

Revisión

Aprovechamiento de las tecnologías convergentes para el monitoreo de la contaminación ambiental adoptadas por el sector empresarial

Taking advantage of converging technologies for monitoring environmental pollution adopted by the business sector

<https://doi.org/10.52808/bmsa.8e7.632.005>

Juan David Cruz Negrete^{1,*}

<http://orcid.org/0000-0002-8390-7737>

Recibido: 11/12/2022

Aceptado: 21/03/2023

RESUMEN

Este artículo pretende describir cómo algunas tecnologías convergentes contribuyen en dinámicas de caracterización, monitoreo y control de contaminación en aire, suelo, y agua; asimismo, se busca brindar luces sobre retos y oportunidades desde el sector empresarial respecto a la adopción de esta tecnología en sus operaciones. Se realizó la revisión bibliográfica sobre las categorías mencionadas, en un primer momento se ilustran generalidades sobre tecnologías convergentes y monitoreo de la contaminación; en segundo lugar, se exponen casos prácticos sobre cómo se han implementado algunas tecnologías convergentes para el monitoreo, control y caracterización de la contaminación; y en un tercer momento se ilustran cuatro frentes respecto a dinámicas relacionadas con la transformación digital de las empresas. Permitiendo concluir que el uso de tecnologías convergentes mejora la caracterización y monitoreo de contaminantes, reducen costos en procesos relacionados con contaminación, asimismo, la sinergia entre tecnologías convergentes y control de contaminantes apoyaría en la creación de políticas públicas respecto a la contaminación ambiental, promoviendo así el mejoramiento de la salud pública y protección sanitaria. Con relación a la adopción empresarial de las tecnologías convergentes, podemos resaltar cuatro subtemas claves: Tecnologías convergentes y su orientación social y ambiental, beneficios de las tecnologías convergentes en las industrias, habilidades de la fuerza laboral, preparación y adopción empresarial de las tecnologías convergentes.

Palabras claves: Adopción tecnológica, Contaminación ambiental, Industria 4.0, Sostenibilidad.

ABSTRACT

This article intends to describe how some convergent technologies contribute to characterization, monitoring, and control of air, soil, and water pollution dynamics; Likewise, it seeks to shed light on challenges and opportunities from the business sector regarding the adoption of converging technologies in their operations. The bibliographical review on the mentioned categories was carried out, at first, generalities on converging technologies and pollution monitoring are illustrated; secondly, practical cases are exposed on how some converging technologies have been implemented for the monitoring, control and characterization of contamination; and in a third moment, four fronts are illustrated regarding dynamics related to the digital transformation of companies. Allowing conclusions such as that the use of converging technologies improves the characterization and monitoring of contaminants, these technologies reduce costs in said processes related to contamination, likewise, the synergy between converging technologies and control of contaminants would support the creation of public policy regarding environmental contamination, thus promoting the improvement of public health and sanitary protection; Regarding the business adoption of converging technologies front, four key sub-themes stand out: Converging Technologies and their social and environmental orientation, Benefits of converging technologies in industries, Workforce skills, Readiness and business adoption of Converging Technologies.

Keywords: Technology adoption, Environmental pollution, Industry 4.0, Sustainability.

¹Universidad del Magdalena, Colombia.

Autor de correspondencia: jcruzn@unimagdalena.edu.co

Introducción

Este artículo se desarrolla desde dos secciones, la primera hace una aproximación general a las Tecnologías Convergentes con enfoque hacia el desarrollo sostenible y su uso para la caracterización, control y monitoreo de contaminantes; y la segunda parte se enfoca en retos y oportunidades del sector empresarial para la debida adopción de dichas tecnologías. Ahora bien, estas agrupan las Tecnologías 4.0, 5.0, etc., compuestas por herramientas digitales como Big Data, Blockchain, Internet de las Cosas (IoT), Realidad Aumentada y Realidad Virtual (AR/VR), entre otras; son herramientas que en diversos frentes se están implementando con el ánimo de mejorar procesos, así como en este estudio se enfocarán: para monitorear contaminantes, y posibilidades en el uso empresarial.

En este estudio se ilustrarán casos concretos en los cuales las tecnologías convergentes contribuyen a procesos de caracterización, monitoreo y control de contaminación ambiental; esto con el fin de determinar características de interrelación entre ambas categorías, la sinergia entre ellas, así como analizar si dicho relacionamiento es beneficioso o plantea retos para ambos espectros. En este sentido, es importante siempre idear posibles soluciones que puedan capitalizar los recursos existentes como capital humano y tecnológico, que sean escalables y alcanzables (Chui & Ko, 2020), de esta manera, se promueve el desarrollo de capacidades para el fortalecimiento de la protección de condiciones ambientales favorables para la sociedad, controlar y monitorear contaminantes, y promover la salud ambiental y la protección sanitaria de las comunidades.



Este documento abarca distintas formas de análisis para la contaminación ambiental, pues se aborda desde estudios de agua, suelo, y aire. Asimismo, las tecnologías convergentes son desarrolladas con ejemplos de aplicación de imágenes y sensores a tiempo real, plataformas tecnológicas aplicadas, Internet de las Cosas (IoT en sus siglas en inglés), y Deep Learning/Machine Learning, entre otras. Por otra parte, se ilustra el segundo gran tema de este estudio: Tecnologías Convergentes y su relación con la adopción en las empresas, temática que se describe a través de cuatro aristas: Tecnologías convergentes y su orientación social y ambiental, Beneficios de las tecnologías en las industrias, Habilidades de la fuerza laboral hacia las Tecnologías convergentes, Preparación y adopción empresarial de las Tecnologías Convergentes.

Las empresas están llamadas a promover procesos de monitoreo y caracterización de contaminación, esto con objetivos del bienestar y salud ambiental de la comunidad en la que operan, asimismo, pensando en sus empleados y colaboradores; para ejemplificar, el estudio de (Efobi *et al.*, 2019) indica que las políticas de protección ambiental dentro de las pequeñas empresas, son bajas en la práctica en países como Nigeria y Gana, ilustrando que mientras las pequeñas empresas en Nigeria orientan sus políticas al monitoreo de desechos sólidos y líquidos, en Ghana, este tipo de empresas enfocan sus ejercicios de control de contaminación en desechos en estados gaseosos y líquidos; es importante -resalta el estudio- que se considere el nivel educativo de la gerencia de las pequeñas y medianas empresas, esto es determinante en la postura empresarial hacia la gestión de protección y salud ambiental, que consecuentemente tributa positivamente en mejoramiento de procesos sanitarios en las comunidades; asimismo, es prioritario que se promueva la implementación y el compromiso del empresariado hacia la protección ambiental, lo cual es beneficioso para la misma empresa, las comunidades, y los diversos colaboradores.

