

## **Tecnología Electromagnética Acelerada con Inteligencia Artificial: Desarrollos Actuales y Perspectivas Estratégicas**

Gastón Mazzei\*, Guillermo Guichal†, Federico Larroca‡

\*MARSUPIAL RF, CABA, Argentina

†EmTech S.A, Bariloche, Argentina

‡Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

[gastonmazzei95@gmail.com](mailto:gastonmazzei95@gmail.com)

**Abstract.** La creciente disponibilidad de la inteligencia artificial, junto con la proliferación de vehículos autónomos y tecnologías de microondas, nivela el terreno tecnológico y potencia a la ciencia local. La identificación temprana de tendencias globales permite compartir una visión estratégica del futuro, que suplementamos presentando avances obtenidos en el último año en tres líneas convergentes: (1) geolocalización robusta para navegación autónoma en entornos electromagnéticamente saturados; (2) detección encubierta y accesible de plataformas aéreas no tripuladas —incluidas aquellas con enlace óptico— y su extensión potencial a vectores terrestres de baja firma; (3) operaciones SIGINT potenciadas por IA para seguridad interior, búsqueda y rescate, y contrainteligencia. Integramos resultados experimentales explicados didácticamente, perspectivas tecnológicas futuras y el rol clave de la IA como multiplicador de capacidades nacionales frente a desafíos asimétricos.

**Keywords:** GPS-jamming, SIGINT, Radar, Navegación Autónoma, IA, Guerra Electrónica, Detección de Drones, CUAS

### **1 Introducción**

Los avances exponenciales en electrónica y software durante las últimas décadas han transformado el panorama de la defensa y la seguridad. Por ejemplo, la famosa “ley de Moore”[1] describió durante años cómo las computadoras pudieron reducir drásticamente su tamaño y costo, y a la vez aumentar su poder de cómputo. Un efecto similar ocurre en la tecnología de radiofrecuencia de microondas[2][3], posibilitando sistemas de radar, comunicaciones y guerra electrónica cada vez más compactos y asequibles. Asimismo, la miniaturización y abaratamiento de sensores, baterías y actuadores, así como su creciente fabricación en masa, ha impulsado la proliferación de plataformas aéreas no tripuladas (UAVs por sus siglas en inglés)[4][5]. Estas aeronaves pueden ser operadas remotamente en primera persona (FPV) o volar de forma autónoma siguiendo coordenadas y algoritmos de navegación, lo que las convierte en vectores tácticos de gran versatilidad.

Ante la disponibilidad masiva de estas tecnologías, surge un doble desafío para la defensa y la seguridad interior: (A) incorporarlas a nuestro favor (como multiplicadores de fuerza y herramientas de vigilancia) y (B) desarrollar contramedidas para protegernos de su uso malicioso. Este equilibrio exige anticipar tendencias y orientar la I+D estratégica hacia soluciones tecnológicas de efecto dual.

## 1.1 Revolución de la inteligencia artificial (IA) en sistemas críticos

La inteligencia artificial ha emergido como un factor nivelador y disruptivo. Desde hace décadas, con grandes hitos por ejemplo a mediados de los 90 y principios de 2010, el aprendizaje automático (o “*machine learning*” por sus siglas en inglés) y sus subcampos (aprendizaje profundo, aprendizaje por refuerzo, etc.) han revolucionado el procesamiento de información[6]. En lugar de programar manualmente cada detalle de un algoritmo, se entrena a las máquinas con datos para que aprendan representaciones y características relevantes por sí mismas. Por ejemplo, en la clásica tarea académica de distinguir perros de gatos en imágenes, el paradigma moderno descarta escribir código para detectar bigotes de gato u otras características definidas por humanos; en cambio, se entrena una red neuronal con miles de imágenes etiquetadas para que ésta aprenda por experiencia y elija qué patrones visuales distinguen un animal de otro. Este enfoque ha demostrado superar con creces los métodos basados en reglas fijas en infinidad de tareas complejas.

Sin embargo, la integración de IA en sistemas críticos debe hacerse con precaución. Que un modelo automático acierte el 99% de las veces no implica que podamos depositar en él ciegamente nuestra confianza, y por ende el éxito de nuestras misiones: es crucial comprender sus límites y garantizar redundancias. En entornos operativos sensibles (defensa, conducción autónoma, control aéreo, etc.), la adopción de la IA requiere no solo validación rigurosa, sino también idealmente explicabilidad y cierta supervisión humana. En suma, la IA ofrece soluciones inéditas pero no debería de eximir de responsabilidad a sus desarrolladores y usuarios.

Un segundo aspecto destacable es el efecto nivelador de la IA a través de los llamados agentes inteligentes. Equipos de ingeniería reducidos —incluso en países con recursos limitados— pueden hoy potenciar su productividad con asistentes avanzados (por ejemplo, modelos de lenguaje tipo ChatGPT). Esto reduce brechas tradicionales de horas-hombre frente a naciones más pobladas o ricas. El talento local, asistido por IA, puede atacar problemas complejos en menos tiempo y costo, democratizando en parte la innovación. Dicho de otro modo, la IA actúa como multiplicador de fuerzas en I+D: por una fracción del costo, nuestros ingenieros cuentan con una base de conocimiento y herramientas de diseño antes impensables. Esto es una oportunidad para naciones emergentes de acelerar etapas en el desarrollo tecnológico, siempre que se oriente estratégicamente.

