

JAVIER ARELLANO VERDEJO
HUGO E. LAZCANO HERNÁNDEZ

Collective View

De la ciencia
ciudadana a la
ciencia abierta
para el monitoreo
del sargazo en las
playas de México



COQHICYT
CONSEJO QUINTANARROENSE
DE HUMANIDADES, CIENCIAS
Y TECNOLOGÍAS



Sobre los autores



Formado como doctor en Ciencias de la Computación en el Centro de Investigación en Computación del IPN, **Javier Arellano Verdejo** orienta su labor científica hacia el conocimiento compartido. Como investigador en El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), se especializa en áreas de aprendizaje profundo, ciencia de datos y percepción remota. Su enfoque integra la inteligencia artificial para resolver retos ambientales críticos. En estas páginas, Javier nos narra la evolución de **Collective View**, un proyecto que transformó el esfuerzo comunitario en una iniciativa de ciencia abierta para el monitoreo de sargazo en las costas de México. Su visión técnica se entrelaza con la ciencia ciudadana para demostrar que la innovación más trascendente es aquella que se construye y se difunde colectivamente, convirtiendo el conocimiento tecnológico en una poderosa herramienta para el bienestar común.



Hugo Enrique Lazcano Hernández es doctor en Ingeniería Eléctrica por la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Su trayectoria científica se caracteriza por un enfoque transdisciplinario que integra percepción remota, análisis espacial y ciencia de datos aplicados a problemáticas socioambientales. Como Investigador por México comisionado en El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), unidad Chetumal, ha centrado su trabajo en el monitoreo del sargazo en las playas de Quintana Roo, uno de los desafíos ambientales emergentes del mar Caribe. Su trabajo ha contribuido al monitoreo del sargazo pelágico en las playas. En estas páginas, el autor comparte los retos, aprendizajes y logros de su participación en el proyecto **Collective View**, una iniciativa que promueve la participación ciudadana en la generación de conocimiento.

Javier Arellano-Verdejo
Hugo E. Lazcano-Hernández

Collective View

De la ciencia ciudadana a la ciencia
abierta para el monitoreo del sargazo
en las playas de México



EE

333.72097267

A7

Collective view: De la ciencia ciudadana a la ciencia abierta para el monitoreo del sargazo en las playas de México / Javier Arellano Verdejo, Hugo E. Lazcano Hernández. - San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México: El Colegio de la Frontera Sur, 2026.

1 recurso digital: PDF 96 páginas: mapa; 10 MB

Incluye bibliografía

E-ISBN: 978-607-69265-6-7

1. Gestión ambiental, 2. Ciencia ciudadana, 3. Inteligencia artificial, 4. *Sargassum*, 5. Monitoreo ambiental, 6. Quintana Roo (México), I. Arellano Verdejo, Javier (autor), II. Lazcano Hernández, Hugo Enrique (autor)

Primera edición digital, febrero de 2026

Diseño y formación: Javier Arellano y Hugo Lazcano

Corrección de estilo: Julio Roldán

Esta publicación fue sometida a un estricto proceso de arbitraje por pares, con base en los lineamientos establecidos por el Comité Editorial de El Colegio de la Frontera Sur.

D. R. © El Colegio de la Frontera Sur
Carretera Panamericana y Periférico Sur s/n
Barrio María Auxiliadora, C. P. 29290
San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México
www.ecosur.mx

Este libro fue parcialmente financiado por el Consejo Quintanarroense de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (COQHICYT) y el Departamento de Observación y Estudio de la Tierra, la Atmósfera y el Océano de El Colegio de la Frontera Sur.

Se autoriza la reproducción de esta obra para propósitos de divulgación o didácticos, siempre y cuando no existan fines de lucro, se cite la fuente y no se altere el contenido (favor de dar aviso: llopez@ecosur.mx).
Cualquier otro uso requiere permiso escrito de los editores.

Creative Commons CC BY-NC-SA

Hecho en México / *Made in Mexico*

A mi amada esposa Geny (Javier)
A mi amada familia (Hugo)

Prefacio

En un mundo que a menudo parece abrumado por problemas demasiado grandes para una sola persona, es fácil sentir que no podemos hacer una diferencia. Vemos las noticias sobre el cambio climático, la contaminación o la pérdida de nuestros ecosistemas, y nos preguntamos: ¿Cómo puedo ayudar? Este libro nació de esa misma pregunta y de creer que la respuesta está en algo mucho más poderoso que una sola persona: está en todos nosotros. Este libro comparte la historia de cómo la curiosidad, el ingenio y el deseo de ayudar de la gente común pueden unirse con la tecnología más avanzada, como la inteligencia artificial, para hacer cosas increíbles. A lo largo de estas páginas, te invitamos a un viaje para descubrir cómo, al trabajar juntos, podemos empezar a entender y proteger nuestro planeta de maneras que antes eran imposibles. Aquí compartimos lo que hemos aprendido sobre la tecnología y la gente: qué los motiva, qué los detiene y cómo podemos crear proyectos que realmente funcionen. Encontrarás consejos prácticos, reflexiones honestas y, sobre todo, una invitación a la acción. Este prefacio es la puerta de entrada a un futuro donde la ciencia nos pertenece a todos. Esperamos que, la lectura de este libro, te inspire a participar, a preguntar y a creer que tu contribución, por pequeña que parezca, es una pieza vital en la construcción de un mundo más sano y más justo. Porque el futuro de nuestro planeta no se escribirá en un laboratorio, sino en el corazón y las manos de cada persona dispuesta a cuidarlo.

*Chetumal, Quintana Roo, México
Noviembre, 2025
Javier Arellano-Verdejo*

Índice

Introducción	13
Ciencia ciudadana como catalizador en el monitoreo de los ecosistemas	17
Definición y principios fundamentales de la ciencia ciudadana ..	18
Historia y ejemplos de proyectos de ciencia ciudadana	20
El rol de los ciudadanos en la recolección de datos ambientales .	23
Conclusión	26
Referencias	28
Inteligencia artificial (IA) en el estudio de los ecosistemas	29
La IA como el cerebro analítico del ecosistema	30
Aplicaciones de la IA en el monitoreo de ecosistemas	32
Desafíos y consideraciones éticas	34
El futuro del monitoreo de ecosistemas con IA	35
Conclusión	37
Cuando la ciencia ciudadana y la inteligencia artificial se unen para proteger nuestras costas	39
El sargazo pelágico: una macroalga con historia y desafíos	40

El Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico	40
Impacto del sargazo en el Caribe mexicano	41
Desafíos en el monitoreo y gestión del sargazo	43
La necesidad de un enfoque integral y colaborativo	44
Conclusión	45
Referencias	46
Ciencia ciudadana y el monitoreo del sargazo: proyecto	
Collective View	47
Un enfoque pionero para el monitoreo del sargazo en playa	47
Objetivos de Collective View	49
Metodología del proyecto Collective View	50
Impactos y beneficios	51
Collective View y la inteligencia artificial	54
Génesis y evolución del proyecto Collective View	56
Productos clave del proyecto Collective View	59
Conclusión	60
Referencias	61
Integración de la IA en el monitoreo del sargazo	63
Desarrollo	63
Introducción a las metodologías para el monitoreo del sargazo . .	64
Índices para la detección de macroalgas flotantes	65
Algoritmos para la detección de macroalgas flotantes basados en aprendizaje automático	65
Redes neuronales artificiales en procesos de monitoreo de sargazo	67
Los legados de ERISNet	68
Redes neuronales para la segmentación de imágenes de sargazo .	68
Conclusión	69
Referencias	70

Desafíos y oportunidades en la sinergia de ciencia ciudadana e IA para el monitoreo de ecosistemas	71
Desafíos en la planeación	71
Desafíos en la implementación	73
Desafíos sociales para la integración de la ciencia ciudadana ...	75
Desafíos en la operación	76
Mantenimiento de la plataforma y soporte técnico	76
Generación de productos de retorno y retroalimentación	77
Sostenibilidad a largo plazo	78
Oportunidades futuras para el monitoreo de ecosistemas con IA .	78
Conclusión	80
Referencias	81
Recomendaciones para el desarrollo de proyectos de ciencia ciudadana para el monitoreo de ecosistemas	83
Diseño del proyecto	83
Implementación del proyecto	85
Análisis y divulgación de resultados	86
Recursos disponibles para la implementación de proyectos	88
Consideraciones en la recolección y manejo de datos	89
Conclusión	91
Despedida	93

Introducción

La humanidad se encuentra en un punto de inflexión ecológico y social. La velocidad y la magnitud de los cambios ambientales —desde la crisis climática hasta la extinción masiva de especies— exigen una respuesta científica que sea tan ágil y distribuida como los fenómenos que intentamos comprender. En este escenario, el monitoreo de ecosistemas se consolida como una herramienta crítica: un proceso sistemático para recolectar, analizar e interpretar datos con el fin de evaluar la salud de los sistemas naturales, detectar tendencias a largo plazo y servir como base para la toma de decisiones.

El caso del sargazo pelágico en el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico (GSBA) ilustra de forma dramática la insuficiencia de las metodologías convencionales. Este fenómeno, antes estacional, se ha convertido en una amenaza ecológica, turística y de salud pública en el Caribe, que requiere de un seguimiento diario, en tiempo real, desde el océano abierto hasta la línea de costa. La escala y la urgencia de este reto han puesto en evidencia una limitación fundamental: los métodos tradicionales han demostrado ser insuficientes frente a la velocidad del cambio ambiental.

Los métodos tradicionales de monitoreo, basados en campañas de monitoreo *in situ* intermitentes, muestreos manuales o el uso de infraestructura científica costosa, están intrínsecamente limitados. Su rigor es incuestionable, sin embargo, su limitación espacial y temporal impide obtener datos en la escala y frecuencia requeridas para abordar fenómenos dinámicos y globales. Un equipo de científicos solo puede estar en un número limitado de lugares a la vez, lo que genera ausencia de datos en el tiempo y el espacio geográfico.

Para intentar paliar esta deficiencia, la ciencia ha adoptado tecnologías de vanguardia, incluyendo la teledetección satelital, los sensores remotos y los drones. Estas herramientas ofrecen datos de alta resolución en tiempo casi real y cubren grandes áreas geográficas, como la detección del sargazo en mar abierto. No obstante, no ofrecen el nivel de detalle *in situ* necesario para la gestión costera, como la identificación precisa de la especie de sargazo o la cuantificación de su biomasa en la playa.

La verdadera evolución requiere superar la dependencia de una única fuente de información y adoptar un enfoque integral. Se necesita un sistema que sea: 1) distribuido, para cubrir toda la geografía relevante; 2) continuo, para capturar fenómenos dinámicos; y 3) eficiente, para procesar volúmenes masivos de datos con rapidez y precisión. Esta triple necesidad apunta directamente a la inteligencia colectiva, el nuevo paradigma que constituye la tesis central de este libro.

La solución al reto del monitoreo de ecosistemas reside en la sinergia de dos fuerzas disruptivas: la ciencia ciudadana (CC) y la inteligencia artificial (IA). Esta combinación ofrece una respuesta escalable, robusta y de bajo costo a la crisis de los datos ambientales, tal como lo ha demostrado la literatura reciente (Rick Bonney *et al.* (2014); Kullenberg y Kasperowski (2016); McClure *et al.* (2020)) y (Lazcano-Hernández *et al.* (2024)).

La ciencia ciudadana es el motor que resuelve el problema de la escala y la distribución geográfica. Esta metodología transforma al público general en una vasta red de sensores humanos, un ejército de colaboradores que pueden cubrir cientos o miles de kilómetros de costa o registrar observaciones en momentos críticos. El valor de la CC reside en su capacidad para generar un volumen de datos geográficamente distribuidos y de alta frecuencia, esenciales para el monitoreo en tiempo real. Esta participación masiva democratiza el conocimiento y aporta el invaluable conocimiento local y contextual que es invisible para los satélites o los modelos. Los fundamentos de esta metodología, su rigor y su valor como fuente de datos válidos serán explorados a lo largo de este libro.

Mientras la ciencia ciudadana se encarga de la recolección, la inteligencia artificial resuelve el problema del análisis eficiente. La IA es el cerebro analítico que dota de significado a los vastos y heterogéneos conjuntos de datos generados por los ciudadanos, sus capacidades son cruciales en las tareas de gran volumen de las cuales destacan dos:

Clasificación y reconocimiento automatizado: Los algoritmos de aprendizaje automático (*Machine Learning*) pueden procesar y clasificar miles de imágenes o registros en minutos, identificando patrones de especies, el estado de las algas o la turbidez del agua con una precisión comparable a la de un experto.

Modelado predictivo: La aplicación más disruptiva es la capacidad de la IA para usar datos históricos y en tiempo casi real para predecir eventos futuros, permitiendo a los gestores costeros anticipar las zonas de mayor arribo de sargazo o la probabilidad de una floración de algas nocivas.

Este libro narra el nacimiento y evolución del proyecto Collective View, el cual surge como la síntesis perfecta de esta inteligencia colectiva. Es una plataforma diseñada para que los datos recolectados por los ciudadanos sean el combustible directo para los modelos de inteligencia artificial. La IA, a su vez, proporciona conocimiento de retorno a la comunidad ciudadana, validando sus aportes y retroalimentando el ciclo de la información. Esta relación simbiótica maximiza la eficiencia, reduce el costo y mejora la precisión del monitoreo costero.

A lo largo de este libro, utilizaremos a Collective View como el hilo conductor y caso de estudio que valida esta tesis. Exploraremos sus desafíos de implementación, las soluciones técnicas que adoptó y los resultados concretos que ha entregado a la gestión ambiental. La historia de Collective View demuestra que la unión de la ciencia ciudadana y la inteligencia artificial no es una utopía tecnológica, sino el camino más robusto y viable para construir un monitoreo ambiental integral, adaptable y al servicio de la acción inmediata.

Referencias

- Rick Bonney et al.(2014). Next Steps for Citizen Science. *Science* 343, 1436-1437. DOI:10.1126/science.1251554
- Kullenberg, C., & Kasperowski, D. (2016). What Is Citizen Science? – A Scientometric Meta-Analysis. *PLoS One* 11, (1), e0147152. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147152>
- McClure, E. C., Sievers, M., Brown, C. J., Buelow, C. A., Ditria, E. M., Hayes, M. A., Pearson, R. M., Tulloch, V. J., Unsworth, R. K., & Connolly, R. M. (2020). Artificial Intelligence Meets Citizen

Science to Supercharge Ecological Monitoring. *Patterns*, 1(7), 100109.
<https://doi.org/10.1016/j.patter.2020.100109>

Lazcano Hernández, H. E., Arellano Verdejo, J., y Vázquez Delfín, E. F. (2024). Percepción remota y ciencia ciudadana. En J. Arellano Verdejo, H. E. Lazcano Hernández y M. E. Callejas Jiménez (Eds.), *Una breve introducción a la percepción remota* (pp. 105–117). El Colegio de la Frontera Sur. <http://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1017/2747>

Ciencia ciudadana como catalizador en el monitoreo de los ecosistemas

En las últimas décadas, la investigación ambiental ha experimentado una transformación significativa, impulsada en buena medida por la creciente participación de las personas en la recolección de datos y en la generación de conocimiento científico. Este movimiento, conocido como ciencia ciudadana, ha permitido a gente de todo el mundo colaborar en proyectos científicos de gran envergadura, aportando sus observaciones, tiempo y esfuerzos para ayudar a resolver problemas ambientales críticos.

La ciencia ciudadana no es, en esencia, un concepto nuevo; sus raíces se hunden en las primeras exploraciones científicas en las que aficionados y naturalistas contribuían a la ciencia natural con sus observaciones. Sin embargo, con el vertiginoso avance de la tecnología y el acceso generalizado a herramientas digitales, la ciencia ciudadana ha tomado un papel central y revolucionario en la investigación moderna. Ahora cualquier persona con un dispositivo móvil o acceso a internet puede contribuir a proyectos de gran escala, desde el seguimiento de especies en peligro de extinción hasta la medición de la calidad del aire en áreas urbanas.

Este modelo participativo ha democratizado la ciencia, haciéndola accesible para un público mucho más amplio, y ha acrecentado enormemente la capacidad de los científicos para recolectar datos en una escala y resolución sin precedentes. En lugar de solo depender de equipos científicos limitados en número y alcance, los proyectos de ciencia ciudadana pueden aprovechar las capacidades colectivas de miles, o incluso millones, de voluntarios en todo el mundo. Uno de los mayores impactos de la ciencia ciudadana en la investigación ambiental es que genera datos en tiempo real y de manera continua. Por ejemplo, en el monitoreo de fenómenos ambientales, como

la migración de aves, el florecimiento de plantas o la aparición de eventos climáticos extremos, la ciencia ciudadana permite un seguimiento más dinámico y adaptativo, lo que proporciona a los investigadores una fuente constante de información actualizada.

Además de sus beneficios en la recolección de datos, la ciencia ciudadana desempeña un papel de primer orden en la sensibilización y educación ambiental. Al participar en proyectos científicos, los ciudadanos desarrollan una mayor comprensión y apreciación por el entorno natural, lo que se traduce en una mejor disposición a tomar medidas para su conservación. Esta conexión directa entre el conocimiento científico y la acción comunitaria es uno de los aspectos más valiosos de la ciencia ciudadana, ya que fomenta una cultura de sostenibilidad y responsabilidad ambiental. No obstante, este tipo de ciencia enfrenta desafíos significativos. La calidad de los datos recolectados, la formación de los voluntarios y la gestión de grandes volúmenes de información son cuestiones que deben abordarse para asegurar que los proyectos de ciencia ciudadana sean efectivos y confiables. La correcta integración de estos datos en estudios científicos rigurosos requiere de una planificación cuidadosa y de metodologías robustas que minimicen el sesgo y la variabilidad.

En este capítulo, exploraremos la evolución de la ciencia ciudadana, su papel en la investigación ambiental contemporánea, y cómo ha revolucionado la forma en que entendemos y monitoreamos el mundo natural. También examinaremos casos de éxito en los que es la principal protagonista para la conservación de ecosistemas y en la respuesta a crisis ambientales. A medida que avancemos, veremos cómo esta colaboración entre ciudadanos y científicos amplía el alcance de la investigación y fortalece el vínculo entre la sociedad y la ciencia, creando un frente unido en la protección de nuestro planeta.

Definición y principios fundamentales de la ciencia ciudadana

La ciencia ciudadana es un enfoque participativo de la investigación científica que involucra a todas las personas en general, de modo que, aunque no tengan una formación científica formal, pueden apoyar en las tareas de recolección, análisis e interpretación de datos. Este modelo de

investigación colaborativa se basa en la idea de que la ciencia no debe ser exclusiva de laboratorios o instituciones académicas, sino que puede y debe ser una empresa colectiva donde cualquier interesada o interesado contribuye activamente al avance del conocimiento. La ciencia ciudadana permite a las comunidades participar directamente en la investigación, abre un diálogo bidireccional entre científicos y ciudadanos, y fomenta una comprensión más amplia y profunda de los temas científicos que nos afectan a todos.

En su esencia, la ciencia ciudadana se fundamenta en varios principios clave que aseguran su eficacia e impacto positivo:

- **Inclusividad:** Este principio promueve la participación de individuos de diversos orígenes y niveles de experiencia. El razonamiento subyacente es que el conocimiento no se limita a la academia, sino que reside también en las experiencias cotidianas y en las observaciones meticulosas de cualquier persona. La inclusividad enriquece la diversidad de perspectivas en un proyecto y democratiza la ciencia, haciéndola accesible y relevante para un público más amplio y diverso.
- **Colaboración:** La naturaleza colaborativa de estos proyectos fomenta el trabajo conjunto entre científicos profesionales y ciudadanos. Esta sinergia lleva a la generación de nuevas ideas y enfoques innovadores para abordar problemas complejos, aprovechando la inteligencia colectiva. Este principio de colaboración contribuye a construir una red de apoyo mutuo, donde ciudadanos y científicos comparten conocimientos, habilidades y recursos, fortaleciendo así la calidad de la investigación y a la comunidad científica en general.
- **Transparencia:** Es fundamental que, en estos proyectos, los métodos, los datos recolectados y los resultados obtenidos se encuentren disponibles y sean comprensibles para todos los participantes. La transparencia aumenta la confianza en la investigación y sus hallazgos, y consigue que los ciudadanos vean el impacto directo de su contribución en los resultados del proyecto. Este acceso abierto a la información promueve un sentido de propiedad y un mayor compromiso, lo que lleva a una participación más sostenida y a una difusión más amplia del conocimiento generado.
- **Educación:** A través de su participación, los ciudadanos tienen la invaluable oportunidad de aprender sobre métodos científicos, desarrollar nuevas habilidades de observación y análisis, y adquirir un mayor en-

tendimiento de los problemas ambientales o científicos que se están investigando. Este proceso educativo es inherentemente bidireccional: los científicos aprenden de las observaciones y los valiosos conocimientos locales aportados por los ciudadanos, lo que enriquece y contextualiza los resultados de la investigación con una perspectiva única del terreno.