Por otra parte, resulta interesante el análisis de cómo las tecnologías pueden en sí contribuir o no a la contaminación ambiental; estudios como el de (Cheng *et al.*, 2019) determinan que hay correlación entre las tecnologías de la información y la contaminación en las ciudades chinas, esto debido a la indebida utilización de dichas tecnologías para procesos sociales y económicos, lo que contribuye al incremento de contaminación ambiental en distintos frentes como a través de propagación de hollín y polvo, dióxido de azufre y aguas residuales, no gestionados de manera correcta, lo que deteriora condiciones empresariales y sanitarias. Y la relación entre tecnologías convergentes orientadas por ejemplo al impulso de la innovación en tecnologías limpias/verdes y los impuestos empresariales por contaminación o compensación ambiental, ha de ser estudiada cuidadosamente; por ejemplo, para el caso chino, se estima que la ejecución de impuestos por contaminación de cuerpos de agua y el aire, es insuficiente para compensar dichos costos de contaminación ambiental; el ajuste de dichos niveles de impuestos ambientales a las industrias debe realizarse, con el fin de evitar sobrestimación en proyectos de eficiencia en innovación ‘limpia’ industrial (Wang & Yu, 2021), e impulsar una protección más férrea por mejores condiciones de salud ambiental, impulso empresarial y fortalecimiento sanitario.

Este escrito busca entonces, dar luces sobre cómo las tecnologías convergentes pueden intervenir en procesos de control, monitoreo y caracterización de contaminación ambiental en diversos frentes (agua, aire, y suelo); cuál debe ser la reorientación empresarial en la implementación de estas tecnologías, para no acogerlas desde un enfoque exclusivamente de carácter operacional y corporativo, sino desde una perspectiva sostenible integral; todo esto, con el objetivo de establecer cómo estos ajustes posibilitarían la protección dinámicas de salud ambiental, mejores condiciones ecológicas, y mejoramientos de aspectos sanitarios en las comunidades y las partes interesadas de las empresas.

Tecnologías convergentes para caracterización de contaminantes

Casos de contaminación en diversos ambientes

Se ilustrará a continuación seis casos y publicaciones que brindan información sobre cómo realizar monitoreo, caracterización, y control de contaminación en tres ambientes: Aire, Agua y Suelo. En ese orden se presentan dos intenciones: 1. Permitir al sector empresarial detecte herramientas, métodos y tácticas sobre cómo hacer gestión de contaminantes y/o implementar procesos de medición de impacto ecológico en sus operaciones y 2. Ilustrar sobre fenómenos de contaminación en diversos ambientes, con el fin de que las autoridades generen políticas públicas para una mayor rigurosidad en el control y caracterización de dichos fenómenos.

Se demanda un mayor impulso en el aprovechamiento de diversas herramientas, como las tecnologías convergentes, a fin apoyar iniciativas de control y monitoreo de contaminación, para la toma efectiva de medidas y así mitigar dichos fenómenos. Por ejemplo, el estudio de (Jung *et al.*, 2023) utilizó dispositivos de captura de información 24 horas en niños de Nueva York, donde se pudo conocer aspectos de medias de contaminación, picos de duración de contaminación, picos de intensidad de contaminación, picos de variabilidad de contaminación a la que están expuestas los niños del estudio, concluyendo que: el pico de duración de exposición a contaminación está en los hogares, mientras que los picos de intensidad y variabilidad de contaminación se presenta en áreas comunes/afueras. Este tipo de estudios y el uso de tecnologías convergentes (como sensores con información a tiempo real), apoya la creación de políticas que incentivan la limitación de exposición de los niños en áreas y horarios con mayor contaminación, así como promueven iniciativas como la del uso de vehículos eléctricos en las ciudades.

De igual forma, el estudio de (Heintzelman *et al.*, 2023) logró determinar que, con el uso de dispositivos electrónicos, sensores a tiempo real conocidos como Purple Air (PA), ubicado en 25 sitios de Indianápolis, Estados Unidos, se determinó que al elevar en 1% los dispositivos PA hacia las copas de los árboles, se disminuye en un ~0,12

g/m^3 en $\text{PM}_{2.5}$; mientras que al elevar la proximidad de dichos sensores a áreas de ‘industria pesada’, los niveles de contaminación se incrementan en $0,07 \text{ g}/\text{m}^3$ en $\text{PM}_{2.5}$. Estos resultados refuerzan la relevancia de este tipo de sensores a tiempo real, y el uso de las tecnologías convergentes a fin de apoyar esfuerzos para la caracterización y control de contaminación.

Aire

Se inicia este apartado con un estudio orientado en la toxicidad del Inventario Nacional de Emisiones Contaminantes (NPRI -siglas en inglés-) en Nueva Escocia, Canadá; el estudio utilizó el método de Evaluación de Impacto Ambiental USEtox®, se logró determinar que es relevante diferenciar cantidades de emisiones de sustancias tóxicas, con el grado de toxicidad de ellas; pues por ejemplo, el cobre tiene mayor potencial ecotóxico en emisiones al agua, pero solo obtuvo $<1\%$ de emisiones (cantidad) en los datos del estudio (Taylor *et al.*, 2020).

Se complementa con el estudio de (Palacios Espinoza y Espinoza Molina, 2014), que se concentró en caracterización y monitoreo de contaminación del aire en Cuenca (Ecuador), a través de la instalación de 18 puntos de monitoreo en la ciudad, y obteniendo resultados respecto a que hay valores superiores de PM_{10} (Material Particulado) superiores a lo sugerido por la guía de la OMS, que es de $20 \text{ ug}/\text{m}^3$; esto genera enfermedades como intoxicación aguda, agravamiento de asma, enfermedades respiratorias agudas, irritación vial respiratoria, cefalea, entre otros.

Adicionalmente, el uso de las tecnologías convergentes o emergentes, posibilitan ampliamente la caracterización de contaminantes en el aire en dos frentes: reduce el esfuerzo de tareas rutinarias en redes de monitoreo, al tiempo que permiten el acercamiento del talento humano con comunidades monitoreadas (dejando aspectos operativos, a las tecnologías en sí); sin embargo, aún es necesario impulsar mejoras en otros dos frentes: mejorar el control de calidad y cumplimiento de la fuente (punto) de monitoreo, así como mejorar las estrategias de monitoreo de exposición personal (Morawska *et al.*, 2018). Dicho estudio señala que las tecnologías convergentes usadas para el monitoreo de contaminación aérea, aún no están suficientemente desarrolladas para monitorear partículas ultrafinas (más pequeñas incluso que las $\text{PM}_{2.5}$).

Por lo antes expuesto, se insta a desarrollar infraestructura en favor del monitoreo de contaminantes aéreos, por ejemplo, a través del diseño e implementación de torres industriales cubiertas modernas estructuras de metal, con el fin de absorber compuestos orgánicos volátiles; este tipo de iniciativas invitan a ingenieros químicos y otras profesiones a involucrarse en procesos de control de emisiones de contaminantes en plantas industriales (Schnelle *et al.*, 2018) en pro de monitoreo de contaminantes aéreos, y así favorecer condiciones de salud ambiental.