## 1.2 Tendencias globales y estrategia local

Para definir líneas de desarrollo locales es necesario discernir amenazas reales vs. exageraciones tecnológicas, identificar nichos donde la inversión pueda rendir frutos sostenibles, y considerar el contexto geopolítico y comercial. Por ejemplo, se propone que la “soberanía tecnológica” no consiste en fabricar localmente productos genéricos que pueden ser importados por 50 dólares. Es más estratégico enfocar recursos en capacidades avanzadas no disponibles en el mercado, ya sea por restricciones en la exportación por los países más familiarizados con esas tecnologías[7][8], o porque tienen un costo prohibitivo para el presupuesto de naciones en vías de desarrollo. Además, hay características propias de las que hay que hacerse cargo. En el corto y mediano plazo, no tendremos acceso a una red densa de vigilancia por satélite, y seguirá vigente el patrón demográfico de vastas áreas

con baja densidad poblacional y climas diversos: desiertos, climas fríos, altas montañas, selvas densas y llanuras pampeanas.

Nuestro enfoque, entonces, ha sido seleccionar problemas relevantes y de vigencia duradera, evitando modas pasajeras que queden obsoletas en poco tiempo. También buscamos que los desarrollos tengan impacto dual: que sirvan tanto a defensa como a seguridad interior, e incluso con potencial de exportación a mercados similares.

Latinoamérica, África y otras regiones con desafíos asimétricos de seguridad pueden beneficiarse de soluciones de costo accesible que no dependan de infraestructuras costosas ni de insumos foráneos críticos. En particular, países amigos con menor acceso a tecnologías de punta (pero necesidades apremiantes en control fronterizo, antiterrorismo, etc.) serían socios naturales para productos resultantes de ésta visión. Bajo éstas premisas, en la siguiente sección presentamos tres líneas tecnológicas convergentes.

### 1.3 Señales ortogonalmente moduladas y sus propiedades

Finalmente exponemos un concepto central en las telecomunicaciones modernas. Es el uso de señales ortogonales para transmitir información en paralelo sin interferencia mutua. Dos señales  $s_i(t)$  y  $s_j(t)$  se dicen ortogonales si cumplen la **Eq. 1**

$$\int_0^T s_i(t) s_j(t) dt = 0 \quad \text{para } i \neq j \quad (1)$$

donde  $T$  es el período de observación. En la práctica, esto significa que múltiples flujos de datos pueden coexistir sobre el mismo canal físico siempre que sus formas de onda sean ortogonales entre sí.

La implementación más extendida es la modulación ortogonal por división de frecuencias (OFDM), base de estándares como LTE (4G) e ISDB-T (televisión digital terrestre). En OFDM, la señal transmitida se construye como una suma discreta de subportadoras ortogonales según la **Eq. 2**:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi k \Delta f t}, \quad 0 \leq t < T \quad (2)$$

donde  $X_k$  son los símbolos modulados,  $N$  es el número de subportadoras, y  $\Delta f$  es el espaciado entre ellas. La ortogonalidad se garantiza imponiendo

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (3)$$

de modo que en la ventana del símbolo cada portadora es ortogonal a todas las demás. En sistemas reales, el valor de  $\Delta f$  depende del estándar. Por ejemplo:

- En LTE (4G), el espaciado típico es  $\Delta f = 15$  kHz, con 12 subportadoras formando un bloque de recursos de 180 kHz[9]. Versiones posteriores (LTE-Advanced) admiten multiplicadores de 15 kHz (7.5, 30, 60, 120 kHz) para adaptarse a distintos anchos de banda, y en telefonía 5G la situación es prácticamente la misma. Para procesarlo, utilizamos software propio.

- En ISDB-T (televisión digital terrestre utilizada Sudamérica), las subportadoras están espaciadas en  $\Delta f \approx 1$  kHz (dependiendo del modo). Para procesarlo, utilizamos el software de código abierto llamado *gr-isdbt*[10][11].

El propósito de los estándares de telecomunicación es poder transportar información, la cual no es conocida a priori sino resultado de los usuarios del sistema. Sin embargo, la estructura OFDM incluye además señales piloto, insertadas periódicamente en subportadoras conocidas, que permiten a los receptores estimar el canal, sincronizar frecuencias y compensar distorsiones por propagación multicamino.

En el caso de tecnología celular de cuarta generación (LTE), el esquema de transmisión puede ser FDD (Frequency Division Duplex) o TDD (Time Division Duplex). En FDD se asignan bandas separadas para la comunicación de las torres a usuarios (downlink) y de usuarios a las torres (uplink), mientras que en TDD ambas direcciones comparten la misma banda y se separan en el tiempo. En ambos casos, además de la información del usuario, los terminales transmiten y reciben señales de señalización específicas (por ejemplo, “reference signals”, “synchronization signals”, “control channels”), que son esenciales para la coordinación de la red. Estas señales poseen estructura ortogonal y conocida, lo que las convierte en anclas valiosas para aplicaciones no convencionales: por ejemplo, para sistemas de navegación independientes de GNSS o para detección pasiva de drones, dado que sus propiedades matemáticas permiten realizar correlaciones precisas y obtener medidas de tiempo de llegada o corrimiento Doppler en entornos electromagnéticamente hostiles.