- **Aplicabilidad:** La aplicabilidad de los resultados es un principio decisivo en la ciencia ciudadana. Los proyectos suelen estar orientados a resolver problemas concretos y urgentes a nivel local, regional o incluso global. Los datos recolectados por los ciudadanos no solo contribuyen al avance del conocimiento científico, también tienen un impacto directo en la toma de decisiones y en la implementación de políticas públicas más informadas y efectivas. La ciencia ciudadana, por tanto, busca generar conocimiento, y además transformarlo en acciones prácticas que beneficien directamente a la sociedad y al medio ambiente.

En conjunto, estos principios hacen de la ciencia ciudadana un enfoque poderoso y transformador para abordar los desafíos ambientales y sociales del mundo actual. Al abrir las puertas de la ciencia a la participación ciudadana, se crea un puente vital entre el conocimiento científico y la acción comunitaria, lo que fomenta una sociedad más informada, comprometida y capaz de enfrentar colectivamente los retos del futuro con una base sólida y colaborativa.

Historia y ejemplos de proyectos de ciencia ciudadana

La historia de la ciencia ciudadana está profundamente entrelazada con el desarrollo de la ciencia misma, remontándose a épocas en las que la separación entre “científicos” y “ciudadanos” no estaba tan claramente definida como hoy. Desde los primeros naturalistas que exploraban el mundo y documentaban sus descubrimientos, hasta los proyectos globales contemporáneos que utilizan tecnologías avanzadas para reunir datos de miles de colaboradores, la ciencia ciudadana ha desempeñado una labor esencial en la construcción del conocimiento y la comprensión de nuestro entorno.

En la Edad Media y el Renacimiento, la ciencia era, en gran medida, una actividad individual o de pequeños grupos de aficionados que obser-

vaban la naturaleza y realizaban experimentos motivados por la curiosidad y el amor al conocimiento. Ya en el siglo XIX, naturalistas de renombre como Charles Darwin y Alfred Russel Wallace, aunque posteriormente se convirtieron en figuras prominentes de la ciencia, comenzaron sus carreras como observadores apasionados de la naturaleza, recolectando especímenes y registrando los datos de manera sistemática, pero fuera del marco de una institución científica formal. Este tipo de trabajo sentó las bases para lo que hoy entendemos como ciencia ciudadana, donde el compromiso y la observación meticulosa de individuos no formados profesionalmente en ciencia son fundamentales para la creación de nuevo conocimiento.

Uno de los primeros ejemplos notables de ciencia ciudadana en la era moderna, y que aún perdura, es el proyecto de conteo de aves navideñas (National Audubon Society, n.d.), que comenzó en 1900 en Estados Unidos. Organizado por la Sociedad Nacional Audubon, este proyecto surgió como una alternativa ética a la práctica común de la época, que consistía en realizar competencias de caza de aves durante las fiestas navideñas. En lugar de cazar, los participantes se dedicaron a contar las especies de aves que observaban en sus regiones. Este esfuerzo, que comenzó con apenas 27 observadores en 25 áreas diferentes, se ha convertido en uno de los proyectos de ciencia ciudadana más grandes y duraderos del mundo, el cual hoy involucra a decenas de miles de voluntarios en más de dos mil áreas. Los datos recolectados a lo largo de más de un siglo han sido fundamentales para el estudio de las tendencias poblacionales de las aves en América del Norte, y ha proporcionado una invaluable base de datos para los ecólogos y conservacionistas.

A medida que avanzaba el siglo XX, la ciencia ciudadana comenzó a tomar una forma más estructurada, con proyectos que buscaban integrar la participación del público de manera más directa y sistemática. Un ejemplo significativo es el proyecto de monitoreo de las mariposas en el Reino Unido, el “UK Butterfly Monitoring Scheme” (UK Butterfly Monitoring Scheme, n.d.), que comenzó en 1976. Este involucra a voluntarios en la recolección de datos sobre la abundancia y distribución de mariposas en diversas localidades, y proporciona información crucial sobre los efectos del cambio climático y la pérdida de hábitat para estas especies. Al mismo tiempo, ha permitido que miles de personas conecten con la naturaleza y contribuyan activamente a la conservación de la biodiversidad.

Con la llegada de la era digital y el auge de internet a finales del siglo XX y principios del XXI, la ciencia ciudadana experimentó una transformación radical. Las tecnologías de comunicación digital hicieron posible la participación de un número mucho mayor de personas y una recolección de datos sin precedentes. Una de las plataformas pioneras y más influyentes en este sentido fue eBird, lanzada en 2002 por el laboratorio de ornitología de Cornell. Esta plataforma permite a los observadores de aves de todo el mundo registrar sus avistamientos en una base de datos global. Con más de cien millones de registros al año, eBird se ha convertido en una vital herramienta para la investigación ornitológica, utilizada para estudiar desde las migraciones de aves hasta los impactos del cambio climático en sus poblaciones.

Otro ejemplo destacado de ciencia ciudadana en la era digital es Zooniverse (Zooniverse, n.d.), una plataforma lanzada en 2007 que ha revolucionado la manera en que se realiza la investigación científica en diversos campos. Zooniverse permite a los ciudadanos participar en proyectos tan variados como la clasificación de galaxias en el proyecto Galaxy Zoo, la transcripción de manuscritos antiguos en el proyecto Ancient Lives y la identificación de especies en fotos de la fauna salvaje en el proyecto Snapshot Serengeti. Lo que hace única a Zooniverse es su capacidad para dividir grandes cantidades de datos en tareas manejables que pueden ser realizadas por voluntarios de todo el mundo, permitiendo así a los científicos abordar preguntas que serían imposibles de resolver sin la ayuda de la multitud. En Galaxy Zoo, por ejemplo, los ciudadanos ayudaron a clasificar más de un millón de galaxias en su primer año, proporcionando un conjunto de datos que ha sido utilizado en más de cincuenta publicaciones científicas.

En el ámbito del monitoreo ambiental, un proyecto emblemático es el programa Global Learning and Observations to Benefit the Environment (GLOBE Program, n.d.), que comenzó en 1995 con el apoyo de la NASA y otras agencias científicas. GLOBE involucra a estudiantes, profesores y ciudadanos en la recolección de datos ambientales sobre la atmósfera, el agua, los suelos y la biota, contribuyendo así a la comprensión de los procesos globales que afectan a nuestro planeta. Los datos recolectados a través de GLOBE han sido utilizados en investigaciones sobre el cambio climático, la calidad del aire y la salud de los ecosistemas acuáticos, de-

mostrando el poder de la ciencia ciudadana para contribuir al conocimiento global.

Uno de los proyectos de ciencia ciudadana más recientes y ambiciosos es el atlas de biodiversidad del suelo de la Unión Europea, lanzado en 2020, que busca mapear la biodiversidad en toda Europa utilizando datos recolectados por ciudadanos. Este proyecto combina la recolección de datos en el campo con tecnologías avanzadas de inteligencia artificial para analizar y modelar la distribución de especies en un continente que enfrenta grandes desafíos ambientales debido al cambio climático y la urbanización. Al involucrar a ciudadanos en la recolección y análisis de datos, este atlas no solo proporciona información esencial para la conservación de especies, sino que también sensibiliza al público sobre la importancia de la biodiversidad y las amenazas que enfrenta.

Como se advierte, la ciencia ciudadana ha demostrado ser una herramienta poderosa para la recolección de datos, la sensibilización pública y la toma de decisiones informadas en la gestión ambiental. Desde sus inicios en la observación naturalista hasta su integración en proyectos globales de alta tecnología, la ciencia ciudadana ha ampliado las fronteras de la investigación científica, involucrando a millones de personas en la creación de conocimiento y la protección del planeta. Con cada nuevo proyecto, esta forma de la ciencia sigue evolucionando, adaptándose a las necesidades del mundo moderno y aprovechando las capacidades tecnológicas para enfrentar los desafíos ambientales de nuestro tiempo.

El rol de los ciudadanos en la recolección de datos ambientales

En el contexto de la ciencia ciudadana, la sociedad civil desempeña un papel fundamental en la recolección de datos ambientales, aportando una dimensión de escala y profundidad que sería imposible de alcanzar exclusivamente por científicos profesionales. La participación de personas comunes permite una cobertura geográfica y temporal mucho más amplia, lo que es esencial para entender fenómenos ambientales que pueden variar enormemente de un lugar a otro y de un momento a otro. Este rol de quienes participan no se limita a la recolección de datos, también implica

responsabilidades y oportunidades que son fundamentales para el éxito de la ciencia ciudadana.

El proceso de recolección de datos ambientales por parte de los ciudadanos suele comenzar con la capacitación y orientación proporcionada por los organizadores del proyecto. Este paso es crucial, ya que asegura que los voluntarios estén bien preparados para llevar a cabo de manera precisa y consistente las tareas asignadas. Los ciudadanos aprenden a utilizar herramientas y técnicas que van desde simples observaciones a ojo desnudo hasta el manejo de equipos más sofisticados, como aplicaciones móviles, cámaras de alta resolución o incluso sensores portátiles. Esta formación aumenta la calidad de los datos recolectados, y empodera a los ciudadanos al proporcionarles nuevas habilidades y conocimientos sobre los ecosistemas que están estudiando.

Una vez capacitados, los ciudadanos pueden comenzar a recolectar datos en sus propios entornos, lo que les permite contribuir a la ciencia sin necesidad de desplazarse a sitios remotos o inaccesibles. Este acceso a áreas diversas y distribuidas geográficamente es uno de los mayores beneficios de la ciencia ciudadana. Los participantes monitorean sus propios vecindarios, parques locales, ríos, costas y otros lugares de interés ambiental, recopilando datos que reflejan la variabilidad local y regional en los fenómenos estudiados. Este tipo de recolección de datos es particularmente valioso en áreas donde los recursos científicos son limitados o donde el acceso frecuente por parte de investigadores profesionales es difícil o costoso.

Los datos ambientales recolectados por los ciudadanos suelen ser variados y pueden incluir observaciones sobre la flora y fauna, la calidad del aire y del agua, los patrones meteorológicos, los niveles de contaminación y muchos otros aspectos del entorno natural. Por ejemplo, en proyectos de monitoreo de la biodiversidad, los ciudadanos registran avistamientos de especies animales o vegetales, documentando su ubicación, comportamiento y otros detalles relevantes. Datos que eventualmente son esenciales para rastrear cambios en la distribución de especies, en la identificación de áreas críticas para la conservación o para detectar la presencia de especies invasoras y amenazantes para los ecosistemas locales. En el contexto de la calidad del aire y el agua, los ciudadanos recolectan muestras que luego se analizan en laboratorios o utilizan dispositivos portátiles para medir parámetros como los niveles de partículas, la temperatura del agua o la

presencia de contaminantes. Este tipo de monitoreo es del todo importante en áreas urbanas, donde la contaminación varía significativamente de un barrio a otro y donde la vigilancia constante es necesaria para proteger la salud pública. Al involucrar a los ciudadanos en la recolección de estos datos, los proyectos de ciencia ciudadana son capaces de proporcionar información en tiempo real que es útil para tomar decisiones informadas y para movilizar a las comunidades en pro de proteger al medio ambiente.

Además de su papel en la recolecta de datos, los ciudadanos contribuyen al proceso de verificación y validación de esta información. En muchos proyectos de ciencia ciudadana, los datos recogidos por diferentes voluntarios se comparan y revisan para asegurar su precisión y consistencia. Esta verificación pueden realizarla otros ciudadanos dentro de la comunidad del proyecto, o por científicos profesionales que supervisan el estudio. Este proceso colaborativo mejora la calidad de los datos y refuerza la comunidad de ciencia ciudadana, fomentando de este modo un sentido de responsabilidad compartida y de pertenencia.

El papel de los ciudadanos en la recolección de datos ambientales incluye la retroalimentación continua con los científicos y otros participantes del proyecto. A través de plataformas digitales y reuniones comunitarias, los ciudadanos comparten sus observaciones, discuten sus experiencias y aprenden de los datos recuperados por otros. Esta interacción constante entre ciudadanos y científicos crea un flujo bidireccional de conocimiento, donde las observaciones locales permiten informar y refinar las hipótesis científicas, en tanto que los ciudadanos adquieren una comprensión más profunda de los fenómenos que están estudiando.

La motivación detrás de la participación de los ciudadanos para recolectar de datos ambientales es variada, pero a menudo forma parte de un fuerte deseo de contribuir a la conservación del medio ambiente y de participar en el esfuerzo colectivo para mejorar la comprensión de los ecosistemas. Los ciudadanos frecuentemente se sienten empoderados por su capacidad para influir en la ciencia y en la toma de decisiones que afectan a sus comunidades y al mundo en general. Este sentido de propósito es un poderoso motor para el éxito de los proyectos de ciencia ciudadana, lo que asegura un compromiso sostenido y una alta calidad en la recolección de datos.

Por otro lado, la participación en la recolección de datos ambientales a través de la ciencia ciudadana puede tener un impacto duradero en la percepción y comportamiento de los ciudadanos en relación con el medio

ambiente. A medida que se involucran más profundamente en la observación y monitoreo de la naturaleza, es común que los ciudadanos desarrollen una mayor conciencia y aprecio por los ecosistemas que los rodean. Este cambio en la percepción lleva a acciones concretas, como la adopción de prácticas más sostenibles, la participación en esfuerzos de conservación o la defensa de políticas públicas que protejan el medio ambiente.

Conclusión

La ciencia ciudadana ha emergido como una fuerza poderosa e indispensable en la investigación ambiental, transformando la manera en que se recopilan y analizan los datos y cómo se aborda la conservación de los ecosistemas a nivel global. Abrir las puertas de la investigación científica a la participación de ciudadanos comunes, ha democratizado el proceso de generación de conocimiento, promoviendo que personas de todas partes del mundo se involucren directamente en la protección del medio ambiente. Este enfoque inclusivo enriquece la ciencia con una diversidad de perspectivas y experiencias, y amplía significativamente la escala y el alcance de la investigación ambiental, haciendo posible el monitoreo continuo y detallado de fenómenos naturales en regiones que de otro modo serían inaccesibles o estarían desatendidas.

El impacto de la ciencia ciudadana en la investigación ambiental es multifacético y profundo. En primer lugar, ha permitido la creación de vastos conjuntos de datos que son esenciales para entender los cambios en los ecosistemas a lo largo del tiempo y en diferentes geografías. Estos datos, recolectados por miles o incluso millones de personas, proporcionan una base empírica que los científicos utilizan para detectar tendencias, identificar amenazas emergentes y evaluar la efectividad de las políticas de conservación. Al involucrar a los ciudadanos en la recolección de datos, la ciencia ciudadana contribuye a la creación de un conocimiento más robusto y preciso, y permite una vigilancia ambiental continua y omnipresente, algo imposible de lograr solo con recursos científicos tradicionales.

Por otra parte, la ciencia ciudadana ha sido fundamental para fomentar una mayor conciencia y educación ambiental en la sociedad. A través de su participación en proyectos científicos, los ciudadanos adquieren nuevas habilidades y conocimientos, a la vez que desarrollan un mayor sentido de

responsabilidad en relación con el medio ambiente. Esta transformación en la conciencia colectiva tiene un efecto multiplicador, ya que los participantes de la ciencia ciudadana a menudo se convierten en defensores activos de la conservación y en agentes de cambio dentro de sus propias comunidades. El resultado es una sociedad más informada y comprometida, capaz de tomar decisiones más sostenibles y de abogar por políticas públicas que protejan los recursos naturales y la biodiversidad.

La ciencia ciudadana también ha desafiado y ampliado las fronteras de la investigación científica tradicional. Al integrar las observaciones y el conocimiento local de los ciudadanos en el proceso de investigación, los científicos han podido abordar preguntas de investigación desde nuevas perspectivas y con un enfoque más holístico. Este diálogo entre la ciencia académica y el conocimiento popular enriquece el proceso científico, haciendo que las investigaciones sean más relevantes y aplicables a las realidades locales. La ciencia ciudadana, por tanto, contribuye a la generación de conocimiento, y facilita la implementación de soluciones prácticas y contextualizadas para los problemas ambientales.

El éxito de la ciencia ciudadana en la investigación ambiental subraya la importancia de la colaboración y la participación en la ciencia. A medida que enfrentamos desafíos ambientales cada vez más complejos, como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la contaminación, es esencial que aprovechemos todos los recursos disponibles, incluidos los conocimientos y habilidades de la ciudadanía global. La ciencia ciudadana ofrece una vía poderosa para canalizar este potencial colectivo, permitiendo que personas de todos los ámbitos de la vida contribuyan al avance de la ciencia y a la protección de nuestro planeta.

Hemos visto cómo la ciencia ciudadana, con su red de ojos vigilantes extendida por todo el planeta, ha revolucionado la forma en que recolectamos datos ambientales, permitiéndonos abarcar una escala y una granularidad sin precedentes. La pasión y el compromiso de miles de individuos han democratizado la observación, generando una avalancha de información invaluable sobre la salud de nuestros ecosistemas. Sin embargo, la acumulación de estos vastos volúmenes de datos, provenientes tanto de la participación ciudadana como de sensores avanzados, nos lleva inevitablemente a la siguiente pregunta: ¿cómo podemos darle sentido a esta marea de información, transformar los millones de observaciones en conocimiento accionable y desentrañar los patrones ocultos que nos permitan comprender

y proteger mejor nuestro entorno? Es aquí donde la inteligencia artificial emerge como el cerebro analítico indispensable, como la herramienta capaz de procesar, interpretar y amplificar la sabiduría contenida en cada bit de dato, lo que lleva al monitoreo de ecosistemas a una nueva era de precisión y predicción, un tema que exploraremos en profundidad en el siguiente capítulo.

Referencias

- National Audubon Society. (n.d.). Christmas Bird Count. Audubon. <https://www.audubon.org/community-science/christmas-bird-count>
- GLOBE Program. (n.d.). Global Learning and Observations to Benefit the Environment. <https://www.globe.gov/>
- UK Butterfly Monitoring Scheme. (n.d.). UKBMS: Monitoring butterfly populations across the UK. <https://ukbms.org/>
- Zooniverse. (n.d.). People-powered research. <https://www.zooniverse.org/>

Inteligencia artificial (IA) en el estudio de los ecosistemas

En el capítulo anterior, analizamos el poder de la ciencia ciudadana y cómo la participación colectiva de individuos apasionados ha democratizado la recopilación de datos, extendiendo nuestros “ojos vigilantes” a lo largo y ancho de vastos territorios. Descubrimos que, aunque la tecnología nos dota de herramientas sofisticadas, la presencia humana, con su capacidad de observación detallada, conocimiento local y un compromiso inquebrantable, es insustituible para comprender las sutilezas de nuestros ecosistemas. Pero ¿qué ocurre una vez que esos océanos de datos recolectados por satélites, sensores automatizados o los propios ciudadanos, comienzan a inundar nuestros sistemas? ¿Cómo podemos dar sentido a tal volumen de información, extraer patrones ocultos y transformarlos en conocimiento accionable para la conservación?

Aquí es donde la inteligencia artificial (IA) llega para complementar y elevar a un nuevo nivel el monitoreo de los ecosistemas. Si la ciencia ciudadana nos proporciona una red de observación vasta y granular, la IA es el cerebro que procesa, interpreta y amplifica la información contenida en cada observación. En los últimos años, esta tecnología ha irrumpido con una fuerza sin precedentes en el estudio de nuestros entornos naturales, transformando radicalmente la manera en que entendemos, monitoreamos y gestionamos la compleja trama de la vida en la Tierra. Ha pasado de ser una herramienta reservada para aplicaciones científicas altamente especializadas a convertirse en un recurso accesible y adaptable, capaz de abordar algunos de los desafíos ambientales más intrincados de nuestro tiempo.

Desde la predicción del cambio climático y la modelización de ecosistemas, hasta la identificación de especies en peligro de extinción y la

detección temprana de contaminantes, la IA ofrece capacidades nuevas y potentes para manejar y analizar grandes cantidades de datos, convirtiéndolos en información valiosa y, lo más importante, en conocimiento. Este capítulo se adentra en el fascinante mundo de la inteligencia artificial aplicada a la ecología, para explorar cómo sus diversas ramas —desde el aprendizaje automático hasta la visión por computadora— están abriendo horizontes que antes eran inimaginables, y cómo su integración con la ciencia ciudadana está gestando una revolución en la conservación ambiental.

