

Terra-Digital Twin (Zero Impact Ecosystem Monitoring through Biodegradable Mesh Networks and AI Orchestration)

Daiana Magalí Acosta Romero 

National Technological University - Delta Regional Faculty, Argentina, magaliacosta.r@gmail.com

Abstract– Current environmental monitoring systems face a critical paradox: the massive deployment of IoT sensors to protect ecosystems generates significant electronic waste (e-waste). This Work in Progress paper presents Terra-Digital Twin, an innovative framework that integrates zero-impact ecosystem monitoring through biodegradable mesh networks and Artificial Intelligence orchestration. The proposed architecture replaces traditional FR4 and silicon-based hardware with ephemeral sensors made of cellulose and graphite-ink circuits, designed with a programmed lifespan of 180 days. Data management is handled via a Graph Neural Network (GNN) model that maps spatial relationships between nodes to create a dynamic Digital Twin of the ecosystem. Preliminary conceptualization suggests that using the ASCON lightweight encryption standard ensures secure data transmission within resource-constrained biodegradable hardware. The methodology describes the planned experimental design to validate hardware degradation rates and communication stability. This research aims to provide a scalable, sustainable solution for Industry 5.0, aligning technological advancement with the United Nations' Sustainable Development Goals (SDGs 9, 13, and 15).

Keywords-- Biodegradable Sensors, Artificial Intelligence, Mesh Networks, E-waste, Green Engineering.

Terra-Digital Twin

(Monitoreo Ecosistémico de Impacto Cero mediante Redes Mesh Biodegradables y Orquestación de IA)

Daiana Magalí Acosta Romero 

Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Delta, Argentina, magaliacosta.r@gmail.com

Resumen– Los sistemas actuales de monitoreo ambiental enfrentan una paradoja crítica: el despliegue masivo de sensores IoT para proteger ecosistemas genera una cantidad significativa de residuos electrónicos (e-waste). Este Trabajo en Curso (Work in Progress) presenta Terra-Digital Twin, un marco innovador que integra el monitoreo ecosistémico de impacto cero mediante redes mesh biodegradables y orquestación de Inteligencia Artificial. La arquitectura propuesta sustituye el hardware tradicional basado en FR4 y silicio por sensores efímeros fabricados con sustratos de celulosa y circuitos de tinta de grafito, diseñados con una vida útil programada de 180 días. La gestión de datos se realiza a través de un modelo de Redes Neuronales de Grafos (GNN) que mapea las relaciones espaciales entre los nodos para crear un Gemelo Digital dinámico del ecosistema. La conceptualización preliminar sugiere que el uso del estándar de cifrado ligero ASCON garantiza la transmisión segura de datos en hardware biodegradable con recursos restringidos. La metodología describe el diseño experimental planificado para validar las tasas de degradación del hardware y la estabilidad de las comunicaciones. Esta investigación busca proporcionar una solución escalable y sostenible para la Industria 5.0, alineando el avance tecnológico con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 9, 13 y 15).

Palabras Claves-- Inteligencia Artificial, Ingeniería Verde, Redes Mesh, Residuos Electrónicos, Sensores Biodegradables.

I. INTRODUCCIÓN

El despliegue masivo de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) ha permitido avances sin precedentes en la monitorización ambiental y la gestión de recursos naturales. Como se ha establecido en investigaciones sobre estaciones de monitoreo geo-ambiental, "para comprender cómo cambian las condiciones ambientales en el tiempo y el espacio, y su relación con la actividad humana, es esencial contar con equipos que puedan monitorear estas condiciones en tiempo real"[1]. Sin embargo, esta expansión tecnológica ha introducido una contradicción crítica en el paradigma de la ingeniería verde: la generación de residuos electrónicos (e-waste). Los dispositivos de monitoreo convencionales, fabricados con sustratos de FR4, semiconductores de silicio y componentes metálicos persistentes, representan una fuente potencial de contaminación por metales pesados en los ecosistemas que pretenden proteger. La necesidad de obtener datos de alta resolución in situ colisiona directamente con el imperativo de minimizar el pasivo ambiental de la infraestructura tecnológica.