Cabe mencionar que las propuestas para redes de sexta generación (6G) integran nativamente comunicación y sensado, es decir, cada estación base funcionará simultáneamente como nodo de telecomunicaciones y como radar ambiental[12]. Sin embargo, su despliegue se prevé limitado a países altamente desarrollados y zonas urbanas densamente pobladas, dada la enorme infraestructura y densidad de celdas requerida. En regiones en vías de desarrollo o con baja densidad poblacional, es poco realista esperar que 6G esté disponible en el corto o mediano plazo. No por nada, la primera red celular a desplegarse en la Luna no será 5G ni 6G, sino una red de telefonía 4G, privilegiando robustez y simplicidad sobre la vanguardia tecnológica[13].

En resumen, la ortogonalidad de las subportadoras y la existencia de señales piloto y de control en estándares modernos no sólo facilitan la multiplexación eficiente y la resistencia a interferencia, sino que abren la puerta a aplicaciones estratégicas de seguridad y defensa que reutilizan estas señales como “iluminadores de oportunidad”.

## 2 Navegación autónoma robusta en entornos sin GPS/GNSS

### 2.1 Introducción a la problemática

Uno de los pilares de la operación de vehículos autónomos es la capacidad de posicionamiento y navegación. Hoy en día, el GPS y otros sistemas de navegación global por satélite (o “GNSS” por sus siglas en inglés) tales como Galileo, GLONASS, o Beidou, proveen posicionamiento global con precisión de metros o centímetros en condiciones ideales. Sin embargo, existen numerosas situaciones en las que las señales satelitales

pueden fallar o volverse inutilizables, dando lugar a los denominados entornos GPS-denegados. Las causas incluyen interferencias deliberadas (inhibidores o jammers de GPS), saturación o congestión espectral, condiciones físicas adversas (entornos urbanos "encañonados" por edificios, valles profundos, bosques densos) o simplemente la ausencia de visibilidad de suficientes satélites[14][15][16].

Por ejemplo, dispositivos generadores de interferencia GNSS de baja potencia hoy se consiguen fácilmente y pueden dejar inutilizados receptores de navegación en un radio considerable. Este riesgo es crítico tanto para operaciones militares (donde un adversario puede cegar el GPS de drones o misiles) como para aplicaciones de seguridad interior y protección de aviación y servicios de emergencias civiles.

Frente a este desafío, existen varias soluciones de navegación alternativa propuestas en la literatura y la industria. Una de las más clásicas es la navegación inercial (INS), basada en acelerómetros y giróscopos de alta precisión que integran las aceleraciones y rotaciones para estimar la trayectoria. Los sistemas inerciales más modernos, en la mayoría de los casos disponibles para países miembros OTAN, y en todos los casos con un costo significativo, pueden sostener la navegación por tiempo limitado con precisión aceptable. Sin embargo, en sus versiones más accesibles inevitablemente acumulan significativo error con el tiempo (deriva)[17].

Otra alternativa emergente es la navegación óptica: utilizar cámaras y procesar imágenes del entorno para orientar al vehículo. En entornos desconocidos, esto equivale a técnicas de visión por computador como la odometría visual y SLAM (localización y mapeo simultáneo), donde por ejemplo un drone compara consecutivamente las imágenes para deducir su movimiento y posición. Este enfoque ha pasado de ser experimental a implementaciones reales de fabricación masiva gracias al aumento del poder de cómputo: algoritmos de fusión sensores-cámara ya permiten, por ejemplo, que drones autónomos naveguen Rusia y Ucrania durante el día siguiendo referencias visuales del terreno cuando el GPS es inoperable[18]. Durante la noche, se pueden emplear cámaras infrarrojas/térmicas (con menor detalle) o iluminar la escena con LIDAR. No obstante, montar un LIDAR en un drone lo hace fácilmente detectable por su propia emisión, y las cámaras térmicas encarecen notablemente la plataforma. Adicionalmente, condiciones climáticas adversas (niebla, lluvia intensa) pueden impedir tanto la navegación óptica como la recepción GNSS, creando un vacío de referencias[19].

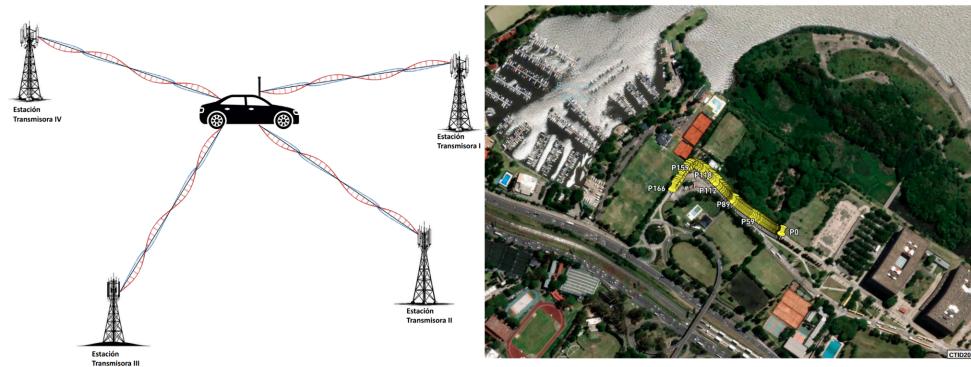
Por ello es crucial explorar métodos de navegación alternativos que no dependan de lo visual ni de satélites, y puedan ser fabricados a bajo costo. En este trabajo presentamos avances en un método de posicionamiento que aprovecha señales de radiofrecuencia ambientales preexistentes, conocidas como señales de oportunidad o iluminadores externos.