La IA como el cerebro analítico del ecosistema

La incorporación de la IA en el monitoreo de los ecosistemas responde a una necesidad imperante: procesar, analizar e interpretar las enormes cantidades de datos ambientales que generamos permanentemente. Esta información proviene de fuentes diversas: sensores remotos en satélites y drones, redes de sensores terrestres y acuáticos, grabaciones de sonido, imágenes de cámaras trampa, e incluso de las observaciones y registros ciudadanos. Sin la IA, la tarea de transformar esta vasta e incesante corriente de información en conocimiento útil sería abrumadora, si no imposible, para los métodos de análisis tradicionales.

La IA, en esencia, confiere a los sistemas informáticos la capacidad de “aprender” de los datos sin ser programados explícitamente para cada tarea. Esto significa que pueden identificar patrones, hacer predicciones y tomar decisiones basándose en la información que se les presenta, adaptándose y mejorando con cada nuevo conjunto de datos. En el contexto ambiental, esto se traduce en una aptitud sin precedentes para:

- **Procesar y analizar datos a una escala masiva:** La IA puede manejar gigabytes y terabytes de información en minutos u horas, una tarea que a los humanos o a métodos convencionales les llevaría meses o años.
- **Identificar patrones ocultos:** A menudo, las relaciones complejas entre variables ambientales no son evidentes a simple vista. Los algoritmos de IA tienen la capacidad de descubrir correlaciones sutiles y tendencias emergentes que son cruciales para entender la dinámica de los ecosistemas.
- **Mejorar la precisión y la eficiencia:** Al automatizar tareas repetitivas y al ser capaces de aprender de sus errores, los sistemas de IA adquieren

la habilidad de realizar análisis con precisión superior y en una fracción del tiempo que requerirían los métodos manuales.

En el corazón de muchas aplicaciones de la IA en ecología se encuentran los algoritmos de aprendizaje automático, esto es, el *Machine Learning* (ML). Estos algoritmos permiten a los sistemas mejorar su rendimiento en una tarea específica a medida que se les expone a más datos. Dentro del ML, las redes neuronales artificiales (ANNs, por sus siglas en inglés: *artificial neural networks*), inspiradas en la estructura del cerebro humano, han demostrado ser particularmente potentes. Al procesar información a través de capas interconectadas de “neuronas” artificiales, estas redes aprenden a reconocer patrones complejos, a clasificar datos y a generar nuevas predicciones.

Un ejemplo elocuente de su impacto es la capacidad de las redes neuronales para analizar imágenes satelitales a gran escala. Tradicionalmente, la detección de la deforestación o los cambios en el uso del suelo requerían de la interpretación manual de imágenes por expertos, un proceso lento y propenso a errores. Ahora, las ANNs pueden ser entrenadas con miles de imágenes etiquetadas, por ejemplo, “bosque sano”, “área deforestada”, “zona urbana”, etc., adquiriendo así la capacidad de identificar y mapear estos cambios con una velocidad y precisión asombrosas en vastas extensiones de terreno, como la Amazonía. Ello proporciona información en tiempo casi real que es vital para la toma de decisiones urgentes en conservación.

La IA no es solo una herramienta para analizar datos existentes; también está impulsando la siguiente generación de modelos predictivos. Al aprender de datos históricos sobre clima, biodiversidad y actividad humana, los algoritmos de IA proyectan escenarios futuros, ayudando a científicos y formuladores de políticas a anticipar los efectos del cambio climático, la propagación de especies invasoras o la viabilidad de poblaciones animales. Esta capacidad predictiva es un cambio de paradigma que nos permite pasar de reaccionar a los problemas ambientales a proactivamente mitigarlos. La IA se está consolidando como una herramienta indispensable para el monitoreo de ecosistemas. Al potenciar la eficiencia, precisión y capacidad predictiva del análisis de datos, proporciona una visión sin precedentes de la salud de nuestro planeta, equipándonos con el conocimiento para enfrentar los complejos desafíos ambientales. Su integración con otras fuentes de datos y, como veremos, con la participación humana, promete revolucionar la ciencia de la conservación.

Aplicaciones de la IA en el monitoreo de ecosistemas

La versatilidad de la inteligencia artificial permite su aplicación en una amplia gama de tareas dentro del monitoreo ambiental, cada una contribuyendo a una comprensión más profunda y a una gestión más efectiva de nuestros recursos naturales. Uno de los campos donde la IA ha impactado más notablemente es en la detección y clasificación de especies. Tradicionalmente, identificar y contar organismos en un ecosistema es una tarea laboriosa, que requiere de expertos y de mucho tiempo en campo. Sin embargo, los algoritmos de aprendizaje profundo (*deep learning*), una rama del aprendizaje automático, han transformado esta tarea. Estos algoritmos se entrenan con inmensos conjuntos de datos de imágenes, videos o grabaciones de sonido de diversas especies. Una vez entrenados, pueden reconocer características distintivas y clasificar automáticamente a los individuos.

Por ejemplo, las cámaras trampa, ampliamente utilizadas en la investigación de fauna, generan millones de imágenes. Revisarlas manualmente para identificar la presencia de jaguares, venados o aves específicas es una tarea monumental. Sin embargo, los sistemas de visión por computadora basados en IA procesan estas imágenes, identificando y etiquetando las especies, incluso contando individuos y registrando comportamientos. Esto entrega a los ecólogos datos de abundancia, distribución y actividad de la fauna a escala y velocidad antes inalcanzables, facilitando la creación de censos de biodiversidad más precisos.

De manera similar, en el ámbito de la bioacústica, los algoritmos de IA analizan grabaciones de sonido ambiental para identificar cantos de aves, vocalizaciones de mamíferos o sonidos de insectos, informando sobre la presencia y actividad de especies difíciles de observar directamente. Esto es crucial para monitorear poblaciones en áreas densamente vegetadas o en ambientes marinos, donde la observación visual es limitada.

Por otro lado, la IA se ha convertido en una herramienta indispensable para el seguimiento de los cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal, fenómenos que impactan directamente en la salud de los ecosistemas y el clima global. Al analizar imágenes de satélite de alta resolución y datos de teledetección, los algoritmos de aprendizaje automático identifican y clasifican los diferentes tipos de cobertura terrestre: áreas urbanizadas, cultivos agrícolas, bosques, cuerpos de agua o zonas deforestadas.

Estos algoritmos se entrenan utilizando imágenes históricas y actuales, junto con información geoespacial verificada. Una vez entrenados, detectan automáticamente la expansión urbana descontrolada, la deforestación de nuestros pulmones verdes, la intrusión de la agricultura en zonas protegidas o los cambios en los cuerpos de agua, como la sequía o la proliferación de algas. La capacidad de la IA para procesar rápidamente secuencias temporales de imágenes satelitales permite un monitoreo de estos cambios casi en tiempo real, ofreciendo una alerta temprana sobre amenazas ambientales y apoyando la toma de decisiones rápidas para la conservación y planificación territorial.

Además, mediante modelos predictivos basados en datos históricos de uso del suelo, clima, demografía y políticas, los algoritmos pueden proyectar escenarios futuros de cambio. Esto ayuda a los planificadores y gestores ambientales a anticipar posibles impactos, como la pérdida de hábitat o la vulnerabilidad ante desastres naturales, y a desarrollar estrategias proactivas de mitigación y adaptación. Por ejemplo, en la Amazonía, la IA se utiliza para predecir dónde es más probable que ocurra la deforestación ilegal, lo que ayuda a las autoridades a identificar hacia dónde dirigir sus esfuerzos de patrullaje.

La IA también juega un papel vital en la evaluación de la salud general de los ecosistemas. Mediante el análisis de datos multivariados (combinando información de sensores climáticos, calidad del agua, biodiversidad, etc.), los algoritmos identifican indicadores de estrés ambiental, como la contaminación, la degradación del suelo o la aparición de enfermedades. Por ejemplo, en los ecosistemas marinos, la IA analiza imágenes satelitales y datos de sensores para detectar la proliferación de floraciones algales nocivas o la acidificación de los océanos, alertando a los científicos y a las autoridades pesqueras sobre posibles impactos negativos.

En el ámbito de la gestión de incendios forestales, la IA se utiliza para predecir el riesgo de incendios basándose en condiciones meteorológicas, topografía y vegetación, y para modelar la propagación del fuego una vez iniciado, lo que optimiza la respuesta de los bomberos. La capacidad de la IA para integrar y analizar datos de diversas fuentes la convierte en una herramienta invaluable para un diagnóstico integral y oportuno de la salud de los ecosistemas.

Desafíos y consideraciones éticas

Aunque la inteligencia artificial promete una revolución en el estudio y monitoreo de los ecosistemas, su implementación no está exenta de desafíos y consideraciones éticas que deben abordarse para garantizar su uso responsable y beneficioso.

Uno de los principales desafíos es la calidad y disponibilidad de los datos. Los algoritmos de IA, especialmente los de aprendizaje profundo, requieren grandes conjuntos de datos de alta calidad para ser entrenados de manera efectiva. En el ámbito ambiental, esto llega a ser un obstáculo. Los datos pueden ser escasos, inconsistentes o estar sesgados geográficamente. Mientras que la falta de datos históricos a largo plazo o de cobertura en regiones remotas limita la eficacia de los modelos predictivos. Es fundamental invertir en la recopilación sistemática de datos ambientales y en el desarrollo de estándares para su formato y acceso.

Otro desafío significativo es el sesgo en los algoritmos. Estos aprenden de los datos que se les proporcionan, y si los de entrenamiento contienen sesgos (por ejemplo, si provienen predominantemente de ciertas regiones o reflejan prejuicios humanos en la clasificación), el resultado será que el algoritmo perpetúa y amplifica los sesgos en sus predicciones. En la conservación, esto lleva a que ciertos ecosistemas o especies sean monitoreados con menos precisión, o a que se ignoren las necesidades de comunidades locales. La transparencia y auditabilidad de los algoritmos son esenciales para mitigar este riesgo.

La integración de la IA con el conocimiento local e indígena es otra consideración crítica. Las comunidades que viven en estrecho contacto con la naturaleza poseen un conocimiento ancestral invaluable sobre los ecosistemas. La IA no debe reemplazar este saber, sino complementarlo. Es vital diseñar sistemas de IA que incorporen y valoren estas perspectivas, asegurando que las soluciones tecnológicas sean culturalmente apropiadas y beneficien directamente a las comunidades que dependen de los ecosistemas. Esto implica un diálogo bidireccional y un diseño participativo de las herramientas.

Además, existen preocupaciones éticas relacionadas con la privacidad y la vigilancia. La IA, cuando se combina con tecnologías de monitoreo a gran escala (drones, reconocimiento facial en fauna), plantea preguntas sobre la privacidad de las personas que viven o trabajan en áreas moni-

toreadas. Es necesario establecer marcos éticos claros y regulaciones que protejan los derechos individuales y comunitarios.

Finalmente, la brecha tecnológica es un factor importante. El acceso a la computación de alto rendimiento, la experticia en IA y la infraestructura digital no están distribuidos equitativamente a nivel global. Esto podría exacerbar las desigualdades existentes, dejando a algunas regiones con menos capacidad para aprovechar los beneficios de la IA en la conservación. Es crucial fomentar la capacitación, la transferencia de tecnología y la creación de capacidades en países en desarrollo para democratizar el acceso a estas herramientas.

Si bien la IA ofrece un inmenso potencial para la conservación ambiental, su desarrollo y aplicación deben ser guiados por principios de responsabilidad, equidad y sostenibilidad. Abordar estos desafíos de manera proactiva garantizará que esa tecnología sirva como un verdadero aliado en la protección de nuestros ecosistemas, promoviendo una relación más informada y respetuosa con el mundo natural.

El futuro del monitoreo de ecosistemas con IA

El horizonte del monitoreo de ecosistemas impulsado por la inteligencia artificial, se vislumbra con avances cada vez más audaces y con la promesa de una comprensión y gestión ambiental sin precedentes. Una de las direcciones más emocionantes es la integración profunda de la IA con el internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) y el análisis de *big data*. Esta convergencia permitirá la creación de redes de sensores inteligentes, interconectados y distribuidos globalmente, que recolectarán datos ambientales en tiempo real de forma continua. Imaginemos ecosistemas con “nervios” digitales: desde boyas inteligentes monitoreando la salud oceánica, hasta enjambres de drones autónomos, mapeando la biodiversidad en selvas inaccesibles. Estos sistemas generarán flujos constantes de información que la IA procesará y analizará de forma automatizada, proporcionando diagnósticos y alertas instantáneas sobre la salud del planeta.

De igual modo, el desarrollo de modelos predictivos y prescriptivos impulsados por la IA se volverá cada vez más sofisticado. Los algoritmos no solo predecirán cómo podrían cambiar los ecosistemas bajo diferentes escenarios de cambio climático o presión humana, sino que también co-

menzarán a sugerir las mejores estrategias de intervención. La IA podría, por ejemplo, modelar el impacto de diversas políticas de reforestación o de gestión de recursos hídricos, optimizando las decisiones para lograr los máximos beneficios de conservación. Esta capacidad de “prescribir” acciones informadas por datos y simulaciones transformará la gestión ambiental de reactiva a proactiva.

Otro importante avance será la gestión adaptativa en tiempo real de los ecosistemas. Los sistemas de IA podrán analizar continuamente los datos de monitoreo y, basándose en ellos, ajustar dinámicamente las estrategias de conservación. Esto significa que las intervenciones no serán estáticas, sino que evolucionarán y se adaptarán a las condiciones cambiantes del ecosistema, maximizando la resiliencia y la capacidad de adaptación frente a perturbaciones. Un ejemplo podría ser un sistema de IA que, ante la detección de una plaga invasora, active automáticamente una serie de protocolos de contención, optimizando la respuesta.

Finalmente, se espera que la IA impulse la creación de plataformas de monitoreo globalmente integradas y colaborativas, las cuales fusionarán datos de diversas fuentes y tecnologías, y facilitarán la colaboración entre científicos, gestores ambientales, comunidades locales, pueblos indígenas y formuladores de políticas. El objetivo es desarrollar enfoques de monitoreo verdaderamente holísticos y efectivos, donde el conocimiento generado por la IA se combine con el saber tradicional y las observaciones de la ciencia ciudadana, creando una comprensión más rica y matizada de la Tierra.

A medida que la inteligencia artificial siga evolucionando, su potencial para apoyar el monitoreo y la gestión de ecosistemas se ampliará continuamente. Este desarrollo debe ser guiado por principios de responsabilidad, equidad y sostenibilidad, asegurando que los beneficios en la ciencia ambiental sean compartidos de manera justa y que se minimicen los riesgos potenciales. Con un enfoque adecuado, la inteligencia artificial puede transformar cómo realizamos la investigación ambiental, y fortalecer nuestra relación con el mundo natural, promoviendo una interacción más respetuosa, informada y sostenible con los ecosistemas que sostienen la vida.

Conclusión

En este capítulo, hemos explorado cómo la IA se ha posicionado como una herramienta esencial para el estudio de los ecosistemas, revolucionando la manera en que entendemos y protegemos nuestro planeta. Hemos visto cómo, a través de sus diversas ramas —desde el aprendizaje automático y el aprendizaje profundo hasta la visión por computadora—, la IA ha proporcionado capacidades sin precedentes para procesar y analizar volúmenes masivos de datos ambientales, provenientes de satélites, sensores terrestres, cámaras trampa y muchas otras fuentes. Esta tecnología nos permite ir más allá de la observación superficial, desentrañando patrones ocultos, identificando especies con precisión, monitoreando cambios en el uso del suelo casi en tiempo real y generando modelos predictivos cruciales para la planificación y la gestión ambiental proactiva.

La IA no es una panacea, pero sí una palanca formidable que amplifica la eficacia de nuestros esfuerzos de monitoreo. Su capacidad para automatizar tareas repetitivas y para identificar correlaciones complejas la convierte en un aliado indispensable en la lucha por la conservación. Sin embargo, es fundamental recordar que la potencia de la IA es maximizada cuando se integra con otras aproximaciones, especialmente con la ciencia ciudadana que discutimos en el capítulo anterior. La IA y la participación humana no son conceptos excluyentes; al contrario, son complementarios. Mientras la IA aporta en el procesamiento masivo y la identificación de patrones a gran escala, la ciencia ciudadana en la granularidad, el conocimiento local, la validación en terreno y en la conexión humana y el compromiso social que ninguna tecnología puede replicar.

El futuro del monitoreo de ecosistemas se perfila, por tanto, como una sinfonía entre el ingenio humano y la potencia algorítmica. Al fusionar la capacidad de observación distribuida de millones de ciudadanos con la destreza analítica de la IA, podemos construir sistemas de vigilancia ambiental más robustos, precisos y resilientes. Esta sinergia promete mejorar nuestra capacidad para diagnosticar la salud de los ecosistemas, e implementar soluciones adaptativas y efectivas frente a los desafíos globales más apremiantes, como el cambio climático y la pérdida de biodiversidad.

No obstante, a medida que avanzamos, es imperativo abordar los desafíos y consideraciones éticas asociadas con el uso de la IA en la investigación ambiental: la calidad y el sesgo de los datos, la necesidad de una

gobernanza transparente y, fundamentalmente, la integración respetuosa con el conocimiento local e indígena. Solo a través de un desarrollo y una aplicación ética y equitativa de estas tecnologías podremos asegurar que sus beneficios se traduzcan en un futuro más sostenible y justo para todos. En última instancia, al abrazar plenamente la colaboración entre la mente humana y el ojo digital de la IA, estamos equipándonos con herramientas sin precedentes para proteger y preservar la inmensa riqueza de nuestros ecosistemas. Es una apuesta por un futuro donde la tecnología y la participación ciudadana convergen en beneficio de una gestión más inteligente, informada y empoderada de nuestro precioso hogar, la Tierra.

Hemos explorado cómo la IA ha revolucionado nuestra capacidad para procesar volúmenes masivos de datos ambientales, desentrañar patrones complejos y anticipar fenómenos con una precisión sin precedentes. Hemos vislumbrado el poder de los algoritmos para dar sentido a la vasta información que generamos sobre nuestros ecosistemas, transformando la vigilancia ambiental de una tarea ardua en una misión más eficiente y proactiva. Sin embargo, estas sofisticadas herramientas no son solo ejercicios teóricos; su verdadero valor reside en su aplicación a los desafíos más apremiantes de nuestro tiempo, donde la escala y la complejidad de los problemas exigen una respuesta inmediata y coordinada. Es precisamente en este punto donde la mirada se vuelve hacia un desafío ambiental concreto que ha transformado drásticamente la vida en una de las regiones más emblemáticas del planeta. En el próximo capítulo, nos adentraremos en el fenómeno del sargazo en el Caribe mexicano, un problema de dimensiones monumentales que pondrá a prueba la sinergia de todas las herramientas y enfoques que hemos discutido, desde la ciencia ciudadana hasta el análisis de datos masivos con IA, demostrando la urgencia de su aplicación para la protección de nuestras costas.

Cuando la ciencia ciudadana y la inteligencia artificial se unen para proteger nuestras costas

En los capítulos anteriores, hemos explorado las fronteras del monitoreo ambiental, desentrañando el poder democratizador de la ciencia ciudadana y la capacidad analítica sin precedentes de la inteligencia artificial. Hemos descubierto cómo la participación colectiva de miles de ojos y mentes, combinada con la potencia de algoritmos capaces de procesar volúmenes masivos de datos, nos dota de herramientas invaluable para comprender la compleja danza de nuestros ecosistemas. Pero ¿cómo se aplican estas innovaciones a los desafíos ambientales más apremiantes de nuestro tiempo? ¿Cómo el ingenio humano y la visión digital convergen para enfrentar una amenaza concreta que pone en jaque la biodiversidad, la economía y la vida de comunidades enteras?

En este capítulo, dirigiremos nuestra mirada hacia un fenómeno que ha transformado dramáticamente el paisaje y la vida en el Caribe mexicano en la última década: la llegada masiva y recurrente del sargazo pelágico. Lo que alguna vez fue un componente natural y beneficioso del ecosistema marino, se ha convertido en un desafío monumental que altera la belleza de las playas, afecta la vida marina y la economía turística, y plantea preguntas urgentes sobre la resiliencia de nuestros océanos en un planeta en permanente cambio. Aquí abordaremos el tema del sargazo como un problema ecológico y un caso de estudio paradigmático que exige un enfoque multidisciplinario, para el que la ciencia ciudadana y la inteligencia artificial se perfilan como aliados indispensables para su monitoreo, comprensión y gestión. Es en la primera línea de este desafío donde la unión de la observación local y el análisis global se vuelve no solo deseable, sino vital.