En este contexto, la electrónica efímera o transitoria surge como una solución disruptiva. No obstante, la transición hacia hardware biodegradable plantea desafíos complejos en

términos de integridad de datos y continuidad operativa. Los sensores diseñados para reintegrarse al ecosistema poseen una vida útil limitada y una confiabilidad física variable, lo que dificulta el mantenimiento de un flujo de información constante mediante métodos de red tradicionales. Existe una brecha tecnológica significativa en la integración de estos nodos transitorios con arquitecturas de software que puedan mitigar la pérdida progresiva de hardware sin sacrificar la precisión del monitoreo. Bajo esta premisa, se han planteado propuestas para el desarrollo de un "sistema inalámbrico con sensores para monitorear y medir la calidad del aire ambiental [...] en donde esta investigación beneficiaría al conocimiento, innovación y sostenibilidad medio ambiental"[2, p.5].

Este trabajo presenta **Terra-Digital Twin**, una arquitectura integral que propone la convergencia de redes mesh inalámbricas, sensores de hardware efímero y orquestación basada en Inteligencia Artificial. La propuesta central radica en el desarrollo de un Gemelo Digital (Digital Twin) dinámico que, alimentado por modelos de aprendizaje profundo, sea capaz de asimilar la desaparición programada de los nodos físicos mientras mantiene la fidelidad de la representación virtual del ecosistema. A diferencia de las soluciones de teledetección satelital, este enfoque proporciona datos de alta fidelidad bajo el dosel forestal o en el subsuelo, utilizando materiales que regresan al ciclo del carbono como biomasa inerte.

Como un Trabajo en Curso (Work in Progress), el objetivo primordial de este artículo es formalizar el diseño experimental y la infraestructura de datos necesaria para validar la viabilidad de un monitoreo ecosistémico de impacto cero. El manuscrito se organiza de la siguiente manera: la Sección II detalla la metodología y el diseño experimental propuesto; la Sección III describe la arquitectura del sistema y la capa de inteligencia de datos; la Sección IV aborda los protocolos de ciberseguridad y gobernanza; y finalmente, la Sección V presenta las conclusiones preliminares y las líneas de trabajo futuro.

II. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

La presente investigación se fundamenta en un enfoque de ingeniería experimental de cuatro fases, orientado a validar la viabilidad técnica y operativa de una red de sensores efímeros en entornos naturales complejos. El objetivo central es contrastar la hipótesis de que una arquitectura de red mesh dinámica, apoyada en modelos de aprendizaje profundo, posee la resiliencia necesaria para mitigar la pérdida programada de

nodos físicos sin degradar la fidelidad predictiva del Gemelo Digital.

A diferencia de las metodologías de monitoreo convencionales, que asumen la persistencia indefinida del hardware, este diseño experimental integra el ciclo de vida del sustrato biodegradable como una variable crítica de la red. A través de este enfoque, se pretende formalizar un marco de trabajo que combine la ciencia de materiales avanzados con la orquestación de datos de última generación, asegurando la continuidad del monitoreo bajo el paradigma de impacto ambiental cero.

A. Definición de Variables y Métricas de Rendimiento
 Para asegurar el rigor metodológico y facilitar la replicabilidad del experimento, se ha diseñado una matriz de variables que permite evaluar el comportamiento sistémico de **Terra-Digital Twin**. La selección de estas métricas responde a la necesidad de cuantificar la eficiencia de la solución propuesta, contrastándola directamente con los estándares de la industria en monitoreo ambiental y redes de sensores inalámbricos (WSN).

El análisis se centra en la correlación entre la degradación física del hardware y la persistencia lógica de la información. Al categorizar las variables en independientes, dependientes y de control (ver Tabla I), se busca aislar los efectos de la degradación del sustrato de celulosa sobre la calidad de la comunicación mesh. Esto permitirá determinar el "punto crítico de colapso de red", definido como el momento en que la densidad de nodos activos es insuficiente para mantener un flujo de datos confiable hacia el Gemelo Digital. Asimismo, las métricas de error permitirán validar la capacidad de la Inteligencia Artificial para compensar la pérdida de sensores físicos mediante técnicas de inferencia espacial.