Hay iniciativas exitosas sobre cómo el uso de dispositivos tecnológicos apoya el entendimiento y la magnitud de fenómenos de contaminación, por ejemplo, entregar datos sobre el estado de contaminación el aire, a través de dispositivos electrónicos, en tiempo real, donde entre otros aspectos, se ilustre de forma entendible la concentración de contaminación por zonas, partículas contaminantes causantes de dicha contaminación, que conduzca a impulsar la conciencia, toma de acciones correctivas y liderazgo para la aplicación de estrategias comunitarias a fin de reducir dichos focos de contaminación (Ryan *et al.*, 2023). Otro ejemplo sobre uso de dispositivos tecnológicos, como lo son dispositivos portátiles -controlados por sensores de purificación de aire (PAC por sus siglas en inglés), apoyan la reducción de contaminación de ambientes cerrados, remueve la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ en un 47%, este tipo de dispositivos electrónicos, operados con apoyo tecnológico, detectan episodios de contaminación en espacios cerrados que difícilmente podrían ser detectados por los humanos en sí (M. Wang *et al.*, 2023).

De esta forma, se ilustraron ejemplos y dinámicas en las cuales las tecnologías convergentes apoyan procesos de caracterización, monitoreo y/o control de contaminación en aire, lo cual, consecuentemente impulsaría la gestación de mejores prácticas que favorecerían condiciones de salud ambiental, y eventualmente generarían mejores resultados sanitarios en las comunidades en las que se implementen.

Agua

La contaminación se incorpora en diversas formas en distintos cuerpos de agua, se muestra inicialmente una publicación que caracterizó contaminación de microplásticos (Partículas definidas entre 1mm-5mm diámetros) por medio de análisis de ingesta de invertebrados bentónicos en aguas profundas en Rockall Trough, Océano Atlántico Norte; el estudio obtuvo las muestras a más de 2.200 metros de profundidad; los resultados permitieron detectar 78 potenciales microplásticos (17 sintéticos, 28 celulosa, 33 espectro no claro) observados en tres formas: Originales, Ingeridos por invertebrados bentónicos, y en aguas profundas (Courtene-Jones *et al.*, 2017).

Otro estudio relacionado con la caracterización y monitoreo de contaminación, donde se analizó metales tóxicos emitidos por una mina abandonada en Yaoposhan (Provincia de Guangdong, China), y donde se implementó métodos diversos de monitoreo como muestreo, Índice de Geoacumulación (Igeo), medición de contenido de metales tóxicos, evaluación de riesgo a la salud pública, y análisis de arsénicos. Tomaron diversas muestras en tres poblaciones referentes, cercanas a la mina abandonada, la investigación arrojó resultados sobre una clara contaminación en aguas y suelo de las áreas estudiadas, ocasionando afectaciones a cultivos, suelos, etc. Principalmente por sustancias como (Cd) Cadmio y (Pd) Paladio (Sun *et al.*, 2020). Las dos investigaciones ilustradas permiten detectar métodos distintos que favorecen la

caracterización, monitoreo de contaminantes en cuerpos de agua, cuyos resultados servirían de base para que estos métodos puedan ser aplicados, de manera responsables por gestores de políticas públicas, a fin de apoyar, controlar, reducir y mitigar dichas formas de contaminación.

Hay algunas tecnologías (Drones y robots, FRED -Robot flotante para eliminación de escombros-, Lint LUV-R, Dispositivo GPS sin nombre en redes fantasma, entre otros) utilizados en el proyecto 'Inventario de tecnología de prevención y recolección de contaminación plástica' (Schmaltz *et al.*, 2020) que apoyan procesos de monitoreo y control de contaminación en cuerpos de aguas, principalmente enfocados a micro plásticos, macro plásticos, y ambos tipos de plásticos; en dicha publicación se hace un llamado a gestores de políticas públicas a crear incentivos para expandir e implementar más tecnologías en áreas críticas de contaminación marina, asimismo en examinar qué otras tecnologías (de bajo costo, con algún otro tipo de adaptación...) pueden implementarse en otros contextos; todo esto con el objetivo de mejorar procesos de control de contaminación en cuerpos de agua, y así promover buenas condiciones de vida marina, para las comunidades humanas que se benefician directa e indirectamente de ellos.

Adicionalmente, tecnologías en inteligencia artificial como el algoritmo LSTM (memoria a largo y corto plazo) brindan una alta precisión de predicción y rastreó las principales fuentes industriales puntuales en contaminantes que afectarán la calidad del agua incluso en el futuro (P. Wang *et al.*, 2019), este tipo de casos y ejercicios de aplicación de tecnologías convergentes, reafirman las formas en las cuales, las tecnologías son aliadas en pro de la protección ambiental, y así, apostarle al mejoramiento de condiciones de salud ambiental de manera amplia.

El Acuerdo de París (Naciones Unidas, 2015) reconoce la importancia de la gestión del agua y establece compromisos para fortalecer la capacidad de adaptación de las comunidades vulnerables, fortalecer la cooperación internacional en la gestión del agua y la adaptación al cambio climático. También dicta compromisos para tomar medidas, proteger la salud ambiental y prevenir los efectos negativos del cambio climático en la salud. De igual manera, fortalecer la capacidad de los sistemas de salud para hacer frente a los efectos del cambio climático y promover la colaboración internacional en materia de investigación, desarrollo de tecnologías y prácticas sanitarias.

En esta sección, igualmente se ilustraron algunos casos en los cuales las tecnologías o postulados internacionalmente aceptados (como lo es el Acuerdo de París), apoyan iniciativas en las cuales se promueve la protección de cuerpos de agua, así como se insta a disminuir y/o controlar contaminantes con miras al mejoramiento de condiciones de salud ambiental, en beneficio de la sociedad en general.

Suelo

El delta del Río Níger el segundo más grande del mundo, es rico en biodiversidad (especies de flora y fauna), representa uno de los diez humedales marinos más importantes del planeta y posee el manglar más grande del mundo (Chukwuka *et al.*, 2018), este estudio concluyó que los aproximados 9000 pozos de producción petroleros en el delta del río Níger generan serias consecuencias negativas en el ambiente, en las propiedades del suelo, plantas y procesos agrícolas. Así como, compilaciones del suelo, fauna terrestre, germinación, crecimiento y desarrollo de las plantas. También demuestra la necesidad de realizar agudos y constantes monitoreos a dinámicas económicas extractivitas y sus implicaciones en contaminación ecológica y su repercusión en la sociedad.