El sargazo pelágico: una macroalga con historia y desafíos

El sargazo pelágico, o sargazo flotante, es una macroalga parda fascinante, conformada principalmente por dos especies: *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans*. Se le denomina “pelágico” (del griego *pelagos*, que significa “distante a la tierra”) porque, a diferencia de otras algas que se adhieren al fondo marino, estas especies flotan libremente en la superficie del mar durante todo su ciclo de vida. Esta característica les permite formar vastas extensiones de ecosistemas flotantes, que históricamente han sido de gran importancia ecológica (Lazcano-Hernandez *et al.* , 2023).

Tradicionalmente, el sargazo se ha distribuido en la región centro-norte del océano Atlántico, específicamente en la zona conocida como Mar de los Sargazos. Esta es una vasta área del Atlántico Norte que se extiende aproximadamente entre los meridianos 70° y 40° O y los paralelos 25° a 35° N. En esta región, la corriente del Atlántico Norte forma un bucle migratorio en el sentido de las manecillas del reloj que acumula y mantiene grandes masas de sargazo, creando un hábitat único que ha fascinado a navegantes y científicos durante siglos.

Sin embargo, a partir de 2011, se comenzó a observar un cambio drástico en la distribución del sargazo. Imágenes satelitales y estudios de investigadores de la Universidad del Sur de la Florida sugirieron que la principal fuente del sargazo que ahora llega masivamente al mar Caribe ya no es el tradicional Mar de los Sargazos, sino el nuevo Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico (GASB, por sus siglas en inglés: The Great Atlantic Sargassum Belt). Esta nueva zona de origen se encuentra relacionada con la región de recirculación del Atlántico Norte (NARR, por sus siglas en inglés), ubicada en el Atlántico ecuatorial. Este cambio en el origen y la magnitud de los arribazones es un factor clave para entender el problema actual (Lazcano-Hernandez *et al.* , 2023).

El Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico

La gran franja de sargazo del Atlántico es un fenómeno relativamente reciente, pero de escala colosal. Se trata de una banda continua de sargazo que se extiende por más de 8,850 kilómetros desde la costa oeste de África



Figura 1. Mapa del océano Atlántico en donde se observa el Mar de los Sargazos (noroeste) y el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico.

hasta el golfo de México y el mar Caribe. Esta franja, que ha llegado a pesar más de 20 millones de toneladas métricas en su punto máximo histórico (2018), es por el momento, el conjunto más abundante de macroalgas flotantes del mundo y su formación y crecimiento han sido atribuidos a una combinación de factores que incluyen cambios en los patrones de circulación oceánica de las corrientes marinas y el aumento de nutrientes en el Atlántico ecuatorial. En la Figura 1 se ilustran el Mar de los Sargazos y el Nuevo Cinturón de los Sargazos.

Los estudios sugieren que el incremento de nutrientes proviene, en parte, del vertido de fertilizantes y aguas residuales en los ríos de Sudamérica y África, así como del polvo rico en nutrientes proveniente del desierto del Sahara. Estos nutrientes, combinados con temperaturas oceánicas más cálidas (potencialmente influenciadas por el cambio climático), crean un caldo de cultivo ideal para la proliferación masiva del sargazo en el Atlántico tropical. La magnitud del GASB es tal que ha sido visible desde el espacio, y se ha convertido en un objeto de estudio crucial para la teledetección y el monitoreo satelital.

Impacto del sargazo en el Caribe mexicano

La llegada masiva y recurrente del sargazo al Caribe mexicano ha generado una cascada de impactos negativos que afectan múltiples esferas que

van desde la ecología y el medio ambiente hasta la economía y la salud pública de la región.

Aunque el sargazo pelágico tiene un valor ecológico significativo en mar abierto —sirve de hábitat y zona de reproducción para múltiples especies marinas, incluyendo peces, tortugas marinas y aves migratorias—, su acumulación masiva en las zonas costeras va en deterioro de los ecosistemas locales. Las grandes masas de sargazo que arriban a las playas y se acumulan forman densas capas que bloquean la luz solar, asfixiando ecosistemas vitales como los arrecifes de coral y los pastos marinos. Estos ecosistemas son fundamentales para la biodiversidad marina, actúan como barreras naturales contra la erosión costera y son criaderos para muchas especies de peces de valor comercial. La falta de luz inhibe la fotosíntesis, y la descomposición del sargazo consume el oxígeno disuelto en el agua causando anoxia o hipoxia y llevando a corales y pastos marinos a la muerte.

La descomposición del sargazo también libera sustancias tóxicas como el sulfuro de hidrógeno, que es altamente nocivo para la vida marina. Esto afecta a peces, crustáceos y otras especies que habitan en las zonas costeras, provocando su desplazamiento o muerte. Además, las densas capas de sargazo pueden atrapar y asfixiar a las tortugas marinas neonatas que intentan llegar al mar, o impedir que las hembras accedan a las playas para anidar.

Si bien el sargazo en el mar reduce la energía de las olas, una vez que se acumula en grandes cantidades en la playa, su peso y el proceso de remoción contribuyen a la erosión, alterando la dinámica natural de estos espacios. Al flotar en el océano, el sargazo puede actuar como una “esponja” que acumula metales pesados y otros contaminantes presentes en el agua, de forma que cuando estas masas llegan a la costa y se descomponen, liberan estos contaminantes, lo que afecta la calidad del agua y del suelo costero.

Por otro lado, es bien sabido que el Caribe mexicano es una de las principales potencias turísticas a nivel mundial, y la imagen de sus playas de arena blanca y aguas turquesas es un atractivo fundamental. La presencia masiva de sargazo en las playas ahuyenta a los turistas, lo que se traduce en cancelaciones de reservas, disminución de la ocupación hotelera y una reducción significativa en los ingresos para la industria turística y los negocios locales: restaurantes, tiendas de artesanías, operadores turísticos.

La limpieza de las playas genera altísimos costos operativos para hoteles y municipios, desviando recursos que podrían destinarse a otras necesidades.

Y desde el punto de vista de la economía local, las grandes masas de sargazo interfieren con la actividad pesquera, dificultando el tránsito de embarcaciones y el despliegue de redes. En tanto que, la degradación de los ecosistemas costeros afecta la disponibilidad de las pesquerías, impactando directamente en el sustento de las comunidades de pescadores.

Desafíos en el monitoreo y gestión del sargazo

A pesar de los esfuerzos considerables de diversas instituciones y gobiernos, el monitoreo y la gestión del sargazo siguen siendo un desafío complejo y multifacético, plagado de incertidumbres. Si bien las imágenes satelitales (como las obtenidas por sensores MODIS o Sentinel-3) y los modelos numéricos oceánicos (que simulan corrientes y vientos) han mejorado nuestra capacidad para rastrear las grandes masas de sargazo en mar abierto y predecir su trayectoria, la precisión de estas predicciones disminuye considerablemente a medida que las masas se acercan a la costa. Factores locales como la batimetría, las corrientes costeras, la morfología de la playa y las condiciones meteorológicas a pequeña escala influyen enormemente en dónde y cuándo arribará el sargazo, haciendo que las predicciones exactas sean extremadamente difíciles a nivel de playa.

La magnitud de los arribazones es abrumadora. Las cantidades de sargazo pueden ser tan grandes que superan la capacidad de recolección de los equipos y el personal disponibles. Además, el fenómeno es recurrente, con temporadas de alta afluencia que se extienden por varios meses al año, lo que exige una gestión continua y sostenida. Sumado a lo anterior, la falta de una coordinación integral entre los niveles federal, estatal y municipal de gobierno, la industria turística, las comunidades locales y, crucialmente, entre los países de la cuenca del Caribe, limita la efectividad de las soluciones implementadas. El sargazo es un problema transfronterizo que requiere una estrategia regional y una sólida gobernanza para compartir información, recursos y mejores prácticas.

Las opciones para la gestión del sargazo son variadas, pero no exentas de problemas. La recolección en mar abierto es costosa y tecnológicamente compleja. La recolección en playa es intensiva en mano de obra y causa

erosión si no se realiza cuidadosamente. Las barreras de contención son útiles, pero no infalibles. Además, el desarrollo de usos sostenibles para el sargazo recolectado (fertilizantes, biogás, materiales de construcción) aún está en etapas iniciales y no ha logrado absorber la totalidad del volumen arribado.

La necesidad de un enfoque integral y colaborativo

Para enfrentar de manera efectiva el fenómeno del sargazo, mitigar sus impactos y, eventualmente, aprovecharlo de forma sostenible, se necesita un enfoque integral, multidisciplinario y coordinado, lo que implica diversos componentes en la ecuación.

Es esencial combinar la teledetección satelital con el monitoreo local y la ciencia ciudadana para obtener datos de alta resolución espacial y temporal que permitan una mejor predicción y una respuesta más ágil. Por otro lado, es prioritario profundizar en la comprensión de las causas subyacentes de la proliferación del sargazo, incluyendo el papel del cambio climático y la eutrofización, para desarrollar estrategias de mitigación a largo plazo. La innovación tecnológica es definitiva, desarrollar y aplicar nuevas tecnologías para la recolección eficiente en mar y playa, así como para el procesamiento y valorización del sargazo.

De igual manera, la gobernanza y cooperación regional es crucial. Establecer mecanismos efectivos de coordinación entre países y actores locales, compartiendo información, recursos y lecciones aprendidas no es opcional sino una prioridad, sin dejar de lado la participación social, involucrando activamente a las comunidades locales, pescadores e industria turística en el monitoreo, la toma de decisiones y la implementación de soluciones. En este complejo escenario, la sinergia entre las herramientas tecnológicas y la participación humana se vuelve un pilar. Es precisamente en la búsqueda de soluciones innovadoras para desafíos como el sargazo donde la ciencia ciudadana y la inteligencia artificial demuestran su máximo potencial, ofreciendo un camino hacia una gestión más informada, adaptativa y resiliente de nuestras valiosas costas caribeñas.

Conclusión

El fenómeno del sargazo pelágico en el Caribe mexicano trasciende la mera proliferación de una macroalga; se ha erigido como un desafío que pone a prueba nuestra capacidad de monitoreo, gestión y resiliencia frente a los complejos retos ambientales de la era moderna. Lo que ha emergido de las profundidades del Atlántico ecuatorial, bajo el influjo de factores ambientales cambiantes, aparte de ser una masa biológica, es un reflejo palpable de la interconexión global de nuestros ecosistemas y de las consecuencias directas que las alteraciones a gran escala tienen sobre las comunidades locales, los delicados hábitats marinos y las economías dependientes del turismo. Enfrentar esta amenaza, que desdibuja la línea entre lo natural y lo anómalo, demanda mucho más que soluciones reactivas; exige una visión estratégica que abrace la integración de todo el arsenal de herramientas de conocimiento y acción a nuestra disposición. Es precisamente aquí donde demuestran su valor insustituible la ciencia ciudadana, con su incomparable capacidad para movilizar la observación distribuida y el conocimiento local a la primera línea del problema, y la inteligencia artificial, con su poder sin precedentes para procesar y desentrañar patrones de datos masivos provenientes de múltiples fuentes. La sinergia entre estas dos fuerzas —la participación humana y el cerebro digital— no solo nos permite comprender la dinámica del sargazo con una precisión antes inimaginable, sino que también nos capacita para predecir sus movimientos, optimizar las estrategias de recolección y, en última instancia, transitar hacia un modelo de gestión más informado, adaptativo y sostenible. La persistencia del sargazo, en su magnitud actual, es un recordatorio urgente de que la protección de nuestros valiosos ecosistemas costeros en un mundo en constante cambio requerirá un esfuerzo colaborativo y multidisciplinario que trascienda fronteras y disciplinas, uniendo el ingenio humano con la potencia tecnológica en una visión compartida para la resiliencia de nuestro planeta.

Ahora que reconocemos que la magnitud y la imprevisibilidad del sargazo exigen ir más allá de los métodos tradicionales, y que este fenómeno reclama la integración de todas las herramientas a nuestra disposición, en particular la combinación de la observación humana distribuida y la capacidad analítica de la inteligencia artificial, descubrimos que esta necesidad apremiante demanda que la teoría se convierta en acción concreta.

En el próximo capítulo, dirigiremos nuestra atención al proyecto Collective View, un ejemplo pionero y tangible de tal sinergia. Exploraremos cómo esta iniciativa ha fusionado exitosamente la participación ciudadana con las técnicas de la inteligencia artificial y la ciencia de datos, para presentarse como una alternativa robusta y escalable en el monitoreo y gestión de los arribazones de sargazo en las costas de Quintana Roo, marcando un camino prometedor hacia soluciones más eficientes y colaborativas en la protección de nuestros litorales.

Referencias

Lazcano-Hernandez, H. E., Arellano-Verdejo, J., & Rodríguez-Martínez, R. E. (2023). Algorithms applied for monitoring pelagic *Sargassum*. *Frontiers in Marine Science*, *10*, 1216426. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1216426>

Ciencia ciudadana y el monitoreo del sargazo: proyecto Collective View

En el capítulo anterior exploramos la complejidad y magnitud que el sargazo representa para el Caribe mexicano. Comprendimos cómo esta macroalga, alguna vez componente vital del océano abierto, se ha convertido en una amenaza persistente que afecta la salud de nuestros ecosistemas, perturba la vida marina y erosiona el turismo de la región. Reconocimos que la escala global del problema y la impredecibilidad de sus arribazones costeras exigen soluciones que trasciendan los enfoques tradicionales, demandando una sinergia entre conocimiento científico, tecnología avanzada y participación activa de la sociedad. Es precisamente en respuesta a esta urgencia que surge el proyecto Collective View (Arellano-Verdejo & Lazcano-Hernandez, 2021), un esfuerzo innovador que materializa la visión de un monitoreo ambiental colaborativo y tecnológicamente asistido. Este capítulo presenta los pormenores de Collective View, un modelo pionero en el que ciencia ciudadana e inteligencia artificial convergen para ofrecer una alternativa robusta y escalable en la lucha contra el sargazo, demostrando cómo la unión de ojos ciudadanos y algoritmos inteligentes puede marcar una diferencia tangible en la protección de nuestras costas.

Un enfoque pionero para el monitoreo del sargazo en playa

Collective View, un proyecto iniciado en 2019 por investigadores de El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), se erige como pionero en el monitoreo del sargazo a lo largo de las playas de Quintana Roo. Su innovación

radica en atender este desafío invitando a la sociedad a contribuir, siguiendo un enfoque basado en la ciencia ciudadana. Esta estrategia colaborativa sensibiliza y empodera a la comunidad para que participe en la recolección de datos e imágenes del sargazo en la playa, los cuales son posteriormente analizados con técnicas avanzadas de IA y ciencia de datos, con el propósito de aportar información útil y fundamentada a las autoridades encargadas del manejo del sargazo, facilitando así la toma de decisiones.

El proyecto responde a la creciente preocupación por los impactos ecológicos, económicos y de salud pública derivados de la llegada atípica de sargazo pelágico a las costas del Caribe mexicano. Los masivos arribazones de esta macroalga han planteado retos sin precedente para las comunidades costeras, y una gestión eficiente del problema demanda información precisa y oportuna. Aunque el monitoreo histórico del sargazo se ha apoyado en la percepción remota satelital, las limitaciones en la resolución espacial y temporal de las tecnologías disponibles han impedido un seguimiento adecuado y en tiempo real de la acumulación costera. Es en este punto donde Collective View ha introducido una perspectiva novedosa, al utilizar las contribuciones directas de los ciudadanos para mejorar sustancialmente la precisión y actualidad de los datos sobre el estado de las playas.

La recolección de datos a través de la ciencia ciudadana promueve activamente la apropiación social del conocimiento científico. Con este ejercicio colaborativo, los participantes se transforman en actores clave en la búsqueda de soluciones para un problema de relevancia mundial. Toda la información generada es puesta a disposición pública mediante una plataforma de acceso libre, la cual funciona como un repositorio de datos e imágenes georreferenciadas que pueden consultarse para evaluar el estado actual de las playas y servir de apoyo en la toma de decisiones.

El manejo de los vastos volúmenes de información recopilada requiere el uso de algoritmos sofisticados que posibilitan la extracción eficiente de conocimiento a partir de imágenes y videos. La aplicación de tecnologías como el aprendizaje profundo, la visión por computadora y la segmentación semántica ha permitido desarrollar modelos robustos capaces de clasificar imágenes, estimar la presencia y extensión del sargazo, y analizar patrones espaciales de dispersión. Estos datos, una vez procesados y visualizados mediante sistemas de información geográfica, facilitan notablemente la comprensión de la situación en las playas, consolidándose

como una herramienta poderosa tanto para la comunidad como para los tomadores de decisiones.

Collective View, además de atender la urgente necesidad de monitorear las playas, ejemplifica cómo la ciencia ciudadana puede integrarse exitosamente con tecnologías emergentes, demostrando así su gran potencial para generar impactos significativos en la investigación científica y en la gestión de desafíos ambientales de gran escala.

Objetivos de Collective View

El proyecto Collective View tiene como objetivo primordial monitorear el sargazo que arriba a las playas de Quintana Roo mediante la participación de la sociedad, a través de un enfoque cimentado en la ciencia ciudadana. Su meta, desde un inicio, ha sido desarrollar una plataforma de acceso libre que compile y visualice los datos e imágenes recolectadas, así como información relevante relacionada con el fenómeno, para que cualquier persona o institución consulte esta información y tome decisiones fundamentadas respecto al sargazo que se acumula en la playa. Este fenómeno ha detonado importantes desafíos económicos, ecológicos y de salud pública, por lo que su monitoreo continuo y actualizado resulta indispensable para mitigar eficazmente sus efectos adversos.

Uno de los objetivos específicos del proyecto es fomentar la apropiación social del conocimiento científico, involucrando a la ciudadanía en la recolección directa de datos. Al participar en esta tarea, las personas se integran plenamente al proceso de investigación y desarrollan una comprensión más profunda de los problemas ecológicos que afectan a sus comunidades. Esto, a su vez, fortalece el vínculo entre ciencia y ciudadanía, demostrando que cualquier individuo, sin importar su formación, puede contribuir a la investigación científica.

Un segundo objetivo es conformar un acervo de datos e imágenes georreferenciadas, compiladas por los propios ciudadanos, las cuales están disponibles de forma abierta para la sociedad en general, así como para investigadores y tomadores de decisiones. Esta base de datos accesible permite evaluar de manera precisa el impacto del sargazo en las playas de Quintana Roo y proporciona información actualizada, indispensable para abordar el problema con eficiencia. Por otra parte, el análisis sistemático

de los datos acumulados a lo largo del tiempo posibilitará la identificación de patrones que ayuden a prever futuros eventos de arribazón de sargazo.

Asimismo, el proyecto busca promover la creación de publicaciones científicas y de divulgación, junto con la organización de actividades colaborativas en el campo, conferencias y seminarios especializados. Es decir, no solo se pretende recolectar datos valiosos, sino también difundir ampliamente los resultados entre la comunidad científica y el público en general.

Metodología del proyecto **Collective View**

En su esencia, **Collective View** se concibió como un proyecto intrínsecamente transdisciplinario, cuya capacidad máxima depende directamente de la participación de la sociedad. Esta naturaleza transdisciplinaria se extiende al ámbito académico, donde la sinergia de diversas áreas del conocimiento es indispensable para alcanzar los objetivos planteados. A continuación, se detallan las disciplinas fundamentales que convergen en cada etapa del estudio:

- Colecta de información
 - Ciencia ciudadana
 - *Crowdsourcing*
- Organización y curado de los datos e imágenes
 - Ciencia de datos
- Diseño de algoritmos para la automatización de procesos
 - Aprendizaje de máquina (*Machine learning*)
 - Aprendizaje profundo (*Deep learning*)
 - Redes neuronales artificiales
- Análisis de los resultados
 - Ciencia de datos
- Visualización de los resultados
 - Sistemas de información geográfica

El proyecto **Collective View** se ha nutrido de la ciencia ciudadana para la captura y recolección inicial de información, creando una red de ob-

servadores. Posteriormente, la ciencia de datos ha sido fundamental para el almacenamiento, la organización y el curado de datos e imágenes, garantizando su calidad y accesibilidad. En la fase de diseño de algoritmos, crucial para la automatización de procesos, se han implementado arquitecturas avanzadas de redes neuronales artificiales, o pilares metodológicos de la inteligencia artificial. Finalmente, para el análisis e interpretación profunda de los resultados obtenidos, se ha recurrido de nuevo a la ciencia de datos, y la visualización clara de estos hallazgos se ha logrado usando sistemas de información geográfica, lo que da la pauta para una comprensión integral de la situación.

