos de fenología a diferentes efectos de sequía para los años 2008, 2009 y 2010.



Es difícil decir dónde y cómo se podrá llegar con el uso de la tecnología de WSN, lo que sí es claro es que estamos en frente de dos cambios de paradigmas: uno científico y otro operacional; y que estos cambios van mano a mano y representan tanto retos como oportunidades para la académica como para el mundo de los negocios. Por tanto, es importante comenzar a no ver estos mundos de manera separada, ya que, de acuerdo con las tendencias actuales de uso y comercialización de información científica, proveer información ambiental en tiempo real es y será cada vez más necesario.