De igual manera, una investigación que caracterizaba y monitoreaba la contaminación por mercurio (Hg) en San Martín de Loba en Bolívar, a través del 202 muestras de 300g en distintos espacios de suelo del municipio, concluyó que el 93% de los puntos muestrales arrojaron resultados superiores a lo registrado en países como: Estados Unidos, China, Eslovenia, Alemania, Canadá (Rocha-Román *et al.*, 2018); esta publicación indicó también que al usar el método de índice de geoacumulación (Igeo), el 87% de las muestras utilizadas, se clasifican como fuertemente contaminadas.

Estos ejemplos ilustrados, permiten vislumbrar casos en los que las tecnologías son herramientas de gran utilidad para el monitoreo y caracterización de contaminantes en suelo; al impulsar el uso de tecnologías convergentes para este fin, al mismo tiempo se promueve la protección al ambiente en general, evitando riesgos de salud ambiental.

Casos de aplicación de tecnologías convergentes para caracterización, monitoreo y control de contaminación

Es esta sección se describirán investigaciones relacionadas con la aplicación de algunas Tecnologías convergentes como plataformas inteligentes, IoT, Machine Learning-Deep Learning, Imágenes y sensores en tiempo real, para la caracterización, monitoreo y control de contaminación; intentando así ilustrar cómo estas tecnologías son un vehículo funcional que aportaría en una adecuada gestión para abordar fenómenos de contaminación.

Plataformas tecnológicas aplicadas

Es más frecuente encontrar plantas superficiales para medir contaminación de aguas, sin embargo, las instalaciones de plantas subterráneas con el fin de monitorear contaminación en aguas a dicho nivel son vitales, esto debido a presencia de nitratos (NO₃⁻) ocasionado por uso intensivo de fertilizantes y otras fuentes antropogénicas; el estudio de (Abascal *et al.*, 2022) analizó datos a tiempo real de 292 sitios de aguas subterráneas por continente (146 horas de trabajos reportados), y se concluyó que la presencia de nitratos en aguas subterráneas está en constante crecimiento, hay zonas

que presentan valores superiores a las normas de la OMS (50 ppm), hay inadecuadas prácticas de aguas residuales, tratamiento errado de fosas sépticas, uso abusivo de fertilizantes y pesticidas en cultivos, que contribuyen a empeorar esta situación contaminante.

Otra contribución de plataformas inteligentes al monitoreo y caracterización de contaminantes, es el caso de la plataforma tecnológica de bajo costo ‘Arduino’ (gestada bajo la metodología Work Breakdown Structure; que se permitió comparar tres tecnologías de adquisiciones de datos, cuatro sistemas de comunicación inalámbrico que complementan un nodo y se interpretó por una red de sensores inalámbricos), que mostró resultados fiables y similares a la estación meteorológica Vintage Pro2 -estación tradicional, de mayor costo- (Tang *et al.*, 2022); esta conclusión representa insumos fiables para el monitoreo ambiental, brinda luces sobre cómo tecnologías asequibles, de bajo costo y fácil réplica, puede ayudar a comunidades, regiones, gobiernos y empresas para realizar control, monitoreo y caracterización de contaminantes en el entorno.

Finalmente, se ilustra un estudio en China, que analizó con plataformas de análisis de datos a tiempo real sobre contaminación en ese país, con el ánimo de detectar si las regulaciones ambientales solidificadas en 2015 estaban generando dinámicas esperadas; las horas de monitoreo con plataformas de datos a tiempo real, que analizaba contaminantes atmosféricos como PM, SO₂, NO_x y CO₂, entre 2014 y 2018, arrojó como resultado que hay algunas disminuciones de emisiones contaminantes, pero esto no ocurre en el mismo sentido para el caso de las emisiones de CO₂ (Piñeres-Espitia y Mejía-Neira, 2013).

El desarrollo de esta sección permite detectar cómo las tecnologías de monitoreo ambiental, como las plantas subterráneas y plataformas inteligentes de bajo costo, son herramientas vitales para el control y caracterización de contaminantes en el entorno. Estas tecnologías permiten detectar y medir la presencia de contaminantes, como los nitratos, que pueden afectar la salud ambiental y la protección sanitaria. Además, el análisis de datos en tiempo real permite identificar patrones y tendencias en las emisiones contaminantes, lo que podría ayudar a los gobiernos y las empresas a tomar medidas para reducir la contaminación y mejorar la salud ambiental.

Machine learning y deep learning para el monitoreo y control de contaminación

El uso de tecnologías como Machine Learning y Deep Learning ha contribuido a la caracterización y monitoreo de contaminación en diversos casos; es así como destaca el estudio que buscó analizar pronósticos de contaminación del aire, usando el método de algoritmo genético (GA), así como en la memoria a corto plazo, Algoritmo de aprendizaje profundo (LSTM), táctica que permitió determinar que las predicciones de la contaminación del aire basadas en el principio metaheurístico dan una mejor predicción de resultados, que los que funcionan para determinar los parámetros manualmente (Drewil y Al-Bahadili, 2022), brindando así evidencia adicional a la literatura, sobre la importancia de la implementación de tecnologías para el monitoreo ambiental, sobre la persistencia de realizar procesos de carácter manual.

El ejemplo del uso de Machine Learning con miras a la optimización de procesos de control ambiental, está relacionado con el estudio que implementó el método in vitro e in vivo Modelos de exposición a PM_{2.5} (concentrado en hsa_circ_0005045), que arrojó conclusiones como que la reducción de emisiones ambientales de PM_{2.5} proporciona un enfoque específico para proteger a los pacientes con EPOC no fumadores contra la exacerbación de enfermedades relacionadas con la contaminación del aire (Meng *et al.*, 2022).

Con el desarrollo de estos ejemplos, se comprende que el uso de tecnologías como Machine Learning y Deep Learning en la caracterización y monitoreo de la contaminación del aire, pueden mejorar la precisión en la predicción de los niveles de contaminación y permitir la optimización de procesos de control ambiental. Además, pueden proporcionar información valiosa para proteger a las personas contra las enfermedades relacionadas con la contaminación del aire, como la EPOC. En general, el uso de estas tecnologías puede contribuir a optimizar la salud ambiental y la protección sanitaria al permitir una evaluación más precisa y eficiente de los niveles de contaminación y la implementación de medidas adecuadas para prevenirla o reducirla.

Aplicación de internet de las cosas (IoT) para monitoreo de contaminación

El Internet de las Cosas (IoT) es una herramienta tecnológica utilizada en los procesos de caracterización, control y monitoreo de contaminación. Según estudio de (Arteaga-Quico y Wong-Portillo, 2021), quienes propusieron un framework a bajo costo para el monitoreo de la temperatura a tiempo real aplicando IoT, con el fin de optimizar y ahorrar tiempo para recolección y análisis de estados de cultivos, a través del sensor DS18B20, así como del dispositivo NodeMCU, y su posterior almacenamiento de datos en la nube, para luego poder ser consultado desde cualquier dispositivo y aplicativo web. El estudio determinó que promedios obtenidos de forma manual (0.00776) son menores en comparación de lo obtenido con el uso del framework propuesto (0.01948), lo cual significa que, el framework implementado logró hacer una mayor cantidad de tareas de monitoreo de cultivos, en comparación con la forma manual.