Impactos y beneficios

El Collective View genera un impacto social y ecológico positivo, al abordar frontalmente uno de los desafíos ambientales y económicos más apremiantes del Caribe mexicano: la masiva llegada de sargazo a sus costas, fenómeno que hoy afecta gravemente la vida cotidiana de las comunidades costeras, alterando su economía, la salud de sus habitantes y la ecología regional. El proyecto empodera a los ciudadanos, transformándolos en actores clave en la atención de este problema, al involucrarlos en el monitoreo del sargazo y en la generación de conocimiento con repercusiones inmediatas en su entorno.

La participación ciudadana constituye el eje central del impacto social de esta iniciativa. Al integrar a individuos de la comunidad en la recolección de datos, se fomenta una conciencia colectiva sobre la magnitud del problema, lo que conduce a una comprensión más profunda y a una mayor responsabilidad frente a los retos ambientales. Los ciudadanos no solo se convierten en observadores, sino en protagonistas activos al proporcionar información para monitorear el sargazo. Esta participación promueve la apropiación del conocimiento científico, hace que la comunidad se sienta parte esencial del proceso y capaz de influir en las decisiones que afectan su medio ambiente. Este empoderamiento social es indispensable en un contexto donde las soluciones a problemas ambientales globales demandan una acción local y comunitaria concertada.

Desde una perspectiva económica, el proyecto aspira a proporcionar herramientas que contribuyan a mitigar los impactos negativos del sargazo en

sectores como el turismo y la pesca, ambos intrínsecamente dependientes de la salud de las playas y de los ecosistemas costeros. La información generada por la plataforma permite que autoridades locales y regionales, empresarios turísticos y pescadores tomen decisiones más informadas respecto a cómo gestionar y atenuar los efectos del sargazo. Al ofrecer acceso libre a los datos, el proyecto democratiza la información y asegura que tanto los tomadores de decisiones, como los pequeños empresarios y comunidades, obtengan beneficios para adaptarse mejor a los arribazones de esta macroalga.

Además, el impacto en la salud pública es de considerable relevancia. La acumulación excesiva de sargazo en las playas genera gases tóxicos como el sulfuro de hidrógeno, lo que representa un riesgo para los habitantes y turistas. El Collective View facilita el monitoreo de estos eventos de manera más precisa y oportuna, capacitando a las autoridades para reaccionar con mayor celeridad y para implementar medidas preventivas. En este sentido, la plataforma funciona como una vital herramienta para alertar sobre las áreas donde las concentraciones de sargazo representan un riesgo inminente.

Desde una perspectiva educativa, este proyecto ejerce una influencia significativa en la formación de una ciudadanía más consciente y responsable. Al integrar a las personas en el proceso científico y al compartir los resultados a través de conferencias, seminarios y publicaciones de divulgación, Collective View fomenta una cultura de aprendizaje continuo. Esto educa a los participantes sobre el fenómeno del sargazo y sus efectos introduciéndolos en los métodos científicos y en el uso de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial y la ciencia de datos, lo que amplía sus horizontes y les genera un mayor interés por la ciencia y la tecnología.

El uso de la ciencia ciudadana, tal como lo implementa el proyecto Collective View, ofrece a los científicos una serie de beneficios sustanciales que profundizan su comprensión sobre los arribazones de sargazo en las playas del Caribe mexicano. Esta colaboración con la sociedad expande el alcance de los estudios científicos, a la vez que provee de datos que enriquecen la investigación y la subsiguiente formulación de políticas públicas.

Uno de los beneficios más evidentes es el acceso a un inédito volumen de datos. La recolección por parte de los ciudadanos posibilita la construcción de una base de información de mucha mayor magnitud que cualquier grupo

de investigadores podría lograr individualmente. Al involucrar una red diversa de participantes, el proyecto acumula miles de fotografías de playas en distintos momentos, un robusto conjunto de datos que facilita el análisis de patrones y tendencias sobre la llegada del sargazo. Esta abundancia eleva la calidad de los análisis y permite a los científicos estudiar con más detalle la distribución y dinámica de esta macroalga.

La diversidad inherente a los datos recolectados enriquece por mucho la investigación. Como los ciudadanos proporcionan imágenes desde muy variados ángulos y contextos, esto captura matices del sargazo que no son discernibles mediante un monitoreo tradicional. Además, la compilación de datos en tiempo real permite que los científicos observen cambios inmediatos y que reaccionen con celeridad a eventos inusuales, como arribazones masivos repentinos o la evolución de esta macroalga en diversas condiciones climáticas, aportando agilidad al estudio.

La ciencia ciudadana fomenta un enfoque genuinamente colaborativo en la investigación. Al involucrar a la comunidad, los científicos pueden trabajar con personas que poseen un conocimiento local profundo sobre las playas y el sargazo (Arellano-Verdejo y Lazcano-Hernandez, 2020). Este saber contextual es invaluable para interpretar la información, ya que los participantes ofrecen datos sobre factores locales específicos, como corrientes marinas, variaciones estacionales o prácticas de manejo en la región. Esta colaboración multidisciplinaria fortalece la investigación y puede conducir a resultados más aplicables y relevantes para las comunidades afectadas.

El empleo de la ciencia ciudadana en el monitoreo del sargazo facilita la comunicación y la divulgación científica. Al integrar a la comunidad en la recolección de datos, los científicos aprovechan una oportunidad única para educar al público sobre la base científica del sargazo y sus impactos. Esta interacción bidireccional incrementa la conciencia pública sobre el problema, a la vez que cultiva un sentido de pertenencia y responsabilidad en las comunidades. Los participantes se convierten, *de facto*, en embajadores del conocimiento científico, lo que amplifica la divulgación y promueve prácticas sostenibles para la gestión costera.

Otro aspecto fundamental es la capacidad de la ciencia ciudadana para potenciar la respuesta ante emergencias ambientales. En un contexto donde los arribazones de sargazo de pronto son repentinos y masivos, disponer de una red ciudadana que monitorea continuamente las playas permite a

científicos y autoridades reaccionar con más rapidez y eficacia. Los datos en tiempo real facilitan la planificación de acciones de limpieza, la movilización expedita de recursos y la implementación de medidas preventivas, todos ellos elementos vitales para proteger al ecosistema marino y a la población costera.

Por otro lado, el proyecto Collective View impulsa el desarrollo de nuevas metodologías y tecnologías en la ciencia. Al integrar avanzados algoritmos de inteligencia artificial y sofisticados sistemas de información geográfica, los científicos pueden optimizar mucho mejor el procesamiento y análisis de los datos recolectados. Este enfoque, aparte de mejorar la eficiencia intrínseca de la investigación, genera un considerable interés en el uso de tecnologías emergentes que poseen el potencial de aplicarse a una amplia gama de otros contextos ambientales, ampliando los horizontes de la investigación. La participación activa de la sociedad en el monitoreo del sargazo ayuda a reducir la brecha en el desarrollo tecnológico. Al involucrar a los ciudadanos en las etapas de recolección y análisis preliminar de datos, el Collective View fomenta el aprendizaje y la capacitación en habilidades tecnológicas y científicas. Esto empodera a la comunidad local y contribuye al fortalecimiento de capacidades en investigación y gestión ambiental a nivel regional, promoviendo una base sólida de conocimiento y acción local.

Este proyecto fortalece intrínsecamente la relación entre ciencia y sociedad, al demostrar cómo una colaboración estrecha entre ambos da origen a soluciones innovadoras para problemas complejos. Al fundamentarse en la ciencia ciudadana, el Collective View desmantela las barreras que a menudo separan a científicos y comunidad, creando un modelo colaborativo donde cada actor desempeña un rol fundamental. Este tipo de iniciativas incrementa la confianza del público en la ciencia, e inspira a otras regiones y países a adoptar enfoques similares para resolver sus propios desafíos ambientales.

Collective View y la inteligencia artificial

El Collective View se ha beneficiado de la integración de la inteligencia artificial, lo que ha permitido potenciar su capacidad para procesar y analizar datos sobre la llegada del sargazo a las playas del Caribe mexicano.

Un aspecto destacado del uso de la IA en este proyecto es la clasificación automática de imágenes. Gracias a algoritmos avanzados de aprendizaje profundo, el proyecto procesa las fotografías enviadas por los ciudadanos de modo rápido y preciso. En lugar de la revisión manual de las imágenes, la IA identifica automáticamente las áreas afectadas por el sargazo, categorizándolas en función de la cantidad y el tipo de sargazo presente. Este enfoque facilita el manejo de un volumen de datos mucho mayor, lo que se traduce en mapas de distribución más precisos y detallados.

La segmentación semántica constituye otra aplicación clave de la IA en el Collective View. Mediante el empleo de técnicas avanzadas, la IA diferencia entre distintas tipologías de sargazo y otros elementos contenidos en la imagen, como la arena o el agua. Esto mejora la precisión de la clasificación, y permite un análisis más exhaustivo de la situación en las playas, proporcionando información valiosa sobre la composición y el impacto del sargazo en el ecosistema costero, resultando en una visión granular de su presencia.

Además, la IA facilita sustancialmente el análisis de patrones y tendencias en los datos recolectados. A medida que se acumulan más imágenes y datos, los algoritmos adquieren la capacidad de identificar correlaciones y patrones en los arribazones de sargazo, vinculándolos con variables como las condiciones climáticas, las corrientes marinas y otros factores ambientales. Esta facultad de análisis predictivo permite a los científicos anticipar futuros eventos de sargazo y a los tomadores de decisiones planificar con antelación las estrategias para mitigar los efectos.

El uso de sistemas de información geográfica (SIG), combinado con la IA, ofrece una herramienta extraordinariamente potente para visualizar los datos recolectados. Los mapas generados con la información procesada permiten a ciudadanos, investigadores y autoridades visualizar en tiempo real las zonas costeras afectadas por el sargazo. Este hecho es crucial para una toma de decisiones informada y ágil, y contribuye a una mejor comprensión pública del problema, optimizando la comunicación y colaboración entre los diferentes actores involucrados.

La IA también es un aporte significativo a la optimización de recursos. Al identificar con celeridad las áreas que demandan atención urgente, los responsables de la recolección de sargazo dirigen a esos sitios sus esfuerzos y recursos de manera más efectiva y eficiente. Esto representa un ahorro considerable de tiempo y dinero, y minimiza el impacto ecológico de las

actividades de limpieza dado que permite un enfoque más localizado y dirigido, evitando innecesarias intervenciones en zonas no afectadas.

Desde una perspectiva de innovación tecnológica, la implementación de la IA en el Collective View abre las puertas a la creación de nuevas metodologías y herramientas que tienen un amplio potencial de aplicación en otros contextos ambientales. La experiencia y el conocimiento adquiridos en este proyecto pueden aprovecharse para desarrollar sistemas similares en diversas regiones o para abordar otros problemas ecológicos, promoviendo así la transferencia de conocimiento y tecnología en beneficio de la conservación.

Génesis y evolución del proyecto Collective View

La necesidad de obtener imágenes *in situ* de las playas del Caribe mexicano para la validación de información periodística y de imágenes satelitales, fue el génesis del proyecto que se convertiría en Collective View. Esta necesidad llevó al equipo a realizar búsquedas en internet; sin embargo, a pesar de las decenas de imágenes que se encuentran en redes sociales y sitios web, en su gran mayoría carecen de información referente a la fecha, hora y lugar de captura, es decir, carecen de metadatos fiables.

Aproximadamente cinco meses después de abordar esta necesidad, la idea se materializó en una aplicación móvil para teléfonos con sistema operativo Android, diseñada para permitir que los voluntarios capturasen y enviaran imágenes a la base de datos del proyecto. A dicha aplicación se le bautizó como Collective View. Se eligió un nombre en inglés con la intención de captar la atención de los millones de turistas que visitan las playas del Caribe mexicano. No obstante, a pesar de los esfuerzos realizados para invitar a la sociedad en su conjunto, surgieron desafíos que limitaron la adopción de la propuesta. Por ejemplo, el equipo se percató de que, en general, las personas no suelen instalar aplicaciones en sus teléfonos fuera de aquellas de gran popularidad y uso masivo, como WhatsApp o Instagram; además, la mayoría de los visitantes extranjeros utilizan teléfonos iPhone con sistema operativo iOS. Por ello, además de los conocidos del equipo, solo poco más de una decena de personas instalaron la aplicación en sus teléfonos. Este grupo de voluntarios no tenía inicialmente un deseo explícito de monitorear el sargazo, pero sí un marcado interés en estudiar y

contribuir a fenómenos que también ocurrían en la playa, como la atención a las tortugas marinas y el monitoreo de plásticos. Este tipo de actores fueron los más activos durante la primera etapa de Collective View, al grado de que el grupo de tortugeros de Quintana Roo propició que la aplicación fuera considerada por el municipio de Solidaridad, en esa entidad, para ser utilizada como herramienta de referencia en el monitoreo del sargazo por parte de los hoteleros municipales. Sin embargo, esta excelente noticia no pudo implementarse debido a situaciones ajenas al proyecto, ya que, justo días después del anuncio oficial, las prioridades de la sociedad cambiaron a escala global debido al inicio de la pandemia sanitaria vinculada al virus SARS-CoV-2.

A pesar de los contratiempos, y gracias a la participación de los voluntarios —principalmente estudiantes, académicos y personas apasionadas por el cuidado del medio ambiente y las tortugas marinas—, fue posible crear un acervo de 1,720 imágenes geoetiquetadas de las playas del Caribe mexicano. Estas imágenes contenían información precisa sobre el sitio de captura (latitud y longitud), además de la fecha y hora. Con esta información, el equipo logró completar un acervo de 2,400 imágenes, las cuales permitieron entrenar y probar arquitecturas de redes neuronales artificiales que son un referente en la literatura (LeNet-5, AlexNet y VGG16). En el contexto de las redes neuronales artificiales, 2,400 imágenes son consideradas muy pocas para un entrenamiento robusto; por ello, se empleó la metodología de transferencia de conocimiento, que consiste en utilizar arquitecturas ya entrenadas y sustituir el bloque de clasificación por el requerido para el problema específico. De esta manera, y sin tenerlo como un objetivo consciente, Collective View experimentó una metamorfosis, pasando de ser una aplicación para teléfonos inteligentes a convertirse en una metodología basada en el método científico para la clasificación automática de imágenes. Este proceso se puede consultar en detalle en el artículo científico Collective View: mapping *Sargassum* distribution along beaches (Arellano-Verdejo & Lazcano-Hernandez, 2021).

En retrospectiva, se concluye que esta segunda etapa de Collective View alcanzó su momento culminante con la publicación de la metodología del artículo científico homónimo, lo que coincidió con los meses más intensos de la pandemia sanitaria. Si bien contar con una plataforma digital que reciba las imágenes de la ciudadanía y las publique en un mapa consultable por la sociedad es una tarea viable, no por ello es trivial. Tras varios intentos

infructuosos, gracias al patrocinio de la multinacional ESRI ¹, que asignó una licencia de libre acceso, finalmente se publicó un mapa en internet con fotografías y estadísticas de la información provista por los voluntarios. Este mapa tuvo diversas versiones, y tras aproximadamente dos años, al terminar la licencia, se perdió el acceso como usuario y administrador, lo que resultó en su desuso. El único enlace de libre acceso que permanece vivo en internet corresponde a una versión intermedia ².

Por otro lado, al no contar con un crecimiento de datos debido a la casi nula participación de la sociedad durante el confinamiento, el acervo de Collective View se nutrió esencialmente del trabajo de campo de los investigadores responsables del proyecto. Por ello, el énfasis que rigió sus actividades fue el de obtener el máximo provecho de las imágenes ya recolectadas. En este contexto, se transitó de la clasificación dual de las imágenes indicando presencia o ausencia de sargazo, a la segmentación de esta macroalga; es decir, a la capacidad de ubicar los píxeles de sargazo en las fotografías y diferenciarlos (segmentarlos) de los demás en la imagen. Este estudio permitió la elaboración de la primera metodología capaz de estimar el porcentaje de sargazo en una fotografía, lo que se publicó en 2022 (Arellano-Verdejo *et al.*, 2020).

Mantener en operación los sitios web vinculados con Collective View quedó fuera de nuestras capacidades, por ello, nos enfocamos en continuar desarrollando productos académicos que contribuyeran al estado del arte en el monitoreo del sargazo pelágico en las playas, pues aquí reside nuestra principal fortaleza y contribución. Es por esta razón que nuestros productos académicos han continuado creciendo en esa dirección. Aparte de las publicaciones científicas, de divulgación y de difusión de la ciencia en la línea de investigación mencionada, también se han puesto a disposición del público en general conjuntos de datos útiles para el entrenamiento, prueba y validación de algoritmos de aprendizaje de máquina. Todo este acervo se ha concentrado en el sitio web de Collective View ³, proyecto que se transformó en un concentrador de documentación científica y de conjuntos de datos valiosos para los interesados en el monitoreo del sargazo en la playa.

¹ <https://www.esri.com/en-us/home>

² <https://www.arcgis.com/apps/dashboards/acb70d64e7b74cb486ec0b6de7c49773>

³ <https://collective-view.pages.dev/>

Asimismo, el desarrollo de los estudios realizados ha requerido conjuntos de datos y diversas herramientas para su ejecución. En este sentido, y con el objetivo de estimular la protección del conocimiento en la institución, se promovieron diversos registros ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR).

Productos clave del proyecto Collective View

El proyecto Collective View ha demostrado ser un catalizador no solo para el monitoreo efectivo del sargazo, sino también para la generación de conocimiento científico, la sensibilización pública y la formación de capital humano. Desde su inicio, ha producido una variedad de resultados tangibles que abarcan desde publicaciones académicas hasta herramientas prácticas y material divulgativo. Entre sus logros más destacados se encuentran:

- **Producción científica y académica:** La robustez metodológica de Collective View ha llevado a la publicación de múltiples artículos científicos en revistas indexadas de alto impacto (tanto JCR como Scopus), validando la metodología del proyecto y compartiendo sus hallazgos y algoritmos con la comunidad científica global.
- **Difusión y sensibilización pública:** Comprometido con la difusión del conocimiento, el proyecto ha generado numerosos artículos de divulgación en medios reconocidos, así como notas periodísticas en plataformas impresas, digitales y de radio, acercando la ciencia al gran público. Asimismo, se han creado videos institucionales y divulgativos, junto con material audiovisual y dibujos animados que facilitan la comprensión del problema y promueven la participación ciudadana de manera accesible y atractiva.
- **Protección de la propiedad intelectual:** El *software* y las bases de datos desarrolladas para el monitoreo del sargazo, junto con los materiales audiovisuales y dibujos, han sido objeto de registros de derechos de autor, protegiendo la propiedad intelectual generada en el marco del proyecto.
- **Participación en foros especializados:** Los resultados y la metodología de Collective View han sido presentados en numerosos congresos científicos y eventos de divulgación a nivel nacional e internacional,

promoviendo de esta forma el intercambio de conocimientos y la colaboración con otros expertos y proyectos a nivel global.

- **Formación de capital humano:** El proyecto ha contribuido activamente a la formación de nuevas generaciones de profesionales en ciencia de datos y monitoreo ambiental, ofreciendo oportunidades de servicio social, prácticas profesionales y desarrollo de tesis de licenciatura y posgrado (doctorado), asegurando la transferencia de conocimiento y la continuidad de la investigación en este campo.
- **Reconocimientos y distinciones:** La innovación y el impacto del proyecto han sido reconocidos con premios y distinciones a nivel nacional e internacional, lo que subraya su relevancia y el éxito de su enfoque colaborativo y multidisciplinario.
- **Involucramiento ciudadano directo:** Hasta la fecha, Collective View ha logrado involucrar activamente a más de 150 ciudadanos participantes en diferentes etapas, creando una red valiosa de “ojos” en el terreno que nutren el sistema con datos esenciales, demostrando el potencial de la movilización social para la ciencia.

Estos productos y logros ponen de manifiesto que los proyectos basados en esquemas de ciencia ciudadana y potenciados por la inteligencia artificial, no solo tienen el potencial de impactar favorablemente diversas áreas de la ciencia y la tecnología, sino que también juegan un papel crucial en la difusión y divulgación del quehacer científico, acercando la ciencia a la sociedad, y viceversa. Para obtener un detalle más completo de los productos representativos, se invita al lector a visitar el sitio web oficial del proyecto ⁴.