## 2.2 Desarrollo Local

La idea de fondo es similar al radar pasivo (sección 3): se usan emisores ya presentes en el medio (torres de telefonía celular, transmisores de TV y radio) como referencias para estimar la propia ubicación. Por ejemplo, un receptor puede medir la diferencia de tiempos de llegada (Time Difference of Arrival, TDOA) entre las señales emitidas por dos estaciones base celulares conocidas,  $\Delta t_{ij}$ , la cual se relaciona con la diferencia de distancias a esas estaciones ( $d_i - d_j = \frac{c}{\Delta t_{ij}}$ , con  $c$  la velocidad de la luz). Cada medición

de TDOA define una hipérbola sobre la cual debe estar el vehículo; intersectando varias hipérbolas de diferentes pares de emisores se puede deducir la posición absoluta. El concepto se ilustra en la **Fig. 1**. Alternativamente, si se dispone de múltiples antenas u otros métodos basados en movimiento, es posible estimar la dirección de arribo de una señal dada mediante radiogoniometría (ángulo de llegada), obteniendo líneas de posición que también pueden cruzarse para determinar coordenadas. Estos principios teóricos están bien establecidos; de hecho, fueron utilizados en sistemas de radionavegación anteriores al GPS (e.g. LORAN[20], VOR, radiogoniómetros VHF[21]). Sin embargo, la novedad aquí es aplicar estos métodos de manera oportuna y adaptativa, usando señales no diseñadas originalmente para navegación, y parasitando redes que ya están desplegadas en casi todos los entornos urbanos del mundo[22].

En la práctica, las señales modernas (como la de telefonía 4G/5G [9] o la TV digital [11]) contienen estructuras conocidas y sincronismos que facilitan su uso para posicionamiento. Al captar estas referencias, un dron puede estimar distancias relativas a varias torres celulares en rango. Nuestro desarrollo integra un receptor de amplio espectro con algoritmos de correlación y filtrado para extraer tiempos de vuelo diferenciales y, mediante técnicas de fusión sensorial (combinando con INS), calcular la posición cuando el GPS deja de estar disponible. El rol de la inteligencia artificial es doble: (1) aprender a distinguir la señal proveniente de la torre vs reflexiones, incluso en ausencia de visión directa (o por sus siglas en inglés “*Line Of Sight*”), y (2) reforzar el punto anterior en el contexto de buscar la ubicación de los transmisores antes de perder el acceso a la señal GPS, lo cual es importante porque es operacionalmente inviable que los usuarios provean la posición de las torres a su alrededor.



**Fig. 1.** (izquierda) Concepto del posicionamiento basado en iluminadores externos 4G (derecha) Resultados experimentales de la trayectoria estimada utilizando variaciones en la señal recibida de torres celulares al nivel del suelo. La trayectoria realizada, con forma de “L” para explorar dos segmentos entre sí perpendiculares, fue correctamente estimada dentro de parámetros aceptables ya que como puede observarse se superpone con la calle que es por donde circulaba el vehículo. La velocidad promedio fue de 30km/h.

Experimentalmente hemos validado esta técnica en entornos urbanos: tras perder la señal GNSS, un vehículo terrestre equipado con nuestro sistema es capaz de mantener un error de localización medio acotado (<5m) durante recorridos de unos pares de cientos de metros,

aprovechando emisiones de radio y telefonía locales al nivel del suelo. Los resultados pueden verse en la **Fig. 1**. Si bien esta precisión es inferior a la de GPS diferencial, es suficiente para navegación de emergencia o guiado de retorno, o incluso para guiarse contra cierto tipo de blancos. Cabe destacar que, por la naturaleza pasiva de la técnica, no se emite ninguna señal; el vehículo permanece indetectable desde el punto de vista electromagnético. En la literatura internacional existen reportes recientes de posicionamiento con señales de oportunidad de similar tipo, lo que confirma el interés global en esta línea[23][24][25][26][27].

Nuestra contribución radica en una implementación austera y eficaz adaptada a entornos locales: sin necesidad de infraestructura adicional, aprovechando componentes comerciales (COTS) y con procesamiento optimizado mediante IA para identificar las señales más útiles en cada contexto, intentando minimizar la cantidad de antenas utilizadas y sin depender de partes móviles.