TABLE I
 Definición de variables y parámetros experimentales

Categoría	Variable	Descripción técnica
Independiente	Tasa de Hidrólisis	Evaluar la vida útil programada del sustrato frente a factores ambientales.
Independiente	Densidad de Nodos	Determinar la robustez de la topología mesh ante la pérdida de nodos.
Dependiente	PDR (Packet Delivery Ratio)	Medir la fiabilidad del protocolo de comunicación en condiciones de degradación.
Dependiente	MSE (<i>Mean Squared Error</i>)	Validar la precisión del modelo predictivo GNN ante datos faltantes.
Control	Humedad y pH del Suelo	Asegurar la consistencia de los resultados en diferentes biomas.
Control	Latencia de Red	Verificar que el procesamiento por IA no comprometa el monitoreo en tiempo real.

B. Diseño del Nodo Sensor (Hardware Efímero)
 El diseño del hardware sigue una jerarquía de materiales seleccionados por su biodegradabilidad y propiedades

eléctricas. El sustrato se compone de nano celulosa cristalina tratada superficialmente para modular su degradación. Esta selección se fundamenta en que, en polímeros naturales como la celulosa, "los grupos hidroxilo y los oxígenos no solo sujetan a los iones metálicos en su estructura por interacciones ion-dipolo, sino que también estabilizan a las nanopartículas debido a las fuertes interacciones de estos con los átomos de la superficie" [3, p.51]. "Particularmente, la nano celulosa ha emergido como un material prometedor por su alta resistencia, bajo peso, biodegradabilidad y versatilidad funcional [...] permitiendo adaptar sus extraordinarias propiedades estructurales a aplicaciones clave en los campos de la energía, la caracterización y mejora de materiales, la nanoelectrónica, la producción de membranas o la nano biotecnología." [4, p.18] Los circuitos se imprimen utilizando tintas conductoras basadas en grafito y grafeno, evitando el uso de metales pesados. La arquitectura electrónica se basa en microcontroladores de ultra bajo consumo (ULP) configurados para operar en estados de sueño profundo (*deep sleep*), despertando únicamente para la adquisición y transmisión de ráfagas de datos. "La elección de esta topología se debe a que un nodo sensor alimentado mediante MFCs es incapaz de funcionar de una manera continua, debido a la limitada potencia que estas entregan, razón por la cual podrá funcionar únicamente de manera intermitente y como dispositivo de función reducida RFD." [5, p.58]. Estudios recientes indican que "una ventaja principal de nuestros sensores es el hecho de que $\approx 93\%$ de su masa total es biodegradable [...] sugiriendo que los sensores biodegradables son prometedores para la detección de analitos ambientales" [6, p.46]. Esta característica permite que los nodos de Terra-Digital Twin operen con consumos de energía ínfimos, facilitando su integración en ecosistemas sensibles."

C. Fases del Prototipado y Validación
 El desarrollo se estructura en las siguientes etapas secuenciales:

- Fase de Caracterización de Materiales:** Pruebas de laboratorio para determinar la curva de degradación de la conductividad eléctrica en función del tiempo y la exposición ambiental.
- Modelado y Simulación de Red:** Uso de herramientas de simulación (como NS-3 o OMNeT++) para evaluar el protocolo de enrutamiento mesh ante la falla progresiva de nodos, analizando la capacidad de autorreparación (*self-healing*) de la red.
- Entrenamiento del Modelo de IA:** Implementación de una Red Neuronal de Grafos (GNN) entrenada con *datasets* ambientales sintéticos para predecir estados ecosistémicos a partir de datos parciales.
- Despliegue Piloto y Auditoría:** Instalación de una red experimental en un entorno controlado para comparar los resultados con sensores industriales de referencia (línea base).