Conclusión

El recorrido del proyecto Collective View, desde una necesidad puntual de validación de datos hasta su consolidación como una metodología científica transdisciplinaria, ilustra de manera contundente el potencial transformador de la ciencia ciudadana y la inteligencia artificial en la gestión de desafíos ambientales complejos. A pesar de los obstáculos inherentes a la implementación de nuevas tecnologías y a la movilización

⁴ <https://collective-view.pages.dev/>

social, como los derivados de la pandemia, Collective View ha demostrado cómo la persistencia y la adaptabilidad pueden convertir las limitaciones en oportunidades. Su evolución, desde una aplicación móvil inicial hasta un robusto concentrador de datos científicos y publicaciones, ha enriquecido la comprensión del fenómeno del sargazo en el Caribe mexicano, y ha sentado un precedente valioso para futuras iniciativas de monitoreo ambiental. Al integrar el conocimiento local de los ciudadanos con el poder analítico de la IA y los sistemas de información geográfica, el proyecto genera datos de alta precisión y relevancia, y a la vez fomenta una cultura de empoderamiento social y colaboración científica, indispensable para construir soluciones sostenibles frente a los retos ecológicos globales que demandan una acción colectiva e informada.

Habiendo detallado cómo el proyecto Collective View ha establecido un modelo pionero de monitoreo del sargazo mediante la ciencia ciudadana, generando un volumen masivo y diverso de datos *in situ*, el siguiente paso lógico y esencial reside en la capacidad de procesar y extraer conocimiento significativo de esta vasta información. La magnitud y complejidad de los datos recopilados hacen indispensable el uso de herramientas de análisis avanzadas. Por ello, el siguiente capítulo se adentrará en la integración de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático en Collective View, explorando cómo estas tecnologías de vanguardia han sido fundamentales para transformar las observaciones ciudadanas en análisis precisos y accionables, permitiendo una comprensión profunda y una gestión más efectiva del sargazo en las costas del Caribe mexicano.

Referencias

- Arellano-Verdejo, J., & Lazcano-Hernandez, H. E. (2020). Crowdsourcing for *Sargassum* monitoring along the beaches in Quintana Roo. En M.F. Mata-Rivera, R. Zagal-Flores, J. Arellano Verdejo, y H.E. Lazcano Hernandez (eds). *GIS LATAM. GIS LATAM 2020. Communications in Computer and Information Science*, vol 1276. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59872-3_4
- Arellano-Verdejo, J., y Lazcano-Hernandez, H. E. (2021). Collective view: Mapping *Sargassum* distribution along beaches. *PeerJ Computer Science* 7, e528. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.528>

Arellano-Verdejo, J., Santos-Romero, M., & Lazcano-Hernandez, H. E. (2022). Use of semantic segmentation for mapping *Sargassum* on beaches. *PeerJ* 10, e13537. <https://doi.org/10.7717/peerj.13537>

Integración de la IA en el monitoreo del sargazo

En el capítulo anterior se exploró en detalle la génesis y evolución del proyecto Collective View, destacando su enfoque pionero en la movilización de la ciencia ciudadana para el monitoreo del sargazo y la generación de un invaluable acervo de datos *in situ*. Sin embargo, la magnitud de los arribazones de sargazo en las costas del Caribe mexicano ha dado lugar a un volumen de información tan vasto y dinámico que su análisis mediante métodos convencionales resulta ineficiente e insuficiente. La necesidad imperante de procesar esta gran cantidad de datos de manera ágil y precisa, extrayendo patrones complejos y prediciendo tendencias, ha impulsado la integración de herramientas analíticas de vanguardia. Este capítulo se adentra en el papel que la IA y las disciplinas afines, como la ciencia de datos y el aprendizaje automático, han desempeñado en Collective View. Se describirán las tecnologías y algoritmos implementados, desde la detección inicial del sargazo hasta la segmentación detallada de imágenes mediante redes neuronales, analizando los resultados obtenidos y las lecciones aprendidas en este innovador acercamiento al monitoreo ambiental.

Desarrollo

El estudio de los ecosistemas, por su naturaleza inherente, es una tarea que demanda la integración de capacidades de diversos especialistas, así como el uso de dispositivos y sensores para medir y recolectar datos de las variables biológicas y físicas esenciales. Idealmente, el monitoreo de los ecosistemas requiere seguimientos continuos durante prolongados periodos

de tiempo y en múltiples sitios de manera simultánea. Como consecuencia de estos requisitos, la mayoría de los estudios que buscan comprender la dinámica de un ecosistema tienden a acumular una cantidad significativa de datos en periodos relativamente cortos. Es precisamente en este contexto donde la ciencia de datos y el aprendizaje automático adquieren un papel protagónico, ya que estas disciplinas proveen a los interesados en el estudio de los ecosistemas las herramientas necesarias para el análisis exploratorio de datos, el diseño y ajuste de algoritmos útiles para el procesamiento de la información, y la visualización efectiva de los resultados obtenidos.

Introducción a las metodologías para el monitoreo del sargazo

La observación del sargazo pelágico desde el espacio ha evolucionado a lo largo de los años. La primera observación registrada en aguas del golfo de México desde el espacio data de 2005, y se realizó con el sensor MERIS, que iba a bordo de la plataforma satelital ENVISAT de la Agencia Espacial Europea (ESA). El hecho fue replicado después con éxito con imágenes del sensor MODIS, transportado por las plataformas satelitales Terra y Aqua de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA).

Estas primeras detecciones fueron posibles gracias a la implementación de índices específicos. Para las de MERIS, se usó el Índice Máximo de Clorofila (MCI, por sus siglas en inglés). Para las imágenes que obtuvo el MODIS, se empleó el Índice de Altura de Línea de Fluorescencia (FLH, por sus siglas en inglés). En los años subsiguientes, la observación satelital del sargazo continuó, pero adoptando índices del color del océano como metodología principal para la fotointerpretación de las imágenes satelitales proporcionadas por plataformas como Landsat, Terra, Aqua (NASA) y ENVISAT, y posteriormente Sentinel-2 (ESA). La eficacia de estos índices radica en que las misiones de observación de la Tierra desde el espacio ofrecen imágenes en diversas longitudes de onda (bandas espectrales), tanto en el espectro visible como en el infrarrojo. Esto es aprovechado por los índices, los cuales sugieren combinaciones aritméticas específicas de estas bandas para realzar el contraste en las imágenes y, con ello, destacar el atributo de interés, por ejemplo, la presencia de sargazo. La

principal ventaja de los índices es su relativa facilidad de implementación; sin embargo, su interpretación puede estar sujeta a un sesgo subjetivo en el caso de imágenes con baja claridad o complejidad.

Índices para la detección de macroalgas flotantes

En 2009, la comunidad académica conoció el Índice de Algas Flotantes (FAI, por sus siglas en inglés), el cual fue originalmente diseñado para detectar algas flotantes en aguas oceánicas, a partir de imágenes del sensor MODIS que viaja a bordo de los satélites Aqua y Terra de la NASA. El FAI opera mediante una combinación específica de bandas espectrales en el rango del rojo, infrarrojo cercano (NIR) y una banda de referencia para calcular la reflectancia anómala asociada con la presencia de algas flotantes. Dada su sensibilidad a la vegetación flotante, atribuida a su alta reflectancia en el NIR, el FAI se estableció como referente para la observación de algas flotantes en el océano desde el espacio y ha sido implementado en distintas plataformas para el monitoreo del sargazo.

Posteriormente, en 2016, se presentó a la comunidad académica el Índice Alternativo de Algas Flotantes (AFAI, por sus siglas en inglés). Aunque el AFAI utiliza la misma expresión matemática que el FAI, propone una combinación diferente de bandas espectrales, lo que permite su implementación con otros sensores, como los que se encuentran a bordo de los satélites VIIRS o Sentinel-3. Junto a estos índices, existen otros que se han desarrollado para observar el sargazo en imágenes satelitales y aéreas; el FAI y el AFAI son los más representativos en este campo. Para obtener detalles sobre otros índices, se puede consultar el trabajo de Lazcano-Hernandez *et al.*, (2024).

Algoritmos para la detección de macroalgas flotantes basados en aprendizaje automático

Los florecimientos de sargazo que impactaron el océano Atlántico ecuatorial y el mar Caribe en 2018 marcaron récords históricos en los volúmenes de sargazo observado y acumulado en las playas de la región, cifras que

al momento de escribir este documento aún se mantienen vigentes. Este fenómeno constituyó un hito en la historia de la observación del sargazo, ya que las masivas cantidades acumuladas en costas y playas desencadenaron severas afectaciones a los ecosistemas costeros, generando una imperante necesidad de monitorear y cuantificar el sargazo depositado en las zonas de playa.

Dada la biodiversidad de las zonas costeras y la escala espacial de acumulación del sargazo y su dinámica particular, las limitaciones técnicas de las metodologías de percepción remota satelital tradicional se acentúan considerablemente. Por lo tanto, observar el sargazo en el ámbito costero con esos recursos no es una solución recomendable. Por ello, la comunidad científica internacional comenzó a explorar soluciones alternativas para la captura de datos en la franja costera donde se acumula el sargazo; el propósito ha sido evaluar sus impactos, cuantificarlo y generar estrategias efectivas para su recolección y disposición final.

Como parte de las acciones académicas en México, en octubre de 2018, en las instalaciones de ECOSUR Chetumal, comenzamos la gestación de lo que sería el primer algoritmo basado en redes neuronales artificiales diseñado para clasificar el sargazo en las imágenes del MODIS. Lo denominamos ERISNet (Arellano-Verdejo *et al.*, 2019), y se encuentra específicamente entrenado para realizar la clasificación automática de píxeles con presencia o ausencia de sargazo en imágenes del MODIS. El entrenamiento de un algoritmo supervisado para la clasificación automática de imágenes en distintas clases, como las redes neuronales artificiales, además de diseñar la arquitectura, requiere de la construcción de un conjunto de datos para el entrenamiento, prueba y validación.

A continuación se detalla cómo se construyó el conjunto de datos que se utilizó para entrenar al ERISNet. Para llevarlo a cabo, se recurrió a las imágenes del MODIS; mientras que los píxeles adyacentes a la línea de costa se clasificaron en las categorías con sargazo y sin sargazo. Esta selección de píxeles se realizó considerando información de campo, así como la evidencia documentada de las jornadas de limpieza de playas del gobierno de Quintana Roo. Mayores detalles sobre la construcción de este conjunto de datos pueden obtenerse en el documento de Álvarez-Carranza y Lazcano-Hernandez (2019).

A pesar de la limitada información disponible para la construcción del conjunto de datos, se lograron clasificar 4,515 píxeles (2,306 con sargazo

y 2,209 sin sargazo), los cuales sirvieron para el entrenamiento, prueba y validación del algoritmo diseñado para esta tarea. Dicha construcción representó, en sí misma, un hito, dado que los datos estructurados para el estudio de fenómenos naturales con frecuencia no existen y deben obtenerse desde cero. Esos datos, además, fueron indispensables para el entrenamiento de ERISNet, la primera red neuronal convolucional y recurrente diseñada para la clasificación automática de píxeles de imágenes del MODIS en las clases ya referidas: con sargazo o sin sargazo.

Redes neuronales artificiales en procesos de monitoreo de sargazo

El diseño de ERISNet se inspiró en las arquitecturas de redes neuronales convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés) y en redes neuronales recurrentes (RNN, por sus siglas en inglés). Durante el proceso de ese diseño, se buscó evitar el sobreajuste o sobreentrenamiento, conocido en el ámbito técnico como *overfitting*. Por ello, se prestó especial atención a mantener un equilibrio entre la optimización y la generalización de la red, mediante el uso de técnicas como la eliminación (*dropout*), la normalización por lotes (*batch normalization*) y la regularización de pesos (*weight regularization*). Detalles adicionales sobre la arquitectura de ERISNet pueden consultarse en el trabajo de Arellano-Verdejo *et al.* (2019).

Aunque el conjunto de datos y el algoritmo propuestos son susceptibles de perfeccionamiento, lo más destacable es que por primera vez se aplicó una metodología de aprendizaje profundo al desafío ambiental del sargazo pelágico. En el contexto de observación y monitoreo de esta macroalga, el avance fue innovador porque brindó una nueva perspectiva sobre cómo recopilar información de datos que comúnmente solo se analizaban desde una perspectiva espectral. Lo hizo ERISNet al aprovechar la información de la componente radiométrica de los valores observados por los sensores satelitales, un aspecto que no se explotaba del todo con los índices convencionales. A partir de la publicación de ERISNet, otros autores comenzaron a incorporar redes neuronales en alguna de las etapas de sus procesos de observación y monitoreo. No obstante, y con frecuencia, la discriminación final del sargazo continuó realizándose mediante índices del color del océano, lo cual conlleva la fotointerpretación digital que, al involucrar

la intervención humana, depende de un ojo entrenado y es susceptible de sesgos.

Los legados de ERISNet

ERISNet puso de manifiesto varias necesidades para mejorar el monitoreo de las playas que no eran evidentes en 2018 y que actualmente constituyen líneas de investigación activas en diversas instituciones. Tales necesidades incluyen:

- Realizar monitoreos *in situ*.
- Colectar imágenes con metadatos precisos (fecha, hora, geolocalización).
- Recopilar imágenes aéreas como evidencia para la validación de algoritmos e índices.
- Fomentar la implementación de esquemas de ciencia ciudadana.
- Definir puntos estratégicos de monitoreo para realizar inferencias en sitios de difícil acceso.

Redes neuronales para la segmentación de imágenes de sargazo

Los desafíos sociales y ecológicos de los arribazones de sargazo en el Gran Caribe, prácticamente permanentes desde 2018, motivaron a grupos de investigación dedicados al monitoreo del sargazo a ir más allá de los retos académicos y a encauzar gradualmente sus trabajos hacia las necesidades prácticas de las instancias responsables de la gestión y disposición final del sargazo.

En este contexto, se desarrollaron propuestas para aprovechar la información fotográfica a nivel de playa de modo más granular. El objetivo fue transitar de mapas de presencia o ausencia de sargazo a otros que indicaran su porcentaje de cobertura en las imágenes, y finalmente a los que estimaran el área de la macroalga sobre la playa. Para que esta progresión fuera posible, al análisis metodológico se le incorporó la arquitectura pix2pix, una red denominada Red Generativa Adversaria Condicional (cGAN, por

sus siglas en inglés) que aprende la correspondencia entre una imagen de entrada y una de salida. La arquitectura pix2pix fue propuesta inicialmente por Isola *et al.* (2017). En su diseño, la sección generadora de pix2pix está inspirada en una arquitectura U-Net, y la salida de esta etapa se convierte en la entrada de la sección discriminadora. En su conjunto, pix2pix permite la traducción de imágenes de un dominio a otro.

Conclusión

En este capítulo se ha delineado la trayectoria del Collective View, destacando la transición de metodologías tradicionales a la incorporación estratégica de la inteligencia artificial, en respuesta al creciente y complejo desafío del sargazo acumulado en la playa. Se ha demostrado cómo la IA, a través de algoritmos de aprendizaje profundo como ERISNet y arquitecturas avanzadas como pix2pix, son ya fundamentales para transformar los vastos volúmenes de datos de ciencia ciudadana en información que pueda operarse. Desde la clasificación de presencia/ausencia hasta la segmentación detallada y la cuantificación de cobertura, estas herramientas han mejorado la precisión y eficiencia del monitoreo costero, y han abierto nuevas vías de investigación y aplicación, mostrando el potencial de la tecnología para abordar problemas ambientales de magnitud global. Los legados de estos avances subrayan la necesidad continua de innovación y colaboración multidisciplinaria para una gestión efectiva del sargazo y la protección de los ecosistemas costeros.

Los capítulos previos han presentado la creciente relevancia de la ciencia ciudadana para la recopilación de datos a gran escala y han explorado cómo la inteligencia artificial se ha posicionado para el análisis y la interpretación de complejos fenómenos ambientales, tal como se ilustró con el monitoreo del sargazo a través del proyecto Collective View. Hemos presenciado la eficacia de esta sinergia al transformar las observaciones de la comunidad en información accionable. Sin embargo, la plena realización del potencial de la colaboración entre la IA y la ciencia ciudadana para el estudio de ecosistemas no está exenta de desafíos ni de oportunidades aún por explorar. En el próximo capítulo nos adentraremos en los retos tecnológicos y sociales que surgen al integrar estas dos potentes áreas del conocimiento, al tiempo que se examinarán las prometedoras vías que esta

alianza estratégica abre para el futuro del monitoreo y la conservación de nuestros ecosistemas a escala global.

Referencias

- Lazcano-Hernandez, H. E., Arellano-Verdejo, J., & Rodríguez-Martínez, R. E. (2023). Algorithms applied for monitoring pelagic Sargassum. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1216426. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1216426>
- Arellano-Verdejo, J., Lazcano-Hernandez H. E., & Cabanillas-Terán N. (2019). Erisnet: deep neural network for sargassum detection along the coastline of the mexican caribbean. *PeerJ* 7, e6842. <https://doi.org/10.7717/peerj.6842>
- Álvarez-Carranza, G., & Lazcano-Hernandez, H. E. (2019). Methodology to create geospatial modis dataset. En M. Mata-Rivera, R. Zagal-Flores, y C. Barría-Huidobro (eds.), *Telematics and Computing. WITCOM 2019. Communications in Computer and Information Science*, vol 1053. Cham: Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33229-7_3
- P. Isola, P. Zhu, J.Y., Zhou, T., & A. A. Efros, A. A. (2017). Image-to-image translation with conditional adversarial networks. En *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 1125–1134).

Desafíos y oportunidades en la sinergia de ciencia ciudadana e IA para el monitoreo de ecosistemas

En los capítulos previos, se ha explorado el potencial del trabajo conjunto de la ciencia ciudadana y la inteligencia artificial para abordar el desafío del sargazo en las costas del Caribe mexicano a través del proyecto Collective View. Se ha detallado cómo la colaboración de la sociedad ha generado un rico acervo de datos y cómo la IA los ha transformado en conocimiento accionable. Sin embargo, el éxito de un proyecto no está exento de retos que abarcan desde el cumplimiento de normativas legales hasta la efectiva movilización social. Este capítulo analiza lo relacionado con la planeación, implementación y operación de iniciativas que fusionan la ciencia ciudadana con tecnologías avanzadas. Se presentarán las lecciones aprendidas en el desarrollo del Collective View a fin de ofrecer una guía útil para futuros proyectos; al mismo tiempo se examinarán las oportunidades que aún se tiene para innovar en la intersección de la IA y el monitoreo de los ecosistemas.

El desarrollo, la implementación y la puesta en marcha del Collective View enfrentaron diversos retos que se resolvieron en la evolución del proyecto. Enseguida se les detalla.

Desafíos en la planeación

El entusiasmo inicial del equipo de trabajo permitió superar múltiples etapas que no se habían previsto, incluso antes de que la aplicación del proyecto Collective View fuera publicada. Transmitir esta experiencia puede

ser de gran utilidad para quienes deseen lanzar una aplicación móvil orientada a la recolección de información mediante ciencia ciudadana.

Uno de los primeros obstáculos que surgieron durante las pruebas beta del Collective View fue cumplir con los requisitos generales de toda aplicación móvil. Estos se orientan a la protección de datos personales y al cumplimiento de normativas sobre la transparencia y eficiencia en el uso de tecnologías de la información en la administración pública en México. Al pertenecer a una institución de investigación pública, el proyecto debía adherirse a normativas federales que, en caso de incumplimiento, son sancionadas por la Secretaría de la Función Pública (SFP). Observar tales requisitos se convirtió en una prioridad que postergó el lanzamiento de nuestra aplicación móvil por varias semanas.