De manera complementaria, otra publicación que implementó tecnología IoT, que tuvo como objetivo rastrear y abordar problemas de salud, relacionados con fenómenos sociales y ambientales. Se implementó el método sensores para recopilar contaminantes en la tierra, datos que se agruparon en un sitio web, alimentado de la red de sensores que recibían

información del monitoreo de toxinas en la tierra, y así la caracterización de las toxinas se tradujera en información accesible para todos, sin costo, esta investigación permitió mejorar la gestión y control de contaminantes por parte del Comité Centralizado de Control de la Contaminación (CPCC) (Rayabharapu *et al.*, 2022).

Al finalizar este segmento, se vislumbra cómo a través de la implementación del Internet de las Cosas (IoT) en la caracterización, control y monitoreo de contaminación, se accede a la recolección y análisis de datos en tiempo real, lo cual permitiría tomar decisiones oportunas para la protección de la salud ambiental y sanitaria. Por ejemplo, el uso de sensores para recopilar contaminantes en la tierra permitió la caracterización de las toxinas y la gestión y control de contaminantes por parte del Comité Centralizado de Control de la Contaminación (CPCC). Asimismo, el monitoreo de la temperatura a tiempo real aplicando IoT, permitió optimizar y ahorrar tiempo en la recolección y análisis de estados de cultivos.

Imágenes y sensores a tiempo real para monitorear la contaminación

Tecnologías emergentes como sensores, imágenes digitales a tiempo real, son otro frente de apoyo para los esfuerzos globales a fin de caracterizar, monitorear y controlar diversas formas de contaminación. El estudio de (O'Regan *et al.*, 2022) analizó espacios verdes urbanos a nivel calle y la contaminación del aire a través de diversas métricas, utilizando conjuntos de datos ambientales derivados de tecnologías de la información y las comunicaciones TIC a escala urbana, algunas herramientas fundamentales para el apoyo, fueron Google Street View y métodos de visión por computadora en alta resolución espacial, se denominó Green View Index (GVI). Esta investigación demostró a través del uso de una red distribuida de sensores de contaminación del aire, que los niveles más altos de espacios verdes urbanos se asociaron con disminuciones en la contaminación del aire por (PM), estos hallazgos apoyarán la planificación y el diseño de futuras ciudades inteligentes, sostenibles y saludables.

Por otra parte, al implementar sensores y sistemas de imágenes a tiempo real en mar, se pueden encontrar de forma rápida y precisa áreas de derrames de petróleo, es así como la investigación de (Pashayev *et al.*, 2018) implementó técnicas basadas en el radar de apertura sintética -SAR- (específicamente satélites como el Sentinel-1A), a través de esto pudieron ser capaces de determinar que el área total de contaminación por la mancha de petróleo de la superficie del agua en el espacio del desastre, fue de 800 kilómetros cuadrados.

Otros ecosistemas representados por los nevados, que, aunque está siendo ampliamente deteriorado por el cambio climático, encuentra en las tecnologías un aliado para la caracterización y monitoreo de su salud y los contaminantes que los afectan. La investigación de (Molano *et al.*, 2022) utilizó imágenes satelitales de Landsat-4 (1987), Landsat-5 (1991, 1997, 2009), Landsat-7 (2000, 2003), Landsat-8 (2014, 2016, 2017), y Sentinel-2 (2019, 2021), permitió clasificar imágenes a través del software PCI Geomatics, y al definir 4 tipos de cobertura: área glaciar, suelo-roca, vegetación y agua; se hallaron conclusiones, estimando que el glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy se extinguirá aproximadamente para el año 2048, debido al ritmo de disminución del área glaciar de dicho sistema montañoso, el cual se ha reducido en un 37,92% con referencia a la primera escena (año 1987).

Se concibe entonces, de los casos ilustrados, que el uso de tecnologías emergentes como sensores, imágenes digitales a tiempo real, tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) pueden ser herramientas poderosas para la protección de la salud ambiental y sanitaria. Estas tecnologías pueden ser utilizadas para monitorear y controlar la contaminación en espacios urbanos y marítimos, identificar áreas de derrames de petróleo y caracterizar la salud de ecosistemas como los nevados. Los avances tecnológicos pueden apoyar la planificación de ciudades inteligentes, sostenibles, saludables, así como en la identificación de riesgos ambientales, la toma de decisiones informadas para su prevención y control.

Tecnologías convergentes desde la perspectiva empresarial

Se describe a forma general, la relación entre las tecnologías convergentes con la adopción y aprovechamiento empresarial, igualmente se ilustrarán cuatro facetas con respecto a la relación entre empresas y tecnologías emergentes y otros casos de otras tecnologías convergentes, algunas distintas a las mencionadas en las secciones anteriores. Con el propósito de ampliar el espectro de herramientas tecnológicas, y fortalecer el argumento que: las tecnologías convergentes al ser usadas con orientación sostenible desde las empresas, favorecen directa o indirectamente, dinámicas de protección de salud ambiental, y mejoran condiciones sanitarias en las comunidades.

La literatura actual suele conectar el tema de las tecnologías convergentes (entre ellas, las Tecnologías 4.0 o Industria 4.0) con aspectos netamente corporativos, sin embargo, la aplicación, el uso y la orientación hacia un impacto sostenible debe impulsarse aún más; los análisis de las tecnologías convergentes deben comprender los frentes de la Triple Línea de Resultados (TBL en sus siglas en inglés), es decir, desde el enfoque social, el ecológico y el económico (Bai *et al.*, 2020). De esta manera se garantiza en gran medida, que el desarrollo tecnológico beneficiará entre otras cosas, la protección del ambiente sano por ende beneficiará a la sociedad en su conjunto.

Si las tecnologías convergentes se utilizan con objetivos prioritariamente sostenibles, se pueden apreciar cómo algunas de dichas herramientas disruptivas impactan de manera más contundente en lo social, ecológico, y económico;

es así como el estudio de (Bai *et al.*, 2020) indica que mientras tecnologías como blockchain, tecnologías móviles tienen un impacto superior en la escena económica; otras como inteligencia artificial, big data y datos en la nube tienen mayor capacidad de impacto en el ámbito ecológico; las herramientas como tecnologías de la nube, análisis big data ofrecen una mejor perspectiva de impacto en lo social. Dicho estudio, ofrece una pequeña visión de cómo las tecnologías bien orientadas ofrecen potencialidades positivas para un ambiente sano, una sociedad saludable y procesos económicos dinámicos.