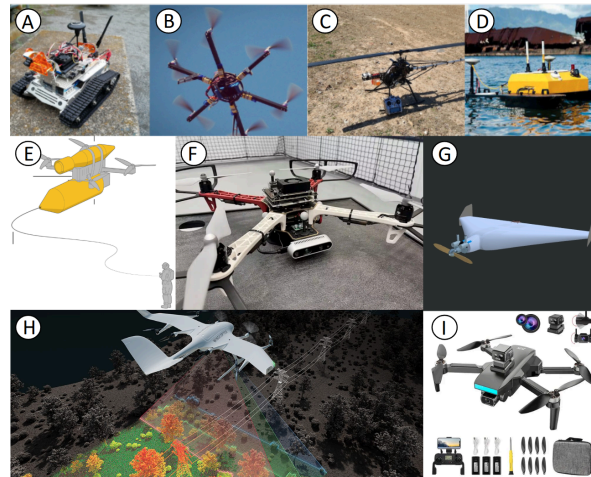
Los próximos pasos consisten en (1) aumentar la resolución espacial mediante la incorporación de más frecuencias, para así poder disminuir la deriva, y (2) mejorar la resolución espacial del sistema en ambientes urbanos más densos como por ejemplo el microcentro porteño, i.e. el centro de CABA, Argentina. En ambos casos el desafío radica en mantener el costo lo más bajo posible, usando la menor cantidad de antenas y canales digitalizadores posibles.

### 3 Detección pasiva de drones y amenazas aéreas de baja firma

#### 3.1 Introducción a la problemática

La detección de drones basada en su huella electromagnética (e.g. la señal usada durante la comunicación por Wi-Fi con el operario) debería ser suficiente para vigilar drones recreativos[28], pero sin dudas es una estrategia incompleta ante adversarios que emplean estrategias como las ilustradas en la **Fig. 2**. En consecuencia, lo ideal es detectar movimiento en el volumen aéreo, independientemente de que el drone emita o no.

En lo que respecta a detectar movimiento, los tradicionales radares activos son la herramienta más obvia. Pueden cubrir 360° y cubrir un radio de varios kilómetros, pero presentan desventajas operativas: en contextos de defensa, al transmitir pueden delatar la posición del operador (riesgo táctico), y en contextos de seguridad interior pueden interferir en entornos urbanos y requieren permisos, capacitación y mayor consumo energético - además de tener un costo por unidad considerable. Esto restringe su despliegue por fuerzas con presupuesto acotado o en misiones que demandan baja firma electromagnética. Incluso la OTAN admite públicamente la incapacidad de proveerle a cada unidad de combate un radar portátil en contextos de guerra[29]. Por ello adoptamos un enfoque pasivo, que evita transmitir y explota iluminadores de oportunidad ya presentes en el entorno —televisión abierta, radio FM, estaciones base celulares, etc.— reduciendo costo, consumo y riesgo para el operador.

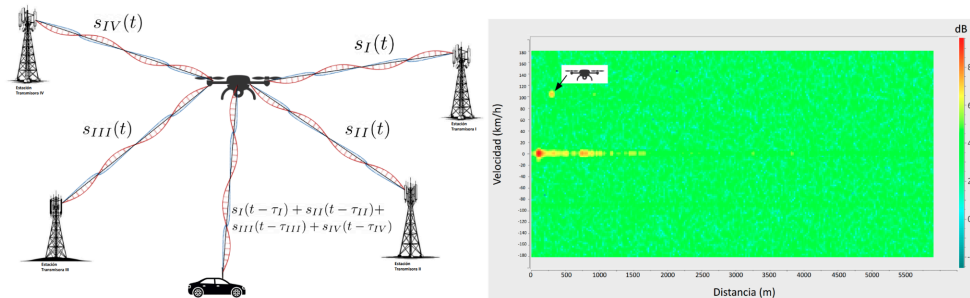


**Fig. 2.** Ejemplos de estrategias de navegación y comunicación en vehículos no tripulados. (A,B,C,D) Vehículos autónomos diseñados para seguir una trayectoria pre-establecida guiándose por GPS dentro del proyecto *Ardupilot*. (E) Drone operado a distancia (tipo “FPV”) a través de una conexión de fibra óptica adquirible por menos de 1000 USD, lo cual le otorga una huella electromagnética nula. (F) Drone capaz de posicionarse con la técnica SLAM visual (VSLAM) usando una cámara RGB, incluso en ausencia de señal GPS en espacios abiertos, a partir de mediados del 2025 fabricado en masa y disponible a un precio accesible. (G) Novedoso vehículo aéreo no tripulado de fabricación rusa, pilotado en primera persona a través de una conexión a la red celular LTE, (H) Drone con capacidades altimétricas usando LiDAR, que a la vez habilita navegación con técnicas VSLAM en ausencia de GPS y durante la noche. (I) Kit de drone para usos recreativos, fácilmente monitoreable por su huella electromagnética en WiFi 2.4 GHz.

### 3.2 Desarrollo Local

El principio es análogo al de la sección 2 (posicionamiento con señales externas), pero aquí el objetivo es la detección cinemática. Se instrumenta un conjunto de antenas y computadoras que permiten mediante un protocolo propietario parasitar el entorno de radio ya existente y así dar lugar a una vigilancia aérea portátil y encubierta. Los resultados se exhiben en la **Fig. 3**, donde se puede ver que el prototipo actual prácticamente cumple con los requerimientos de la OTAN en su última licitación (en realidad “llamado a la innovación”) para la detección de UAVs con enlaces de fibra óptica: operar en movimiento de hasta 50km/h y detectar drones de apróx. 100km/h en un rango de 1 km[29]. Actualmente, el I+D se enfoca en optimizar la resolución de direccionalidad y aumentar el rango manteniéndose un bajo costo.