D. Arquitectura de Datos y Orquestación

La metodología de procesamiento de **Terra-Digital Twin** emplea un enfoque distribuido basado en *Edge Computing*, diseñado específicamente para infraestructuras con recursos energéticos y computacionales limitados. Los nodos efímeros realizan un filtrado preliminar de ruido y una normalización de señales en el origen, asegurando que solo la información con valor estadístico sea procesada. Para proteger la integridad de la telemetría en este entorno hostil, se implementan algoritmos de encriptación ligera basados en el estándar **ASCON-128**, el cual optimiza el consumo de ciclos de instrucción y minimiza el impacto en la vida útil de la batería del sensor biodegradable.

Una vez pre-procesados, los paquetes de datos son transmitidos a través de una red mesh multi-salto hacia una capa de orquestación centralizada en la nube. En esta etapa, el motor de Inteligencia Artificial basado en **Redes Neuronales de Grafos (GNN)** asume el rol de núcleo inteligente del sistema. El modelo reconstruye dinámicamente la topología del grafo en cada intervalo de transmisión, tratando la degradación biológica de los dispositivos como cambios en la matriz de adyacencia.

Esta orquestación permite que el Gemelo Digital realice **inferencias espaciales de alta fidelidad**; es decir, cuando un nodo físico desaparece por hidrólisis, la GNN utiliza las correlaciones espacio-temporales de los nodos vecinos activos para predecir las variables del área vacía con un margen de error controlado.

III. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL ARQUITECTURA DEL SISTEMA Y CAPA DE INTELIGENCIA DE DATOS

La arquitectura de Terra-Digital Twin se ha diseñado bajo un esquema jerárquico de cuatro capas funcionales, estructuradas para gestionar la transitoriedad inherente al hardware efímero. Este enfoque permite desacoplar la captura de datos en entornos hostiles del procesamiento intensivo en la nube, garantizando que la degradación programada de la capa física no interrumpa la continuidad del servicio ni la integridad de la monitorización.

A diferencia de las arquitecturas de IoT tradicionales, donde la falla de un nodo se considera un error crítico, este diseño asume la volatilidad de la infraestructura como una característica operativa. El flujo de información se desplaza de forma ascendente a través de un ecosistema que prioriza la eficiencia energética y la seguridad ligera en el borde (Edge), mientras delega la reconstrucción de la topología y la inferencia de datos faltantes a un motor de inteligencia centralizado. De esta manera, el sistema evoluciona dinámicamente: mientras el componente biológico del sensor se integra al suelo, su identidad lógica y su aporte informativo permanecen latentes en el Gemelo Digital, asegurando una transición fluida.

A. Arquitectura Multicapa

El ecosistema se organiza de acuerdo con el siguiente flujo de datos, diseñado para optimizar el consumo energético y la seguridad:

1. **Capa de Percepción (MESHa):** Constituida por los nodos sensores biodegradables. Realizan la adquisición de variables analógicas, su conversión digital y un pre-procesamiento básico para la reducción de ruido.
2. **Capa de Transporte (p):** Utiliza un protocolo de enrutamiento dinámico que prioriza caminos con mayor energía residual. La topología mesh permite que, ante la falla de un nodo por degradación biológica, el tráfico se redirija automáticamente hacia el *gateway* más cercano.
3. **Capa de Orquestación y Edge Computing:** El *gateway* actúa como un nodo de cómputo intermedio que agrega los datos y aplica el cifrado ligero ASCON antes de la transmisión a la nube.
4. **Capa de Aplicación (Digital Twin Interface):** Representación virtual donde se ejecutan los modelos predictivos y se visualiza el estado del ecosistema en tiempo real.

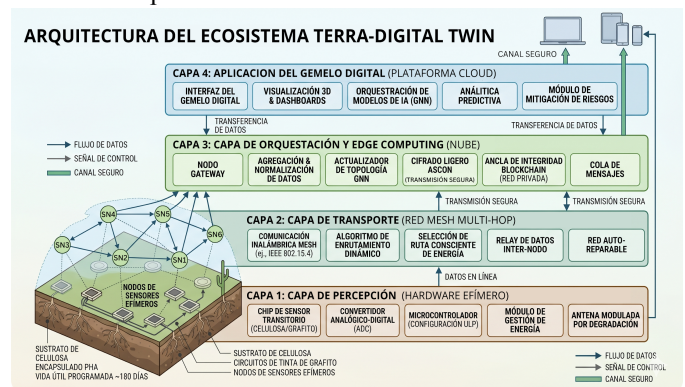


Fig. 1 Arquitectura del ecosistema Terra-Digital Twin

B. Capa de Inteligencia de Datos: Modelo GNN

El componente crítico de la arquitectura es el motor de inteligencia basado en **Redes Neuronales de Grafos (GNN)**. A diferencia de las redes neuronales convencionales, las GNN son capaces de operar sobre estructuras de datos no euclidianas, tratando a los sensores como nodos V y a sus conexiones inalámbricas como aristas E en un grafo dinámico $G = (V, E)$.