Por su parte, estudios como el de (Ai *et al.*, 2021) exponen la realidad sobre el efecto de los impuestos por daños ambientales a las empresas; es así como inicialmente, las regulaciones en favor de la protección del ambiente, desestimula inversiones hacia las tecnologías de innovación limpias en las empresas, sin embargo, a largo plazo, las regulaciones claras y que favorecen el ambiente en su conjunto, impulsan más bien las inversiones en dichos desarrollos tecnológicos. Las regulaciones y fortalecimiento estricto de las leyes en materia de compensación empresarial, desarrollo de tecnologías limpias, y protección ambiental empresarial, estimulan el desarrollo de las tecnologías de innovación limpia; por el contrario, el exceso de intermediación gubernamental en las empresas desestimula la eficiencia energética. Es así comprensible, que el panorama ideal es aquel donde los gobiernos desarrollan esquemas legales y regulatorios claros en favor de la sostenibilidad y ambientes sanos, promuevan conceptos de consumo verde, mejoren condiciones de consumo saludable y sostenible, con el fin de dinamizar y fortalecer un mercado limpio, y las empresas que apuestan por el desarrollo de tecnologías verdes, vean compensados dichos esfuerzos; todo esto se reflejaría en mejoramiento de la creación tecnológica, reducción de contaminación ambiental, y mayor eficiencia energética.

Tecnologías convergentes su orientación social y ambiental

Se inicia esta sección con una relación de algunas de las tecnologías convergentes, como lo son Computación en la nube, ciberseguridad, tecnologías RFID, Internet de las Cosas (IoT), Impresión 3D, Big Data y Analítica, Robots autónomos, Máquina a Máquina M2M, Tecnologías móviles, computación cognitiva, entre otras. Es relevante que el debate se centre en cómo la sociedad desarrolla avances de estas tecnologías e identifica impactos positivos y negativos, no solo desde el punto de vista económico, sino social y ambiental (Rozo García, 2020).

Beneficios de las tecnologías convergentes en las industrias

Las empresas pueden obtener diversos beneficios al implementar tecnologías convergentes, como, por ejemplo, se puede ampliar el intercambio de información integrada, aumentar el nivel de servicios basados en datos, desarrollar la realidad virtual y aumentada para capacitar de mejor forma a los empleados (Silva & Rocha, 2020). Las tecnologías emergentes mejoran la eficiencia, garantizan asimismo los derechos humanos en las cadenas de valor (Foro Económico Mundial, 2021), por ejemplo, al usar Blockchain y otras tecnologías, se puede asegurar una responsable cadena de valor. Al adentrarse en proyectos de expansión en complejidad tecnológica y sus usos, se optimizan procesos y se mejoran aquellos destinados a la fabricación, por ejemplo, así pues, embarcarse en el escenario de las tecnologías emergentes se vuelve necesario (Heidrich *et al.*, 2020).

Desde el punto de vista de protección a la salud de la fuerza laboral, y cómo las tecnologías apoyan esta intención, destaca la propagación de aplicaciones móviles desarrolladas en diversos países, impulsados por múltiples gobiernos territoriales, durante la pandemia ocasionada por la COVID-19, con el fin de alertar sobre la enfermedad, brindar información preventiva frente a la pandemia, rastreo de casos y contactos que alertasen sobre posibles contagios, entre otros. (Sínche *et al.*, 2021); este caso es en sí, una ejemplificación de cómo el estado – universidades – empresas, pueden impulsar desarrollo tecnológico con enfoque social, para el beneficio de la población, y evitar impactos más nocivos generados por situaciones adversas como la ocurrida por la pandemia.

Habilidades de la fuerza laboral hacia las tecnologías convergentes

Es indudablemente requerido que los gobiernos, industrias y empresas establezcan un proceso planeado para el aprendizaje y desarrollo de habilidades y competencias en tecnologías emergentes -como las tecnologías 4.0- (World Economic Forum, 2020). El reporte generado por el (Foro Económico Mundial, 2020) establece claramente que la principal herramienta de las empresas para responder a las dinámicas de la pandemia debido a la COVID-19, fue la aceleración digital, asimismo, expone que las tecnologías más relevantes a adoptar en 2025 -según las empresas encuestadas- serán el Cloud Computing, análisis Big Data, e (IoT); en el mismo sentido, reportan que los empleos con mayor demanda serán: científicos de análisis de datos, especialistas en AI y Machine Learning, especialistas en Big Data, entre otros. Y los empleos con menor demanda, serán: secretarios administrativos, contadores y auditores, trabajadores de ensamblajes industriales, administradores de servicios y negocios.

Preparación y adopción empresarial de las tecnologías convergentes

Se inicia esta sección enunciando el CONPES 3975 que establece la Política Nacional para la Transformación Digital e Inteligencia Artificial (Departamento Nacional de Planeación, 2021); asimismo, es interesante traer a la conversación, estudios como el de (Carrillo *et al.*, 2020), que exponen niveles de apropiación de tecnologías emergentes en los empleados y en diversas industrias en México, por ejemplo. Por otra parte, los esfuerzos por prepararse y adoptar

tecnologías convergentes, exigen mediciones y evaluaciones, así es como en el estudio de (Atik & Ünlü, 2019) se enuncian 10 métricas para realizar estas estimaciones, entre las que se encuentran: Empresas que reciben pedidos online, compartir datos e información administrativa entre la cadena de valor, empresas que tienen paquetes de software ERP, entre otras. Luego de estos cuatro pequeños apartados, respecto a la relación de las tecnologías convergentes con el sector empresarial, se indica que la adopción de tecnologías convergentes en las empresas permite mejorar la eficiencia y garantizar los derechos humanos en las cadenas de valor, lo que se traduce en una gestión empresarial responsable y sostenible desde el punto de vista social y ambiental. Además, la implementación de tecnologías móviles y aplicaciones de rastreo y alerta sanitaria, contribuyen a mejorar la salud de la fuerza laboral y la población en general. La preparación y adopción empresarial de las tecnologías convergentes puede favorecer una relación virtuosa entre gestión empresarial, salud ambiental y mejora sanitaria.

Consideraciones finales

Este escrito permite definir cinco grandes hallazgos; el primero hace referencia a que hay evidencias claras sobre cómo la implementación y aplicación de tecnologías convergentes como IoT, Deep Learning/Machine Learning, Imágenes, sensores a tiempo real, y plataformas inteligentes de análisis de datos, contribuyen en la mejora de la caracterización, monitoreo y control de contaminantes sea para agua, suelo y aire. Por otra parte, se observó con los diversos resultados, que la implementación de tecnologías emergentes permite reducir costos en procesos relacionados con caracterización, monitoreo y control de contaminación. Así como la potencial implementación de tecnologías convergentes de bajo costo, el desarrollo y uso masivo de las mismas, y el potencial carácter democrático de ellos, vislumbran beneficios para dinámicas de toma de decisión, creación de políticas públicas y fortalecimiento de conciencia ciudadana. Con funciones de caracterizar, monitorear y controlar contaminantes.