Con base en esta experiencia, los principales criterios para la operación de una aplicación móvil destinada a la captura de información con apoyo de la sociedad son los siguientes:

- **Cumplimiento de la legislación:** Es indispensable cumplir con la ley federal de protección de datos personales en posesión de particulares. Es decir, que se debe obtener el consentimiento informado de los usuarios para la recopilación y uso de sus datos personales, implementar medidas de seguridad robustas para proteger esa información y establecer políticas de privacidad claras. En el caso del Collective View, los usuarios recibieron esta solicitud con cierta desconfianza, a diferencia de lo que sucede con aplicaciones populares como Facebook, WhatsApp o Instagram. Por ello, se enfatiza la importancia de que un proyecto cuente con un contexto de confianza y afinidad con la sociedad.
- **Transparencia y veracidad:** Se requiere cumplir con la ley de protección al consumidor. Esto exige dar información clara y veraz sobre las funcionalidades de la aplicación, sus costos (si los hubiera) y los mecanismos de contacto para soporte técnico.
- **Estándares de gobierno digital:** Si la aplicación se utiliza en el contexto de la administración pública, debe adherirse a los estándares del gobierno digital. Esto incluye la publicación de una ficha informativa en un sitio web institucional con detalles sobre el servicio, sus objetivos, público meta y políticas de privacidad, según las directrices del gobierno de México.
- **Experiencia de usuario:** Todos estos requisitos deben atenderse sin sacrificar una óptima experiencia de usuario. La aplicación debe ser fácil

de usar, con una interfaz intuitiva y un diseño atractivo para fomentar su adopción.

Otro aspecto que inicialmente se subestimó y que se abordó al momento de invitar a la sociedad a utilizar la aplicación *Collective View*, fue la socialización del proyecto. A pesar de que el equipo elaboró material multimedia para difundir la iniciativa en diversos foros, y plataformas digitales, reconocemos que, para lograr un mayor impacto y penetración en la sociedad, esta actividad debió haber sido acompañada por personas expertas en mercadotecnia y “marketing” digital.

Desafíos en la implementación

Implementar metodologías de IA basadas en el aprendizaje supervisado, como las redes neuronales artificiales, requiere de la construcción de conjuntos de datos para el entrenamiento y la prueba de los algoritmos. Es lógico que el contenido de estos datos deba corresponder al fenómeno en estudio, pero no es trivial contar con los insumos necesarios para llevar a cabo los experimentos. En el estudio de ecosistemas o fenómenos naturales, la obtención de estos insumos puede ser una tarea muy demandante, ya que se necesita información de amplias regiones y en diversos momentos.

Es en este tipo de contextos donde la ciencia ciudadana se convierte en un esquema invaluable, ya que aprovecha la presencia de personas cercanas a la zona de estudio para la recopilación de información. No obstante, para que esto ocurra, se deben cumplir dos condiciones: implementar una metodología que permita recolectar la información que los participantes potencialmente enviarán; e incentivar la participación de la población.

Centrándose en la metodología para automatizar la captura de la información, hay dos enfoques principales: utilizar una herramienta ya existente, o diseñar una propia. Ambos escenarios tienen ventajas y desventajas:

Ventajas de utilizar una herramienta ya existente:

- **Eficiencia de recursos:** No se requiere destinar recursos a las fases de desarrollo, lo que agiliza el inicio del proyecto.

- **Infraestructura reducida:** No se necesita infraestructura de *hardware* para el hospedaje del sistema, ni recursos para las actualizaciones y el mantenimiento.
- **Facilidad de implementación:** Al evitar la etapa de desarrollo, el proyecto puede iniciarse más prontamente.

Desventajas de utilizar una herramienta ya existente:

- **Propiedad de los datos:** Es probable que los datos no pertenezcan al proyecto y que se requiera solicitar permisos para su divulgación.
- **Posprocesamiento:** Es posible que se necesite un posproceso de los datos para utilizarlos masivamente.
- **Costos:** Aunque se ahorran costos de desarrollo, se debe considerar el pago de licencias o de esquemas para utilizar la herramienta de manera eficiente.

Ventajas de diseñar una herramienta propia:

- **Personalización:** El diseño es completamente adaptable a las necesidades del proyecto.
- **Propiedad y control:** Los datos son propiedad del proyecto, lo que facilita su uso y divulgación.
- **Optimización de procesos:** Es posible concatenar procesos con más eficiencia.
- **Propiedad intelectual:** La herramienta puede ser registrada (ante Indautor) como parte de los productos del proyecto.

Desventajas de diseñar una herramienta propia:

- **Demanda de recursos:** Se requiere destinar recursos significativos a las fases de desarrollo, lo que debe estar contemplado en el plan de trabajo del proyecto.
- **Infraestructura y mantenimiento:** Se necesita infraestructura de *hardware* para el hospedaje del sistema y recursos para sus actualizaciones y mantenimiento.
- **Licencias y costos:** Es necesario considerar el pago de licencias para el uso masivo del desarrollo.

Desafíos sociales para la integración de la ciencia ciudadana

El despliegue tecnológico necesario para un proyecto de ciencia ciudadana, aunque desafiante, científicos e instituciones pueden controlarlo. Es un problema técnico que, con los recursos adecuados, es posible resolver. Sin embargo, la participación ciudadana, corazón de este tipo de iniciativas, no está garantizada y representa un reto. Lograr una participación masiva y sostenida demanda una comprensión profunda de la psicología social y una bien definida estrategia de comunicación.

Uno de los principales obstáculos es la falta de conciencia o la percepción de distancia de la población respecto al problema ambiental. Las personas que no se ven directamente afectadas por el fenómeno, o que no comprenden su magnitud, son menos propensas a involucrarse. Por lo tanto, la estrategia inicial debe enfocarse en la sensibilización social, comunicando de manera clara y accesible sobre la importancia del fenómeno y cómo la contribución individual se traduce finalmente en un beneficio colectivo. Esta comunicación debe ser simple, atractiva y diseñada por expertos en mercadotecnia y divulgación para maximizar su impacto.

Además, los proyectos de ciencia ciudadana compiten por la atención de las personas en un entorno saturado de información digital. Para destacar, se debe diseñar una experiencia de usuario atractiva y lúdica que motive a la participación continua. Lo solicitado a los voluntarios debe ser sencillo de entender y ejecutar, evitando que despierte la sensación de trabajo o de carga excesiva. Elementos de gamificación, como sistemas de puntos, insignias o reconocimiento público, pueden incentivar a los participantes a mantenerse activos a lo largo del tiempo.

Otro desafío es la construcción de confianza. A diferencia de las plataformas de uso masivo, un nuevo proyecto científico es probable que produzca la desconfianza de los usuarios respecto al uso de sus datos personales. Es indispensable operar con total transparencia, cumpliendo rigurosamente con la legislación de protección de datos y comunicando de forma explícita el destino y el beneficio de la información recolectada. La confianza se gana no solo con la protección de datos, sino también con la generación de un retorno de valor tangible para la comunidad. Los participantes deben ver que sus esfuerzos se materializan en resultados concretos, como mapas interactivos, informes públicos o alertas tempranas. Este “producto de

retorno” recompensa a quienes participan, y atrae a nuevos voluntarios al demostrarse el impacto real del proyecto.

La integración exitosa de la ciencia ciudadana no se limita a la creación de una herramienta tecnológica, depende también de una estrategia social y comunicacional bien articulada que logre:

- Generar conciencia y sentido de pertenencia en la comunidad.
- Ofrecer una experiencia de participación intuitiva y gratificante.
- Construir un clima de confianza y transparencia.
- Demostrar el valor real de las contribuciones ciudadanas a través de resultados concretos.

Desafíos en la operación

Una estructura operativa robusta es obligada para el éxito de un proyecto de ciencia ciudadana como el Collective View. Esta estructura debe incluir roles y personal definidos que contribuyan constantemente al proyecto, cubriendo aspectos que van desde el avance de la investigación hasta el soporte técnico. La falta de una estructura dedicada a estas tareas es uno de los principales desafíos operacionales y puede, en última instancia, comprometer la sostenibilidad y el impacto del proyecto. A continuación, se detallan los desafíos generales de la operación y las particularidades enfrentadas en el Collective View.

Mantenimiento de la plataforma y soporte técnico

Uno de los retos más apremiantes en la operación de cualquier plataforma tecnológica es el mantenimiento continuo y las actualizaciones. Los sistemas de *software*, especialmente aquellos que interactúan con tecnologías en constante evolución, como los sistemas operativos de teléfonos y otros dispositivos móviles (Android, iOS) y las aplicaciones (apps) de terceros, requieren una supervisión permanente para asegurar su correcto funcionamiento, seguridad y compatibilidad. En el caso del Collective View, la decisión inicial de desarrollar una aplicación móvil propia para Android, aunque ofrecía una personalización total, también impulsó la car-

ga de su mantenimiento. Cuando el equipo se percató de que la mayoría de los turistas usaban iOS, la falta de una versión para este sistema operativo representó una limitación importante que no pudo ser resuelta de manera inmediata, evidenciando que las decisiones de diseño inicial tienen repercusiones operativas a largo plazo.

Además del mantenimiento técnico, la operación de una plataforma de ciencia ciudadana demanda una atención y el dar soporte al usuario permanentes. Los voluntarios, al no ser personal especializado, pueden enfrentar dificultades técnicas, tener dudas sobre el proceso de recolección de datos o requerir clarificaciones sobre el proyecto. Un canal de comunicación eficaz y una persona o equipo dedicado a responder estas inquietudes son cruciales para mantener la motivación de los participantes. La ausencia de este soporte puede generar frustración, desincentivar la participación y, en el peor de los casos, provocar la desintegración de la comunidad de voluntarios.

Generación de productos de retorno y retroalimentación

La sostenibilidad de un proyecto de ciencia ciudadana depende en gran medida de que los participantes perciban su valor. En este sentido, la operación debe incluir la elaboración de productos de retorno para la sociedad, que motiven la participación continua de los ciudadanos. Estos productos pueden ser mapas interactivos, informes públicos, artículos de divulgación o incluso retroalimentación directa a los voluntarios sobre cómo sus datos están siendo utilizados.

En el proyecto *Collective View*, la falta de una estructura dedicada a la operación impidió la actualización constante del mapa de sargazo. Cuando la licencia de ESRI expiró y no se pudo renovar, el mapa quedó en desuso, lo que representó perder la herramienta más visible para la sociedad. Esta situación ilustra que las debilidades operativas, como el depender de licencias externas sin un plan de contingencia, afectan la capacidad de un proyecto para mantener su compromiso con la comunidad. Y si bien el *Collective View* siguió generando productos académicos de alto nivel, la interrupción de la plataforma pública afectó el ciclo de retroalimentación con los voluntarios, que es vital para la motivación a largo plazo.

Sostenibilidad a largo plazo

Finalmente, la operación de un proyecto de ciencia ciudadana enfrenta el desafío de la sostenibilidad financiera y organizacional a largo plazo. La investigación académica, que a menudo impulsa estas iniciativas, opera con ciclos de financiamiento limitados, lo que dificulta la creación de una estructura operativa permanente. Los recursos para el mantenimiento de servidores, licencias de *software*, personal de soporte y actividades de divulgación son constantes, mientras que el financiamiento puede ser intermitente. En el caso del proyecto Collective View, esta realidad se evidenció cuando el equipo reconoció que su fortaleza residía en el desarrollo académico y metodológico, y no en la operación de un servicio web que requería altos estándares de atención y actualizaciones permanentes. Esta reflexión llevó a una evolución del proyecto, ahora como un proyecto de ciencia abierta, ya que, desde sus inicios, el espíritu fue poner a la disposición de la sociedad todos los resultados y productos de la investigación científica realizada.

En nuestra experiencia, hemos aprendido que el éxito de la operación de un proyecto como Collective View depende de una planificación que anticipe los desafíos de mantenimiento tecnológico, la necesidad de dar soporte permanente al usuario, la importancia de generar productos de retorno para la comunidad y la búsqueda de modelos de sostenibilidad que trasciendan los ciclos de financiamiento de la investigación académica. La experiencia de Collective View resalta que, sin una estructura operacional dedicada, el potencial de un proyecto puede quedar limitado a la esfera académica, sin alcanzar su máxima expresión como una herramienta social de impacto duradero.

Oportunidades futuras para el monitoreo de ecosistemas con IA

El proyecto Collective View para el monitoreo del sargazo ha demostrado el enorme potencial de la fusión entre ciencia ciudadana e inteligencia artificial, pero también ha puesto de manifiesto que este campo aún está en sus primeras etapas y que existen múltiples oportunidades para la innovación. Estas se centran en la optimización de los recursos existentes, el

desarrollo de metodologías más especializadas y el diseño de arquitecturas tecnológicas más eficientes, elementos que serán cruciales para abordar una gama más amplia de desafíos ecológicos.

Una de las áreas con más potencial es la optimización de datos. A menudo, la construcción de conjuntos de datos de alta calidad para entrenar algoritmos de IA es una tarea compleja, costosa y demandante. En la mayoría de los proyectos de ciencia ciudadana, la cantidad de datos recolectados es limitada, por lo que el verdadero desafío consiste en “hacer más con menos”. Esto implica desarrollar metodologías y algoritmos que permitan a los científicos extraer el máximo valor de conjuntos de datos pequeños o incompletos. Técnicas como el aprendizaje con pocos ejemplos (*few-shot learning*) o el meta-aprendizaje (*meta-learning*) son casos de modelos que pueden aprender a partir de un número reducido de ejemplos (Vinyals *et al.*, 2024; Finn *et al.*, 2024), o la aplicación de métodos de aumento de datos (*data augmentation*) para expandir artificialmente los conjuntos de entrenamiento (Pan y Yang, 2024), representan vías prometedoras. Estas innovaciones permitirán a los proyectos con recursos limitados generar modelos de IA robustos, democratizando el acceso a tecnologías avanzadas para el monitoreo de ecosistemas en diversas regiones.

Desde una perspectiva metodológica, se vislumbra una transición de la aplicación de arquitecturas de IA genéricas a la creación de arquitecturas especializadas. Actualmente, la mayoría de los estudios que utilizan IA para el monitoreo ambiental emplean modelos que fueron diseñados para tareas completamente diferentes, como la clasificación de imágenes de objetos cotidianos. Si bien estos modelos son efectivos, no siempre capturan las sutilezas inherentes a los datos ecológicos, como las variaciones en el color del sargazo dependiendo de su estado de descomposición o las interacciones entre especies. La oportunidad radica en diseñar algoritmos de IA *ad hoc* que incorporen el conocimiento ecológico desde su concepción. Por ejemplo, una red neuronal podría ser diseñada para reconocer no solo la presencia de sargazo, sino también su densidad, su estado de salud o su interacción con otras algas y sedimentos, lo que daría como resultado una clasificación mucho más precisa y útil para los científicos y tomadores de decisiones.

Finalmente, la eficiencia de los recursos computacionales emerge como una oportunidad crítica. El entrenamiento de modelos de aprendizaje profundo requiere capacidades de cómputo significativas, ya sea en servidores

locales o en la nube. Estos recursos conllevan un costo económico y un impacto ambiental, ya que las grandes granjas de servidores consumen una considerable cantidad de energía. El desarrollo de arquitecturas que utilicen con más eficiencia la capacidad de procesamiento disponible es fundamental para la sostenibilidad a largo plazo de estos proyectos. Esto incluye el diseño de modelos ligeros que puedan ser entrenados en *hardware* menos potente (como el de dispositivos móviles), la optimización de algoritmos para reducir el tiempo de entrenamiento y la exploración de enfoques de cómputo en el borde (*edge computing*), donde el procesamiento se realiza localmente en el dispositivo que captura los datos, minimizando la necesidad de transferirlos a la nube. Estas innovaciones reducirán los costos operativos y permitirán mayor agilidad en la toma de decisiones, al proporcionar resultados casi en tiempo real en ubicaciones remotas. En conjunto, estas oportunidades apuntan hacia un futuro donde la IA y la ciencia ciudadana no solo coexisten, sino que se integran de forma sinérgica y sostenible para abordar los desafíos ambientales del presente y del futuro.

Conclusión

El recorrido del proyecto Collective View, desde su concepción hasta su operación, subraya que la fusión de la ciencia ciudadana con la inteligencia artificial es un proceso complejo que trasciende la simple implementación tecnológica. Los desafíos identificados en las fases de planeación, implementación y operación —que van desde el cumplimiento legal y la gestión de la propiedad intelectual hasta el incentivar la participación comunitaria— demuestran que el factor humano y social es tan determinante como la robustez del diseño algorítmico. El proyecto evidencia que la construcción de confianza, la comunicación efectiva y la creación de un retorno de valor tangible para la sociedad son fundamentales para sostener la participación ciudadana a largo plazo. Al mismo tiempo, las oportunidades futuras para el monitoreo de ecosistemas con IA sugieren que la siguiente frontera reside en la optimización de los algoritmos existentes y en la creación de metodologías y arquitecturas diseñadas específicamente para responder a las particularidades de los retos ecológicos. En este sentido, la experiencia del Collective View se consolida como un valioso modelo de referencia

que ha contribuido al entendimiento del sargazo, a la vez que ha delineado el mapa de ruta para que ciencia, tecnología y sociedad trabajen de manera unificada en la construcción de soluciones sostenibles para el futuro de nuestros ecosistemas.

Habiendo analizado los retos y oportunidades que surgen de la sinergia entre la inteligencia artificial y la ciencia ciudadana, se hace evidente que el éxito de estas iniciativas no depende solo del entusiasmo o la innovación tecnológica, sino también de una planificación rigurosa y de la atención a detalles críticos que van desde la protección de datos hasta la sostenibilidad operativa. Con la intención de resumir las lecciones aprendidas a lo largo de este trabajo en una guía práctica y útil para la comunidad, el siguiente capítulo presenta una serie de recomendaciones concretas y consideraciones clave para el diseño y la implementación de proyectos de ciencia ciudadana enfocados en el monitoreo de ecosistemas, ofreciendo un mapa de ruta para quienes deseen emprender estas colaboraciones en el futuro.

Referencias

- Vinyals, O., Blundell, C., Lillicrap, T., Kavukcuoglu, K., & Wierstra, D. (2016). Matching networks for one shot learning. En *Proceedings of the 30th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 16)* (pp. 3637–3645). Curran Associates Inc.
- Finn, C., Abbeel, P., & Levine, S. (2017). Model-Agnostic Meta-Learning for Fast Adaptation of Deep Networks. En *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning, 70*, 1126-1135. <https://proceedings.mlr.press/v70/finn17a.html>.
- Pan, S. J., & Yang, Q. (2009). A survey on transfer learning. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 22(10), 1345–1359. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2009.191>

Recomendaciones para el desarrollo de proyectos de ciencia ciudadana para el monitoreo de ecosistemas

A lo largo de este trabajo, hemos transitado desde una conceptualización de la ciencia ciudadana y la inteligencia artificial hasta su aplicación práctica en el monitoreo del fenómeno ambiental crítico del arribo masivo de sargazo a las costas del Caribe mexicano. La experiencia del proyecto Collective View, analizada en detalle, ha servido como estudio de caso para ilustrar el potencial transformador de estas sinergias y mostrar los desafíos intrínsecos que van desde la logística tecnológica hasta las complejidades de la participación social. En este último capítulo, se consolida todo este conocimiento en un compendio de recomendaciones concretas y estratégicas. El propósito es ofrecer una guía práctica y fundamentada en la experiencia de campo para aquellos investigadores, gestores ambientales y ciudadanos que aspiren a diseñar e implementar proyectos de ciencia ciudadana exitosos. Este capítulo es la culminación de un viaje que busca transformar las lecciones aprendidas en una hoja de ruta que fomente la creación de iniciativas más robustas, éticas y sostenibles para el monitoreo de nuestros valiosos ecosistemas.

Diseño del proyecto

La etapa de diseño es la etapa fundamental que asegura que el esfuerzo de los voluntarios se traduzca en resultados científicos valiosos y que el proyecto sea sostenible a largo plazo. Un diseño bien estructurado es el cimiento para un éxito duradero.

El primer y más crítico paso es la definición de objetivos claros y precisos. Es indispensable responder a preguntas concretas que justifiquen el proyecto. Para ello, se recomienda la utilización de la metodología SMART, la cual establece que los objetivos deben ser específicos, medibles, alcanzables, relevantes y con plazos definidos. Esta herramienta metodológica ayuda a evitar la ambigüedad y a enfocar los esfuerzos de manera efectiva. Por ejemplo, en lugar de un objetivo amplio como “monitorear sargazo”, un objetivo SMART sería: “Cuantificar la cantidad de sargazo en las playas de la localidad de Mahahual a lo largo de un año para conocer la tendencia de los arribazones en ese sitio”. Esta especificidad permite un diseño preciso, una recolección de datos eficiente y una evaluación clara del éxito del proyecto.

Definidos los objetivos, es de suma importancia comprender las necesidades e intereses de los potenciales voluntarios. Los ciudadanos son el corazón del proyecto, y su perfil determina la forma en que se estructura la iniciativa y se comunica. No es lo mismo diseñar un proyecto para estudiantes de secundaria, motivados por el aprendizaje, que para turistas o residentes que buscan contribuir mientras disfrutan de su entorno. Por lo tanto, el proyecto, las herramientas y la estrategia de comunicación deben diseñarse para garantizar el compromiso de los voluntarios y fomentar su participación. Un proyecto demasiado complicado para principiantes o demasiado simplista para expertos corre el riesgo de fracasar por falta de interés y motivación.