Este modelo es fundamental para la resiliencia del sistema por dos razones:

- **Inferencia Espacial:** Si el sensor A se degrada, el modelo utiliza las correlaciones históricas con los sensores vecinos B y C para inferir el valor faltante con un margen de error controlado.
- **Adaptabilidad Topológica:** El modelo actualiza la matriz de adyacencia del grafo en cada ciclo de transmisión, asimilando la pérdida de nodos como un cambio estructural y no como un fallo del sistema.

C. Protocolo de Ciberseguridad y Gobernanza

Dada la limitación de recursos computacionales del hardware biodegradable, se implementa el estándar de criptografía ligera **ASCON**, diseñado para ofrecer altos

niveles de seguridad con una sobrecarga mínima en el ciclo de instrucción del microcontrolador. La integridad de los registros históricos se asegura mediante el anclaje de *hashes* en una red de *blockchain* privada en la capa de orquestación, garantizando que los datos de auditoría ambiental sean inmutables y auditables por entidades externas.

TABLE II

Especificaciones Técnicas de la capa de datos		
Componente	Especificación	Función Principal
Algoritmo de IA	Graph Neural Network (GNN)	Reconstrucción topológica e inferencia de datos faltantes.
Protocolo de Red	IEEE 802.15.4 (Mesh)	Comunicación de bajo consumo en entornos densos.
Cifrado	ASCON-128	Aseguramiento de la confidencialidad en el borde (<i>edge</i>).
Backend	Microservicios (Docker)	Escalabilidad de la representación del Gemelo Digital.

IV. PROTOCOLOS DE CIBERSEGURIDAD Y GOBERNANZA DE DATOS

La naturaleza efímera y distribuida de **Terra-Digital Twin** introduce desafíos únicos en la seguridad de la información. La infraestructura de seguridad se ha diseñado para garantizar la tríada de la seguridad (Confidencialidad, Integridad y Disponibilidad) sin exceder el presupuesto energético de los nodos sensores.

A. Criptografía Ligera en el Borde (ASCON)

Dado que los microcontroladores de ultra bajo consumo (ULP) integrados en el sustrato de celulosa poseen capacidades de cómputo limitadas, se ha seleccionado el estándar de cifrado ligero **ASCON-128**. Este protocolo, finalista en competiciones del NIST para criptografía liviana, permite asegurar la confidencialidad de los datos desde el momento de la captura sin penalizar la vida útil de la batería.

El proceso de cifrado se ejecuta en el nodo antes de la transmisión mesh, protegiendo la telemetría contra ataques de interceptación (*eavesdropping*) durante el tránsito multicanal. Al utilizar ASCON, se garantiza una sobrecarga mínima en el ciclo de instrucción.

B. Integridad y Gobernanza mediante Blockchain

Para la capa de gobernanza, se propone un esquema de anclaje de confianza basado en una red de **Blockchain privada**. Una vez que los datos alcanzan la Capa de Orquestación (Gateway/Nube), se genera un resumen criptográfico (*hash*) de los estados agregados del ecosistema.

Este mecanismo asegura los siguientes pilares de gobernanza:

- **Inmutabilidad:** Los registros de salud forestal o contaminación no pueden ser alterados, proporcionando una base legal sólida para auditorías ambientales.