Adicionalmente, se puede resaltar la relevancia de procesos educativos, entrenamiento y apropiación de tecnologías convergentes por parte de la ciudadanía, la academia, centros de investigación, gobiernos a fin de potencializar procesos de con caracterización, monitoreo y control de contaminación; esto solidificaría apuestas para el desarrollo sostenible de carácter regional, nacional e internacional. Y la gestión empresarial, con la implementación de las Tecnologías 4.0 favorecerían significativamente el lograr un verdadero e inteligente desarrollo sostenible. La revisión de la literatura de estas variables, generaron cuatro subtemas claves que las autoridades empresariales deben contemplar al diseñar sus planes corporativos: Tecnologías 4.0 y su orientación social y ambiental, Beneficios de las tecnologías 4.0 en las industrias, Habilidades de la fuerza laboral, Preparación y adopción empresarial de las Tecnologías 4.0.

A modo complementario a los hallazgos arriba ilustrados, se menciona que estudios como el de (Cheng *et al.*, 2019) propone tres frentes de acción para redireccionar la relación entre las tecnologías de la información (TIC) y la reducción de contaminación ambiental: 1. Impulsar formatos como teleconferencias y teletrabajo a través de las tecnologías de la información, 2. Promover el desarrollo de tecnología de producción verde y mejorar sistemas de reciclaje de productos industriales, y 3. Expandir la absorción de Inversión Extranjera Directa (IED) para la transformación y actualización de estructuras industriales. Todo esto, encaminado al uso de las tecnologías, para la mejora de las condiciones ambientales.

Finalmente, es acertado cuando empresas, gobiernos y asociaciones civiles promueven la integración interdisciplinaria de saberes y habilidades entre trabajadores sociales, ingenieros y otras profesiones, y entre todos ser capaces de crear soluciones innovativas que se encaminen a resolver fenómenos de sociedades vulnerables (Chui & Ko, 2020), este mismo estudio, insta a académicos y líderes influyentes a desarrollar diseños integrativos de soluciones para luchar frente a fenómenos de contaminación ambiental, epidemias sociales (como la COVID-19), y futuras crisis de la sociedad, de manera mancomunada; usando herramientas como: las tecnologías convergentes siendo estas las mejores aliadas en la intención mejorar las condiciones ambientales, por ende optimizar las condiciones de vida en el planeta.

Conflicto de intereses

Ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos

Sinceros agradecimientos a la Universidad del Magdalena y a Minciencias (Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación) por su apoyo incondicional en mis estudios de Doctorado en Desarrollo Sostenible en la Universidad de Manizales. Y especial gratitud a las docentes e investigadoras Dra. Yamilhet Andrade Arango y Dra. Andrea Vaca López por su ceñido acompañamiento en mi proceso investigativo y por sus significativos aportes en la construcción de esta investigación.

Referencias

Abascal, E., Gómez-Coma, L., Ortiz, I., & Ortiz, A. (2022). Global diagnosis of nitrate pollution in groundwater and review of removal technologies. *Science of the Total Environment*, 810. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152233>



- Ai, Y. H., Peng, D. Y., & Xiong, H. H. (2021). Impact of environmental regulation intensity on green technology innovation: From the perspective of political and business connections. *Sustainability*, 13(9), 1–23. <https://doi.org/10.3390/su13094862>
- Arteaga-Quico, A. D., & Wong-Portillo, L. R. (2021). Framework for monitoring the temperature of aquaculture crops based on IoT. *DYNA (Colombia)*, 88(218), 239–246. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n218.90626>
- Atik, H., & Ünlü, F. (2019). The Measurement of Industry 4.0 Performance through Industry 4.0 Index: An Empirical Investigation for Turkey and European Countries. *Procedia Computer Science*, 158, 852–860. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.123>
- Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., & Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, 229, 1–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>
- Carrillo, J., Gomis, R., de los Santos, S., Covarrubias, L., & Matus, M. (2020). ¿Podrán transitar los ingenieros a la Industria 4.0? Análisis industrial en Baja California. *Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento*, 8(22), 1–22. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2020.22.76089>
- Cheng, Z., Li, L., & Liu, J. (2019). The effect of information technology on environmental pollution in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(32), 33109–33124. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06454-7>
- Chui, C. H. K., & Ko, A. (2020). Converging humanitarian technology and social work in a public health crisis: a social innovation response to COVID-19 in Hong Kong. *Asia Pacific Journal of Social Work and Development*, 00(00), 1–8. <https://doi.org/10.1080/02185385.2020.1790412>
- Chukwuka, K. S., Alimba, C. G., Ataguba, G. A., & Jimoh, W. A. (2018). The Impacts of Petroleum Production on Terrestrial Fauna and Flora in the Oil-Producing Region of Nigeria. *The Political Ecology of Oil and Gas Activities in the Nigerian Aquatic Ecosystem*, 125–142. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809399-3.00009-4>
- Courtene-Jones, W., Quinn, B., Gary, S. F., Mogg, A. O. M., & Narayanaswamy, B. E. (2017). Microplastic pollution identified in deep-sea water and ingested by benthic invertebrates in the Rockall Trough, North Atlantic Ocean. *Environmental Pollution*, 231, 271–280. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.026>
- Departamento Nacional de Planeación. (2021). Índice Departamental de Innovación para Colombia 2021. Disponible en: <https://www.dnp.gov.co/programas/desarrollo-empresarial/Competitividad/Paginas/Indice-Departamental-de-Innovacion-para-Colombia.aspx> (Acceso enero 2023).
- Drewil, G. I., & Al-Bahadili, R. J. (2022). Air pollution prediction using LSTM deep learning and metaheuristics algorithms. *Measurement: Sensors*, 143747. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100546>
- Efobi, U., Belmondo, T., Orkoh, E., Atata, S. N., Akinyemi, O., & Beecroft, I. (2019). Environmental pollution policy of small businesses in Nigeria and Ghana: extent and impact. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(3), 2882–2897. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3817-x>
- Foro Económico Mundial. (2020). The Future of Jobs Report 2020. In *The Future of Jobs Report (Issue October)*. Disponible en: <https://www.weforum.org/reports/the-future-of-jobs-report-2020/digest> (Acceso enero 2023).
- Foro Económico Mundial. (2021). Digital Culture : The Driving Force of Digital Transformation (Issue June). Disponible en: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Digital_Culture_Guidebook_2021.pdf (Acceso enero 2023).
- Heidrich, F., Goncalves de Moraes, D., & Blumetti Facó, J. (2020). La teoría de las opciones reales en la gestión de inversiones en la industria 4.0: un estudio de caso. *Revista De Gestão, Finanças E Contabilidade*, 10(2), 60–85. Disponible en: <https://itacarezinho.uneb.br/index.php/financ/article/view/7304/7889> (Acceso enero 2023).
- Heintzelman, A., Filippelli, G. M., Moreno-Madriñan, M. J., Wilson, J. S., Wang, L., Druschel, G. K., & Lulla, V. O. (2023). Efficacy of Low-Cost Sensor Networks at Detecting Fine-Scale Variations in Particulate Matter in Urban Environments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 1–18. <https://doi.org/10.3390/ijerph20031934>
- Jung, K. H., Goodwin, K. E., Ross, J. M., Cai, J., Chillrud, S. N., Perzanowski, M., Perera, F. P., Miller, R. L., & Lovinsky-Desir, S. (2023). Characteristics of peak exposure to black carbon pollution in school, commute and home environments among school children in an urban community. *Environmental Pollution*, 319, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120991>
- Meng, Q., Wang, J., Cui, J., Li, B., Wu, S., Yun, J., Aschner, M., Wang, C., Zhang, L., Li, X., & Chen, R. (2022). Prediction of COPD acute exacerbation in response to air pollution using exosomal circRNA profile and Machine learning. *Environment International*, 168(August), 107469. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107469>