La selección de la metodología debe ir de la mano de los objetivos y la audiencia. La simplicidad, la repetibilidad y la seguridad son principios clave. Los métodos de recolección de datos deben ser fáciles de entender y de aplicar por personas sin una formación científica formal. La elección de la tecnología adecuada complementa esta fase. Las herramientas pueden variar desde lo más simple, como un cuaderno y un bolígrafo, hasta aplicaciones móviles que geolocalizan y etiquetan datos. En cualquier caso, la tecnología debe ser intuitiva, fácil de usar y debe facilitar la gestión de los datos para que su posterior análisis sea lo más fluido posible.

La integración coherente de objetivos claros, una audiencia bien definida, una metodología simple y la tecnología adecuada es lo que transforma una buena idea en un proyecto de ciencia ciudadana que perdure en el tiempo y genere un impacto significativo en la sociedad.

Implementación del proyecto

Un proyecto de ciencia ciudadana alcanza su máximo potencial cuando su implementación se rige por una estrategia que prioriza la participación activa de los voluntarios, la calidad rigurosa de los procesos y la generación de productos valiosos para la sociedad. Esta fase de ejecución es el punto donde la visión y el diseño conceptual se materializan, y es aquí donde la interacción efectiva con la comunidad de participantes y la gestión eficiente de la información se vuelven determinantes para el éxito del monitoreo de ecosistemas.

El primer pilar de una ejecución efectiva es la capacitación de los voluntarios, una etapa que incide directamente en la fiabilidad de los datos recolectados. Es imperativo desarrollar materiales de formación claros y concisos, evitando el uso de lenguaje técnico excesivo y centrándose en los procedimientos esenciales. Para ello, se pueden emplear diversos formatos de capacitación, como tutoriales interactivos, videos demostrativos, o talleres presenciales y virtuales, los cuales permiten a los voluntarios adquirir las competencias necesarias para recolectar datos de modo consistente y confiable. Un programa de capacitación bien diseñado instruye, inspira y reduce la frustración de los participantes.

De manera complementaria a la capacitación, la comunicación continua es determinante para mantener a los participantes informados y comprometidos. Asimismo, es fundamental que los científicos utilicen un lenguaje claro y directo para dar a conocer los objetivos, acciones y entregables del proyecto. Esto promueve una participación coordinada y eficiente entre el equipo de investigación y los voluntarios. En ocasiones, esta labor de comunicación puede no ser el dominio de los investigadores, por lo que es aconsejable adoptar la perspectiva de los voluntarios y de la sociedad en general para garantizar la continuidad y el éxito del proyecto.

Un proyecto de ciencia ciudadana, más que una tarea aislada, es una comunidad en sí misma. El uso de boletines periódicos, la interacción activa en redes sociales y las actualizaciones frecuentes sobre el progreso del proyecto son herramientas poderosas para mantener a los voluntarios conectados. Compartir los pequeños logros, los desafíos superados y, sobre todo, cómo sus contribuciones están generando un impacto real, fomenta un sentido de pertenencia y propósito que es vital para la retención a largo plazo de los participantes.

Por otro lado, la validación de datos es un componente ineludible. Dada la diversidad de participantes en los esquemas de ciencia ciudadana, la posibilidad de inconsistencias o imprecisiones en la información recopilada es inherente. Por ello, se deben implementar métodos robustos para validar la información, tales como la revisión por expertos para identificar anomalías, la validación cruzada entre pares (donde los propios participantes verifican los datos de otros) y el análisis estadístico para detectar valores atípicos y patrones inusuales. Estas estrategias garantizan la integridad científica de los datos y refuerzan la confianza en los resultados del proyecto.

Por otra parte, para sostener la motivación y la participación continua de los voluntarios, los incentivos y el reconocimiento son esenciales. Fomentar la participación va más allá de la mera instrucción; implica valorar el tiempo y el esfuerzo de cada persona. Si bien ofrecer recompensas tangibles, como certificados de participación, insignias digitales o productos promocionales del proyecto (camisetas o gorras), puede ser gratificante, el reconocimiento más poderoso a menudo es el más simple: celebrar públicamente sus contribuciones, destacar sus historias y mostrarles el impacto real de su trabajo. Este aprecio genuino refuerza su compromiso y los convierte en embajadores del proyecto, atrayendo a nuevos participantes y asegurando la vitalidad continua de la iniciativa.

Análisis y divulgación de resultados

Después de planificar y ejecutar un proyecto de ciencia ciudadana, la verdadera recompensa y el impacto duradero se materializan en las etapas finales. Es aquí donde el trabajo colectivo de los voluntarios se transforma en conocimiento científico útil para la toma de decisiones. Convertir un vasto conjunto de datos en un producto que contribuya al conocimiento colectivo del objeto de estudio es la culminación de todo el esfuerzo.

La primera fase de esta etapa es el procesamiento de datos. Una vez que se han validado y depurado, los datos recolectados por los ciudadanos deben organizarse y gestionarse de modo eficiente. Esto a menudo implica el uso de bases de datos especializadas y *software* de análisis avanzado, que permiten a los científicos extraer patrones, tendencias y correlaciones que a simple vista serían invisibles. La elección de las herramientas de

análisis adecuadas es crucial para convertir una colección de observaciones individuales en un conjunto de datos robusto y científicamente válido. Es en este punto donde la información se prepara para su verdadero propósito: generar conocimiento.

La utilidad de los productos y resultados es la razón de ser de cualquier proyecto de ciencia ciudadana. Los resultados tangibles van más allá de un simple informe. Los datos pueden ser un insumo para el diseño de políticas de conservación, por ejemplo, identificando áreas críticas para la protección de una especie. También pueden contribuir a la investigación científica, al proporcionar información a una escala espacial y temporal que los estudios tradicionales no alcanzan. Además, un proyecto de este tipo tiene un profundo impacto educativo, ya que sensibiliza al público sobre la importancia del monitoreo ambiental y su papel en él.

Para que un proyecto sea verdaderamente sostenible, es fundamental cerrar el ciclo con una retroalimentación efectiva orientada a los participantes. Es vital compartir los hallazgos con los voluntarios y mostrarles de forma clara y accesible cómo sus contribuciones se integraron en el panorama general. Esto genera confianza y transparencia y refuerza el sentido de pertenencia y propósito. Al constatar que sus horas de esfuerzo se tradujeron en un resultado real y significativo, los participantes se sienten valorados, lo que fomenta su colaboración futura en proyectos similares y fortalece la comunidad.

Para que el conocimiento originado tenga un impacto duradero, es necesaria la publicación de los resultados. Esto puede adoptar diversas formas, desde la publicación en revistas científicas para asegurar su rigor y credibilidad académica, hasta la difusión a través de informes accesibles o plataformas en línea dirigidas al público en general. La publicación de los hallazgos es el paso final que valida el esfuerzo colectivo y asegura que los resultados del proyecto de ciencia ciudadana han sido de utilidad a la comunidad de voluntarios y científicos, además de que se convierten en parte del conocimiento global, e influyen en la toma de decisiones y en la conciencia ambiental de la sociedad en su conjunto. Adicionalmente, en el caso de que durante el proceso de planeación, prueba u operación del proyecto se utilicen herramientas tecnológicas propias, o se generen productos innovadores, es recomendable registrarlos ante las instituciones encargadas de la protección de la propiedad intelectual de las obras científicas, tecnológicas o artísticas. Para el caso de México, la institución

encargada de este tipo de registros es el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Recursos disponibles para la implementación de proyectos

Actualmente, la incorporación de herramientas tecnológicas para potenciar el impacto de proyectos de ciencia ciudadana, a través del uso de teléfonos inteligentes, internet y redes sociales, nos presenta una amplia gama de opciones de acceso libre. Este apartado no busca realizar un análisis exhaustivo de las herramientas existentes, pues la dinámica acelerada de la tecnología lo volvería obsoleto en poco tiempo. A cambio, nos enfocaremos en los dos grandes escenarios que se presentan al momento de diseñar un proyecto que requiere la automatización de la captura de información, un tema que ya se abordó anteriormente en este libro y que ahora se discutirá desde una perspectiva de diseño estratégico.

En la planificación de un proyecto, la elección de la herramienta es una decisión con importantes implicaciones. En este sentido, hay dos caminos principales: usar una herramienta ya existente o desarrollar una propia. En ambos casos hay ventajas y desventajas que se deben evaluar en función de los objetivos y recursos.

Optar por una herramienta ya disponible ofrece la ventaja principal de la rapidez. Al no requerir fases de desarrollo, un proyecto puede comenzar de inmediato, ahorrando recursos valiosos que de otra forma se destinarían a la programación, el mantenimiento y las actualizaciones. Además, se evita la necesidad de una infraestructura de *hardware* propia para alojar el sistema. Sin embargo, esta conveniencia tiene sus contras. A menudo, el proyecto, en este caso, pierde la propiedad de los datos, lo que complica su divulgación. Asimismo, es probable que la información capturada necesite un posprocesamiento para ser útil a gran escala, lo que lleva tiempo y recursos en fases posteriores.

Por otro lado, diseñar una herramienta a la medida del proyecto garantiza un diseño *ad hoc*, es decir, adaptado a sus necesidades específicas. Esto asegura la propiedad total de los datos, un aspecto vital para la investigación y la publicación. Además, una herramienta propia resulta más eficiente al concatenar procesos, y puede ser registrada o patentada como

un producto del proyecto. No obstante, esta ruta demanda una inversión significativa: asignar recursos considerables al desarrollo, actualizaciones y mantenimiento, e incluir estas tareas en el plan de trabajo. Adicionalmente, se requiere una infraestructura de *hardware* para alojar el sistema y, potencialmente, el pago de licencias si el uso es masivo.

Consideraciones en la recolección y manejo de datos

En el contexto de la ciencia ciudadana, las consideraciones éticas y de privacidad en la recolección y el manejo de datos son fundamentales. Ignorar estos principios no solo pone en riesgo a los participantes y al proyecto en sí, también compromete su validez científica y su impacto a largo plazo. Un proyecto de esta naturaleza debe operar con el mismo rigor ético que cualquier otra investigación, situando el bienestar y la privacidad de sus colaboradores en un primer plano.

La privacidad es una preocupación central, especialmente cuando la información recopilada es sensible. Para mitigar estos riesgos, se debe despersonalizar el origen de los datos, lo cual implica eliminar cualquiera de los que lleven a identificar a la persona. Estas prácticas son en particular importantes en proyectos que involucran ubicaciones que no deberían conocerse. Por ejemplo, si se documenta la de especies en peligro, publicar las coordenadas exactas podría exponerlas a amenazas. En tales casos, lo aconsejable es reducir la precisión de la ubicación o manejar los datos con la máxima confidencialidad. Como la seguridad de la información es innegociable, se deben implementar medidas robustas como el uso de contraseñas seguras, la encriptación de datos y el almacenamiento en servidores protegidos para prevenir accesos no autorizados.

Por otra parte, la transparencia es la base para construir una relación de confianza con los voluntarios. Cada uno de estos debe saber con claridad qué datos se están recolectando, por qué son necesarios y cómo se utilizarán, almacenarán y divulgarán. Es vital hacerles saber quién tendrá acceso a la información y si tienen la opción de retirar su consentimiento y solicitar que sus datos sean eliminados. La entrega de un acuerdo de consentimiento informado es una práctica estándar que formaliza esta transparencia, lo que asegura que los voluntarios comprenden plenamente su papel y los términos de su participación.

El manejo ético de los datos es una obligación moral y, al mismo tiempo, una estrategia básica para el éxito del proyecto. Descuidar este aspecto resulta en pérdida de reputación, lo que daña la credibilidad de las instituciones involucradas y desincentiva la posterior participación del público. Por el contrario, un enfoque que prioriza la ética y la transparencia protege a los participantes, valida la calidad de los datos, fortalece la credibilidad de la ciencia ciudadana y garantiza que el esfuerzo colectivo se traduzca en un impacto positivo y duradero.

Además de la protección de los datos personales, la ética en los proyectos de ciencia ciudadana abarca otras consideraciones para garantizar la integridad científica y social. Un aspecto crítico es el sesgo de los datos, que puede surgir de una participación desigual. Si los voluntarios provienen de una demografía específica o de áreas geográficas limitadas, es probable que los datos recolectados no sean representativos del fenómeno en su totalidad, lo que lleva a conclusiones erróneas. Abordar este sesgo implica buscar activamente una participación diversa y utilizar metodologías estadísticas que permitan ponderar los datos para reflejar mejor la realidad del ecosistema estudiado. La visualización de zonas vulnerables es otro desafío ético importante. Publicar datos georreferenciados de alta precisión inadvertidamente expone a los ecosistemas o especies en riesgo a la explotación o daño. Es crítico aplicar un principio de cautela, optando por agregar los datos a un nivel espacial más amplio o restringir el acceso a la información más detallada a un grupo selecto de investigadores y gestores ambientales, para asegurar que la divulgación no genere un daño mayor.

La propiedad intelectual y el reconocimiento son también aspectos éticos de relevancia. Dado que los voluntarios son cocreadores del conocimiento, es fundamental establecer políticas claras sobre quién es el dueño de los datos y cómo se les dará crédito por sus contribuciones. En lugar de tratarlos como simples proveedores de datos, los ciudadanos deben ser reconocidos como socios legítimos en el proceso científico, lo que puede incluir el reconocimiento en publicaciones, la mención en informes públicos y la oportunidad de participar en el análisis de los resultados. Por último, la rendición de cuentas es indispensable. Los científicos tienen la responsabilidad ética de comunicar a los voluntarios cómo se utilizaron sus datos, qué impacto tuvieron y cuáles fueron los hallazgos. Este ciclo de retroalimentación fortalece la confianza y fomenta una relación de respeto

mutuo, lo que asegura que la colaboración se perciba como una asociación valiosa y no como una simple extracción de información.

Conclusión

La implementación exitosa de proyectos de ciencia ciudadana para el monitoreo de ecosistemas no depende de la tecnología por sí sola, sino también de una estrategia integral y bien articulada. Las directrices presentadas en este capítulo ofrecen una hoja de ruta práctica, destacando que el éxito se construye sobre tres pilares: un diseño riguroso, una ejecución centrada en el colaborador y un inquebrantable compromiso ético. Un proyecto que comienza con objetivos claros y medibles tiene una base sólida para la acción, mientras que una comunicación transparente y una capacitación efectiva aseguran la calidad de los datos y el compromiso de la comunidad. La adopción de prácticas éticas, desde la protección de la privacidad hasta el reconocimiento de las contribuciones, no es solo una obligación moral, sino el motor que fomenta la confianza y la sostenibilidad a largo plazo. Al integrar estos elementos, los proyectos de ciencia ciudadana pueden trascender la mera recolección de datos para convertirse en vehículos poderosos de participación, conocimiento e impacto social y ambiental.

Despedida

A lo largo de este libro, hemos recorrido un camino que nos ha llevado desde la conceptualización de la ciencia ciudadana y la inteligencia artificial hasta su aplicación tangible en el proyecto Collective View para el monitoreo del sargazo. Esta travesía ha puesto de manifiesto la enorme promesa de esta sinergia, pero también ha revelado que su éxito no es automático; se construye sobre cimientos de planificación meticulosa y un compromiso ético inquebrantable. Las recomendaciones presentadas en este capítulo final no son meras sugerencias teóricas, sino la síntesis de una experiencia real, pensadas para guiar a la próxima generación de proyectos con el fin de maximizar su impacto científico y social.

El éxito de estas iniciativas reside, en primer lugar, en una planificación rigurosa. Un proyecto de ciencia ciudadana debe nacer de una pregunta de investigación clara y de objetivos bien definidos, que orienten cada una de las decisiones subsiguientes. Solo a través de un diseño metodológico sólido es posible garantizar que las contribuciones de los voluntarios se conviertan en datos de calidad, aptos para el análisis científico y la toma de decisiones informadas. La elección de las herramientas tecnológicas, ya sean propias o de terceros, es un acto estratégico que debe alinearse con estos objetivos, considerando no solo los costos iniciales, sino la sostenibilidad y la propiedad de los datos a largo plazo.

Más allá de la metodología y la tecnología, la esencia de la ciencia ciudadana radica en la comunidad. La implementación exitosa de un proyecto requiere una estrategia social que priorice la participación y el compromiso. Esto implica una comunicación transparente, una capacitación efectiva y un ciclo de retroalimentación que valore el tiempo y el esfuerzo de cada

voluntario. Al convertir a los participantes en socios legítimos del proceso científico, y al mostrarles cómo sus contribuciones se traducen en resultados reales, se fomenta un sentido de pertenencia y propósito que es el verdadero motor de la sostenibilidad del proyecto.

Finalmente, el manejo ético y transparente de los datos es la base de la confianza y el rigor. Los proyectos tienen la responsabilidad moral y científica de proteger la privacidad de los participantes, de ser transparentes sobre el uso de la información y de reconocer el esfuerzo de sus colaboradores. Un enfoque que prioriza la ética en todos los aspectos, desde la recolección hasta la divulgación de los resultados, no solo valida la calidad de los datos, sino que también fortalece la credibilidad de la ciencia ciudadana en su conjunto. Las lecciones del proyecto Collective View nos enseñan que la tecnología es una herramienta poderosa, pero es la colaboración humana, guiada por la ética y la transparencia, la que transforma la observación individual en conocimiento colectivo y acción social. En un mundo donde los desafíos ambientales son cada vez más apremiantes, la ciencia ciudadana emerge como un modelo indispensable para construir un futuro más sostenible y participativo.

Con esta última página, llegamos al final de nuestro viaje a través del proyecto Collective View y su papel en el monitoreo del sargazo. Ha sido un recorrido que nos ha mostrado la poderosa sinergia entre la tecnología de punta y la colaboración humana, y cómo esta combinación puede ser la clave para abordar algunos de los desafíos ambientales más apremiantes de nuestro tiempo. Este libro, más que una crónica, es una invitación a la acción. Cada capítulo ha sido un recordatorio de que la ciencia no es una disciplina reservada para unos pocos, sino un esfuerzo colectivo en el que todos tenemos un papel que desempeñar. Desde la simple toma de una fotografía hasta la implementación de un algoritmo complejo, cada contribución ha demostrado que las pequeñas acciones individuales pueden sumarse para generar un impacto monumental.

Pero nuestro viaje no termina aquí; las lecciones del proyecto Collective View son el inicio de un camino que esperamos que muchos más decidan recorrer. Dejamos este libro con la profunda convicción de que los verdaderos guardianes de nuestros ecosistemas somos todos nosotros, y que, armados con la tecnología adecuada y un espíritu de colaboración inquebrantable, no hay desafío que no podamos enfrentar. Cerramos este libro no con un adiós, sino con un llamado a la aventura: a seguir explorando,

a seguir preguntando y, sobre todo, a seguir actuando. Que la historia del proyecto Collective View inspire a la próxima generación de ciudadanos científicos a utilizar su ingenio, su curiosidad y su pasión para construir un futuro más sostenible para todos.

*Collective View: De la ciencia ciudadana a la ciencia
abierta para el monitoreo del sargazo en las playas de México*
se terminó de editar en febrero de 2026
en San Cristobal de Las Casas, Chiapas, México.

¿Puede una sola persona cambiar el rumbo del planeta?

Quizá no por sí sola... pero sí puede hacerlo cuando se une a miles más.

Este libro es una invitación a descubrir el poder colectivo de la ciencia ciudadana y la inteligencia artificial para enfrentar los desafíos ambientales más urgentes de nuestro tiempo. Lejos de tecnicismos y fórmulas complicadas, aquí se narran historias reales, aprendizajes y experiencias donde la curiosidad de la gente común se convierte en conocimiento, y donde la tecnología más avanzada se pone al servicio del bien común.

A través de ejemplos prácticos, reflexiones y una mirada honesta a lo que motiva y detiene a las personas, este libro muestra cómo cualquier ciudadano puede aportar a la protección de los ecosistemas, desde una playa del Caribe hasta los paisajes más remotos.

Es un llamado a participar, a preguntar y a creer que cada acción, por pequeña que parezca, suma. Porque el futuro ambiental no se construye desde los laboratorios aislados, sino desde la voluntad colectiva de quienes deciden cuidar el planeta.

Tu curiosidad importa. Tu voz importa. Tu participación importa.

Este libro te mostrará por qué... y cómo empezar.