- **Trazabilidad del Dato:** Cada actualización del Gemelo Digital está vinculada a un sello de tiempo y a la identidad del nodo de origen (verificado mediante funciones físicas inclonables en el silicio del sensor).
- **Transparencia Institucional:** Permite que entidades gubernamentales y privadas accedan a una "versión única de la verdad" sobre el impacto ecosistémico, facilitando la toma de decisiones basada en evidencia. "Hay, por tanto, un desajuste temporal entre los costes y los beneficios de la lucha contra el cambio climático, que dificulta la ejecución de las ambiciosas medidas necesarias para atajarlo [...] Los riesgos físicos asociados al cambio climático se irán incrementando con el tiempo si no se introducen medidas de mitigación." [7, p.8]

C. Autenticación de Nodos y Resiliencia

Para evitar ataques de suplantación de identidad (*spoofing*), el sistema emplea un protocolo de autenticación basado en la topología dinámica del grafo. El modelo GNN en la nube actúa como un monitor de comportamiento; si un nodo intenta inyectar datos falsos o presenta un patrón de transmisión inconsistente con su ubicación física en la red mesh, el sistema lo aísla automáticamente, garantizando la resiliencia del Gemelo Digital ante intrusiones maliciosas.

V. CONCLUSIONES PRELIMINARES Y TRABAJO FUTURO

El desarrollo de este Trabajo en Curso ha permitido formalizar una arquitectura sistémica que resuelve la paradoja del monitoreo ambiental masivo y la generación de residuos electrónicos. A través del diseño de **Terra-Digital Twin**, se ha demostrado teóricamente que es posible integrar hardware de naturaleza efímera con una capa de inteligencia resiliente, sentando las bases para una nueva generación de ingeniería ecosistémica de impacto cero.

A. Conclusiones Preliminares

A partir del análisis arquitectónico y los modelos conceptuales presentados, se derivan las siguientes conclusiones técnicas:

1. **Resiliencia de la Red:** La implementación de una topología mesh con capacidad de reenvío dinámico (*self-healing*) es fundamental para compensar la degradación física programada de los nodos. La pérdida de sensores individuales no compromete la integridad del sistema siempre que se mantenga una densidad de nodos crítica.
2. **Viabilidad del Gemelo Digital:** El uso de Redes Neuronales de Grafos (GNN) se presenta como la solución óptima para el manejo de datos en redes transitorias, permitiendo la inferencia espacial y la continuidad del monitoreo a pesar de la presencia de datos faltantes por hidrólisis del hardware.
3. **Seguridad Proporcionada:** La unificación del cifrado ligero ASCON en el borde y el anclaje de integridad mediante Blockchain en la nube asegura

un marco de gobernanza de datos robusto, adecuado para aplicaciones de misión crítica en la gestión de recursos naturales.

B. Trabajo Futuro y Líneas de Investigación

Dada la naturaleza de este manuscrito como una propuesta en curso, las próximas fases de la investigación se centrarán en la transición del modelo teórico hacia una validación empírica robusta, estructurada en los siguientes ejes estratégicos:

- **Implementación de Prototipos de Campo:** Se llevará a cabo la fabricación y despliegue de los primeros nodos sensores funcionales utilizando nanocelulosa cristalina y tintas conductivas de grafeno. El objetivo primordial es monitorear la tasa de degradación física y la pérdida de conductividad eléctrica en tiempo real dentro de biomas con condiciones higrotérmicas contrastantes. Esta fase permitirá calibrar los algoritmos de falla y determinar el comportamiento del sustrato orgánico ante la microbiota del suelo, validando la ventana operativa de 180 días en condiciones de exposición real.
- **Optimización del Algoritmo GNN:** Se planea refinar el motor de Inteligencia Artificial mediante el uso de arquitecturas de *Online Learning* (Aprendizaje en Línea). Esta evolución permitirá que el modelo de Redes Neuronales de Grafos se adapte dinámicamente a las variaciones estacionales y a la pérdida progresiva de topología física sin requerir reentrenamientos masivos. Se investigarán técnicas de transferencia de aprendizaje para que el Gemelo Digital pueda "heredar" el conocimiento de nodos degradados hacia nuevos despliegues, optimizando la continuidad de la serie histórica de datos.
- **Análisis de Escalabilidad y Costo:** Se realizará un estudio exhaustivo de la Evaluación del Ciclo de Vida para cuantificar con precisión la reducción de la huella de carbono y la eliminación de residuos tóxicos frente a las infraestructuras de silicio tradicionales. Este análisis no solo abordará el costo de producción a escala de los biopolímeros, sino que también evaluará la viabilidad económica de un modelo de "sensores como servicio" (*Sensing-as-a-Service*), donde la infraestructura desaparece de forma natural, eliminando los costos de recuperación y reciclaje de e-waste.
- **Exploración de Nuevos Materiales:** Se investigará la síntesis de biopolímeros avanzados con capas protectoras enzimáticas para modular la ventana operativa según la criticidad del caso de uso, desde ciclos cortos para agricultura regenerativa hasta ciclos extendidos para la detección temprana de incendios forestales. En este sentido, la integración de moléculas orgánicas como los curcuminoides abre nuevas fronteras en la sensórica efímera. Como se ha demostrado en estudios de materiales híbridos, "el