- Molano, S. M., Cardenas, D. P., Gómez, H. S., Alvarado, D. M., Galindo, A. F., Sanabria, J. F., & Gómez-Neita, J. S. (2022). Evaluación del retroceso glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy, Colombia a partir de la clasificación de imágenes multisensor. *Boletín de Geología*, 44(1). <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n1-2022002>
- Morawska, L., Thai, P. K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., Bedini, A., Chai, F., Christensen, B., Dunbabin, M., Gao, J., Hagler, G. S. W., Jayaratne, R., Kumar, P., Lau, A. K. H., Louie, P. K. K., Mazaheri, M., Ning, Z., Motta, N., ... Williams, R. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone? *Environment International*, 116(February), 286–299. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018>
- Naciones Unidas. (2015). Acuerdo de París. In Acuerdo de París. <https://doi.org/10.16925/co.v25i111.1874>
- O'Regan, A. C., Byrne, R., Hellebust, S., & Nyhan, M. M. (2022). Associations Between Google Street View-Derived Urban Greenspace Metrics and Air Pollution Measured using a Distributed Sensor Network. *Sustainable Cities and Society*, 87(July), 104221. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104221>
- Palacios Espinoza, E., & Espinoza Molina, C. (2014). Contaminación del aire exterior. Cuenca - ecuador, 2009- 2013. Posibles efectos en la salud. *Revista de La Facultad de Ciencias Médicas de La Universidad de Cuenca*, 32(2), 6–17. Disponible en: <file:///D:/DESCARGAS/Trabajo de titulación.pdf> (Acceso enero 2023).
- Pashayev, N. M., Ragimov, R. M., Samedov, F. R., & Gahramanova, D. S. (2018). Aerospace monitoring of the oil pollution of the Caspian Sea on the base of GIS technology and radar space images. *IFAC-PapersOnLine*, 51(30), 558–560. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.266>
- Piñeres-Espitia, G., & Mejía-Neira, A. (2013). Plataformas tecnológicas aplicadas al monitoreo climático. *Prospectiva*, 11(2), 78–87. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496250736010> (Acceso enero 2023).
- Rayabharapu, V. K., Rampur, V., Jyothi, N. M., Tripathi, V., Bhaskar, T., & Glory, K. B. (2022). IOT sensor-based pollution management control technique. *Measurement: Sensors*, 24(August), 100513. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100513>
- Rocha-Román, L., Olivero-Verbel, J., & Caballero-Gallardo, K. R. (2018). Impacto de la minería del oro asociado con la contaminación por mercurio en suelo superficial de san martín de loba, sur de bolívar (Colombia). *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 34(1), 93–102. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.08>
- Rozo García, F. (2020). Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0. *Revista UIS Ingenierías*, 19(2), 177–191. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n2-2020019>
- Ryan, P. H., Wolfe, C., Parsons, A., Brokamp, C., Turner, A., & Haynes, E. (2023). Participant Engagement to Develop Report-Back Materials for Personal Air Monitoring. *Journal of Clinical and Translational Science*, 7(e76), 1–8. <https://doi.org/10.1017/cts.2023.30>
- Schmaltz, E., Melvin, E. C., Diana, Z., Gunady, E. F., Rittschof, D., Somarelli, J. A., Viridin, J., & Dunphy-Daly, M. M. (2020). Plastic pollution solutions: emerging technologies to prevent and collect marine plastic pollution. *Environment International*, 144(May). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106067>
- Schnelle, K. B., Dunn, R. F., & Ternes, M. E. (2018). Air pollution control technology handbook. *Johnson Matthey Technology Review*, 62(1), 81–85. <https://doi.org/10.1595/205651318X696657>
- Silva, M., & Rocha, C. (2020). Avaliação do Nível de Maturidade da Indústria 4.0: O Caso de uma Empresa Estratégica de Defesa. *Future Studies Research Journal: Trends and Strategies [FSRJ]*, 12(1), 31–59. <https://doi.org/https://doi.org/10.24023/FutureJournal/2175-5825/2020.v12i1.455>
- Sinche, F., Armada, J., Valero, J., & Infante, L. (2021). Use of the APP in the fight against COVID-19 in South America: Technology at the service of health. *Boletín de Malaria y Salud Ambiental*, 61(1), 124–130. <https://doi.org/10.52808/bmsa.7e5.611.015>
- Sun, Z., Hu, Y., & Cheng, H. (2020). Public health risk of toxic metal(loid) pollution to the population living near an abandoned small-scale polycrystalline mine. *Science of the Total Environment*, 718. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137434>
- Tang, L., Ruan, J., Bo, X., Mi, Z., Wang, S., Dong, G., & Davis, S. J. (2022). Plant-level real-time monitoring data reveal substantial abatement potential of air pollution and CO2 in China's cement sector. *One Earth*, 5(8), 892–906. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.07.003>
- Taylor, S., Edwards, S. J., & Walker, T. R. (2020). A toxicity-based analysis of Canada's National Pollutant Release Inventory (NPRI): a case study in Nova Scotia. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(2), 2238–2247. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06933-x>

- Wang, M., Lu, T., & Li, Y. (2023). Optimizing air purification for household particulate matters using sensor-based and time-based intervention strategies. *Particuology*, 79, 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2022.11.008>
- Wang, P., Yao, J., Wang, G., Hao, F., Shrestha, S., Xue, B., Xie, G., & Peng, Y. (2019). Exploring the application of artificial intelligence technology for identification of water pollution characteristics and tracing the source of water quality pollutants. *Science of the Total Environment*, 693, 133440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.246>
- Wang, Y., & Yu, L. (2021). Can the current environmental tax rate promote green technology innovation? - Evidence from China's resource-based industries. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123443. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123443>
- World Economic Forum. (2020). Diversity, Equity and Inclusion 4.0: A toolkit for leaders to accelerate social progress in the future of work | World Economic Forum (Issue June). Disponible en: <https://www.weforum.org/reports/diversity-equity-and-inclusion-4-0-a-toolkit-for-leaders-to-accelerate-social-progress-in-the-future-of-work> (Acceso enero 2023).