Aquí la inteligencia artificial es fundamental. Además de heredar los beneficios de procesamiento en términos de clasificación de reflexiones y localización de transmisores explicados en la sección anterior, una vez encontrado un objeto volador no identificado el aprendizaje automático nos permite clasificarlo. Diferenciar un quadróptero de un drone con alas fijas o una avioneta, por ejemplo.



**Fig. 3.** (izquierda) Diagrama de funcionamiento de las operaciones móviles de vigilancia aérea encubierta. Parasitando transmisores existentes, la detección basada en movimiento implica encontrar patrones de interés. (derecha) Resultados experimentales en formato diagrama rango-doppler de la detección de un dron o vehículo aéreo no tripulado (UAV) en un rango mayor a 200 metros sin línea de visión directa (LoS). El dron era del tipo FPV marca y modelo DJI FPV Racer. Además, funciona para detectar vectores marítimos o terrestres en escenarios un poco más abiertos que las ciudades densamente pobladas.

En síntesis, la detección pasiva entrega alerta temprana C-UAS manteniendo al operario invisible. Se proyecta un bajo costo y una baja demanda energética, complementando los radares activos en escenarios urbanos, misiones discretas, y en general presupuestos ajustados. El criterio es simple y sólido: si se mueve, se puede distinguir por su reflexión con corrimiento doppler aunque no emita radiación propia. Esta línea complementa la navegación sin GNSS (sección 2) y también guarda relación con las capacidades SIGINT de la sección 4, dentro de una arquitectura común de sensores, SDR y procesamiento inteligente.

## 4 Breves comentarios sobre Inteligencia de señales (SIGINT) potenciada por IA en seguridad y defensa

Se complementan las secciones anteriores comunicando de forma breve y sin compartir resultados experimentales concretos ni técnicas propietarias el estado del arte y próximos obvios pasos en ciertas líneas de inteligencia de señales.

### 4.1 Métodos Activos

La última línea convergente que abordamos es la aplicación de técnicas SIGINT (Signal Intelligence) apoyadas por IA, tanto para operaciones de seguridad interior como para escenarios militares afines. SIGINT abarca la interceptación, monitoreo y análisis de emisiones electromagnéticas con propósitos de inteligencia[30][31]. Aquí nos centramos en señales de comunicaciones inalámbricas utilizadas por adversarios o blancos de interés – en particular, las señales de la red celular móvil – y cómo detectarlas y explotarlas de manera más efectiva mediante nuevas tecnologías (drones autónomos e IA).

Un hecho ineludible es que prácticamente todos los actores malignos en contextos de seguridad interior utilizan teléfonos celulares. Terroristas, criminales, y enemigos tácticos dependen de comunicaciones móviles para coordinarse. Por tanto, poder rastrear y monitorizar dichos dispositivos ofrece una ventana valiosa para operaciones de inteligencia y contrainteligencia. Desde hace décadas existen sistemas utilizados por fuerzas de seguridad para detectar y localizar celulares en un área: en los casos más elegantes serían una conjunción de equipos portátiles de radio-goniometría y los a veces controvertidos simuladores de antena celular, que fuerzan a los teléfonos a conectarse revelando su identidad y ubicación aproximada[32][33]. Casos de uso relacionados incluyen detectar presencia de equipos móviles en lugares como cárceles, o la anulación de señal celular en un área de formas más eficiente y por ende con un mayor rango que los simples inhibidores (o “*jammers*”) basados en fuerza bruta tradicionales[34][35].

Las innovaciones más recientes parecen centrarse en montar estos sensores en plataformas no tripuladas (drones) para maximizar su rango operativo[36]. Un dron equipado con un receptor celular especializado puede sobrevolar una zona (por ejemplo, una frontera permeable, una zona rural extensa o una urbanización conflictiva) y detectar la presencia de señales de telefonía emitidas por dispositivos activos. Los drones además ofrecen el beneficio de poder patrullar de forma automatizada una ruta, repitiendo barridos periódicos sin intervención humana constante.

Además, un caso de uso relevante es la búsqueda y rescate (SAR) en desastres[36]: tras un terremoto o inundación, muchas víctimas llevan encima sus teléfonos. Un dron SIGINT puede sobrevolar la zona afectada actuando como una estación base voladora que fuerza a los celulares a conectarse a ella (especialmente si no hay cobertura normal por caída de antenas), y así mapear dónde hay afectados. Se trata de una práctica cada vez más habitual dentro de la vanguardia tecnológica mundial en países potencia, lo cual la inteligencia artificial permite abaratar mediante la simplificación del I+D y así lograr democratizar su acceso.

Aquí el rol de la IA es clave: acelerar la I+D y evitar fabricar componentes específicos (con los costos de diseño, fabricación, validación y mantenimiento que ello conlleva) puede ocurrir siempre y cuando se pueda tener un comportamiento adecuado con componentes relativamente genéricos. Portar la operación clásica terrestre a plataformas aéreas no solo aumenta el rango operativo sino también la necesidad de cómputo. Procesar grandes volúmenes de datos en dispositivos embebidos y hacerlos lo más pequeños posibles para minimizar su peso requiere de una capacidad de optimización algorítmica considerable, pero una vez obtenida una base de datos suficientemente buena se puede entrenar una red neuronal de forma supervisada para que logre cumplir el mismo tipo de tareas que los algoritmos escritos a mano venían cumpliendo pero de forma más eficiente haciendo uso de tarjetas gráficas (o “*GPUs*” por sus siglas en inglés).