material propuesto se basa en una combinación única de nanofibras de celulosa y curcuminoides, dos componentes que ofrecen propiedades complementarias y prometedoras [...] incluyendo propiedades ópticas que podrían permitir la detección de contaminantes" [8, p.2]. Esta línea de investigación permitirá que los futuros nodos de Terra-Digital Twin actúen no solo como puntos de red, sino como indicadores químicos capaces de cambiar sus propiedades espectrales.

En conclusión, **Terra-Digital Twin** representa un avance significativo hacia la Industria 5.0, donde la innovación tecnológica y la conservación planetaria no son objetivos excluyentes, sino componentes de un mismo ecosistema de ingeniería sostenible.

REFERENCIAS

- [1] A. Rodríguez-Trejo, H. E. Ibarra-Ortega, H. Böhnelt, y J. Escalante-González, "Estación de monitoreo geoambiental (EMGA): dispositivo de monitoreo real en tiempo real con sensores de bajo costo para entornos urbanos," *Rev. Int. Contam. Ambient.* 2025. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S018849992025000100130&script=sci_arttext
- [2] K. M. Vélez Miraba, "Estudio de factibilidad de un sistema inalámbrico con sensores para el monitoreo y medición de la calidad del aire ambiental en la Universidad Estatal del Sur de Manabí," Tesis de Grado, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador, 2022. Disponible en: <https://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/3564>
- [3] L. E. Silva de Hoyos, "Nanopartículas biogénicas de Au, Ag y compositos de celulosa/Au y celulosa/Ag para su evaluación como sensores selectivos de iones metálicos contaminantes," Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México, 2018. Disponible en: <https://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/94919>
- [4] J. C. Arias "Nanocelulosa en sensores avanzados: Implicaciones para la eficiencia, sostenibilidad y desarrollo en las industrias aeronáutica y aeroespacial", Tesis de maestría, 2025. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.11912/13415>
- [5] D. F. López Pilco, "Desarrollo de un equipo de monitoreo inalámbrico de sensores alimentado mediante celdas de combustible microbianas para el CEEA," Proyecto de Titulación, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2018. Disponible en: <https://dspace.esPOCH.edu.ec/items/b7425f93-43f0-4461-93f7-ebce241e204c>
- [6] A. Molina Estrada, "Desarrollo de sensores flexibles para la detección de NOx utilizando óxidos metálicos semiconductores y nanotubos de carbono," Tesis de Doctorado, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí, México, 2024. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11627/6512>
- [7] L. Dormido, I. Garrido, P. L'Hotellerie-Fallois, y J. Santillán, "El cambio climático y la sostenibilidad del crecimiento: iniciativas internacionales y políticas europeas," *Documentos del Banco de España*. 2022. Disponible en: <https://www.bde.es/f/webbde/SES/Secciones/Publicaciones/PublicacionesSeriadas/DocumentosOcasiones/22/Fich/do2213.pdf>
- [8] D. Marín Muñoz, "Desarrollo de películas de nanofibras de celulosa funcionalizadas con curcuminoides para aplicaciones en sensores ópticos de contaminantes metálicos en agua," Tesis de Grado, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2024. Disponible: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/204393>