## 4.2 Métodos Pasivos

En cuanto a contrainteligencia y protección de comunicaciones, la IA también aporta soluciones novedosas. Una preocupación válida es la detección de operaciones de espionaje clandestinas o vigilancia ilegal, por ejemplo la presencia de transmisiones celulares desconocidas tratando de interceptar comunicaciones de funcionarios o ciudadanos[37]. Al

igual que la sección anterior, la ventaja de la IA es la de permitir la optimización algorítmica y la miniaturización a partir de aprender sobre algoritmos precisos pero ineficientes ya existentes. En resumen, la tendencia consiste en abandonar el procesamiento de alto nivel basado en la identificación de mensajes específicos a favor de permitirle al aprendizaje automático hacer uso de las radioseñales crudas, i.e. la fase “I” y cuadratura “Q” [38].

## 5 Conclusiones y perspectivas

Hemos presentado una visión integrada de desarrollos tecnológicos en marcha que combinan electromagnetismo, sistemas no tripulados e inteligencia artificial para afrontar desafíos actuales de seguridad y defensa. Las tres líneas exploradas —navegación autónoma robusta sin GPS, radar pasivo anti-drones, y SIGINT potenciado por IA— comparten un hilo conductor: aprovechar inteligentemente recursos existentes (datos, señales, hardware comercial) para compensar desventajas asimétricas y evitar depender de infraestructuras o inversiones prohibitivas.

En todos los casos, la IA actúa como catalizador: permitiendo extraer patrones de datos complejos (ya sea de imágenes, del espectro RF o de señales de comunicación) que serían imposibles de explotar mediante métodos convencionales en tiempo real.

Desde una perspectiva estratégica, éstas capacidades ofrecen a países como el nuestro la oportunidad de cerrar brechas tecnológicas en áreas críticas. No se trata de competir cabeza a cabeza con superpotencias en todos los frentes, sino de encontrar nichos donde soluciones creativas —y relativamente de bajo costo— brinden ventajas efectivas en escenarios localmente relevantes. Por ejemplo, un radar pasivo portátil bien podría ser la respuesta adecuada y accesible para proteger aeródromos, fronteras selváticas o instalaciones sensibles en naciones o contextos donde un sistema integrado de defensa aérea tradicional es inviable. Del mismo modo, la vigilancia SIGINT móvil puede dar a fuerzas de seguridad interior una ventaja táctica contra grupos criminales sin requerir inversiones multimillonarias, además de robustecer respuestas en escenarios de desastres naturales y servir a cuestiones de seguridad interior como el control del acceso no autorizado a la red celular en cárceles.

Mirando al futuro, es de esperar que la IA continúe permeando cada vez más en sistemas de defensa, pero siempre hará falta la supervisión humana y la estrategia detrás. La adopción responsable de éstas tecnologías requiere formar personal calificado capaz de entender tanto las fortalezas como las limitaciones de los algoritmos.

**Asimismo, fortalecer la soberanía tecnológica implicará invertir sostenidamente en I+D nacional, fomentar colaboraciones público-privadas y, muy importante, contar con el apoyo de las instituciones (FF.AA., agencias de seguridad) no sólo como usuarios finales sino como socios que muestran interés sin necesidad de comprometer presupuesto para efectivamente disminuir el riesgo financiero frente a la vista de inversores que nos permitirán acelerar los desarrollos multiplicando nuestra planta de ingenieros y ayudar así a cerrar la brecha entre la defensa, la ciencia y los capitales privados.**

En síntesis, destacamos que los resultados experimentales logrados hasta ahora sientan una base sólida, pero para llevarlos al nivel productivo se necesita un impulso adicional. En particular, la transición de prototipos a productos operativos podría acelerarse con

inversiones focalizadas y programas de innovación específicos. Una forma de catalizar esto, además del financiamiento, es mediante la firma de manifestaciones de interés, ejercicios conjuntos y retroalimentación temprana por parte de las fuerzas usuarias. Contar con escenarios de prueba reales y la promesa de implementaciones piloto ayuda a alinear los desarrollos con las necesidades concretas y justificar la confianza de inversores locales. Creemos firmemente que la mejor manera de retener talento científico y generar riqueza genuina es aplicando el conocimiento a resolver problemas tangibles de nuestro entorno, con potencial exportador. Los ejemplos presentados en este artículo son un paso en esa dirección: demuestran que, con creatividad e ingenio, es posible avanzar tecnológicamente incluso con recursos limitados, maximizando el uso de herramientas modernas como la IA y aprovechando las ventajas de un mundo cada vez más interconectado.

## Referencias

1. Intel Corporation: Understanding Moore's Law. Intel Newsroom (2025). <https://newsroom.intel.com/tech101/understanding-moores-law>
2. Jiang, W., Zhou, Q., He, J., Habibi, M.A., Melnyk, S., El-Absi, M., Han, B., Di Renzo, M., Schotten, H.D., Luo, F.L., El-Bawab, T.S., Juntti, M., Debbah, M., Leung, V.C.M.: Terahertz Communications and Sensing for 6G and Beyond: A Comprehensive Review. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 26(4), 2326–2381 (2024). <https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3385908>
3. E. T. Michailidis, K. Maliatsos and D. Vouyioukas, "Software-Defined Radio Deployments in UAV-Driven Applications: A Comprehensive Review," in *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, vol. 5, pp. 1545-1586, 2024, doi: 10.1109/OJVT.2024.3477937
4. Floreano, D., Wood, R. Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature* 521, 460–466 (2015). <https://doi.org/10.1038/nature14542>
5. Elmeseiry, N., Alshaer, N., Ismail, T.: A Detailed Survey and Future Directions of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with Potential Applications. *Aerospace* 8(12), 363 (2021). <https://doi.org/10.3390/aerospace8120363>
6. Schmidhuber, J.: Annotated History of Modern AI and Deep Learning. arXiv preprint arXiv:2212.11279 (2022). <https://arxiv.org/abs/2212.11279>
7. UAV Navigation (Grupo Oesía): ITAR-free navigation systems. UAV Navigation Blog (2021). Available at <https://www.uavnavigation.com/company/blog/itar-free> (accessed on August 22, 2025).
8. Voronova, A.: Open-Source Passive Radar Taken Down For Regulatory Reasons. Hackaday Blog (2022). Available at <https://hackaday.com/2022/11/19/open-source-passive-radar-taken-down-for-regulatory-reasons/> (accessed on August 22, 2025).
9. ETSI: 4th Generation (LTE). ETSI – Long Term Evolution (LTE) technology overview. Available at <https://www.etsi.org/technologies/mobile/4g> (accessed on August 22, 2025).
10. git-artes: gr-isdbt (DTV ISDB-T in GNU Radio). GitHub repository. <https://github.com/git-artes/gr-isdbt> (accessed on August 22, 2025).
11. Larroca, F., Guridi, P.F., Sena, G.G., González-Barbone, V., Belzarena, P.: gr-isdbt: An ISDB-T 1-segment receiver implementation on GNU Radio. In: 2015 Latin American Computing Conference (CLEI), Arequipa, Peru, pp. 1–8. IEEE (2015). <https://doi.org/10.1109/CLEI.2015.7360050>
12. Nokia Bell Labs: Network as a Sensor – 6G Technologies. Nokia.com (2022). Available at <https://www.nokia.com/bell-labs/research/6g-networks/6g-technologies/network-as-a-sensor/> (accessed on August 22, 2025).
13. Nokia Bell Labs: Networking the Moon and beyond – Space Communications. Nokia.com (2025).

- Available at <https://www.nokia.com/bell-labs/research/network-fundamentals/space-communications/> (accessed on August 22, 2025).
14. Zhu, N., Marais, J., Bétaille, D., Berbineau, M.: GNSS Position Integrity in Urban Environments: A Review of Literature. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 19(9), 2762–2778 (2018). <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2766768>
  15. Zidan, J., Adegoke, E.I., Kampert, E., Birrell, S.A., Ford, C.R., Higgins, M.D.: GNSS Vulnerabilities and Existing Solutions: A Review of the Literature. *IEEE Access* 9, 153960–153976 (2021). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2973759>
  16. Li, X., Chen, L., Lu, Z., Wang, F., Liu, W., Xiao, W., Liu, P.: Overview of Jamming Technology for Satellite Navigation. *Machines* 11(7), 768 (2023). <https://doi.org/10.3390/machines11070768>
  17. Nahavandi, S., Alizadehsani, R., Nahavandi, D., Mohamed, S., Mohajer, N., Rokonzaman, M., Hossain, I.: A Comprehensive Review on Autonomous Navigation. *ACM Comput. Surv.* 57(9), Article 234, 67 pages (2025). <https://doi.org/10.1145/3727642>
  18. Kesteloo, H.: New VSLAM Drone Platform Revolutionizes GPS-Denied Navigation. *DroneXL Blog* (2025). Available at <https://dronexl.co/es/2025/06/24/vslam-drone-gps-denied-navigation/> (accessed on August 22, 2025).
  19. Kapski, A.M.: SLAM Systems: Overview of Algorithms and Applications. *Bull. Mil. Univ. Technol.* 74(1), 37–47 (2025). <https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.2264>
  20. Stanford GPS Lab: Enhanced Long-Range Navigation (eLORAN). Stanford University (2009). Available at <https://gps.stanford.edu/research/early-gpsnt-research/enhanced-long-range-navigation-eloran> (accessed on August 22, 2025).
  21. Federal Aviation Administration (FAA): AIM – Chapter 1, Section 1: Navigation Aids. FAA Aeronautical Information Manual (2025). Available at [https://www.faa.gov/air\\_traffic/publications/atpubs/aim\\_html/chap1\\_section\\_1.html](https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aim_html/chap1_section_1.html) (accessed on August 22, 2025).
  22. International Telecommunication Union (ITU): Facts and Figures 2023 – Mobile Network Coverage. ITU (2023). Available at <https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/2023/10/10/ff23-mobile-network-coverage/> (accessed on August 22, 2025).
  23. Kassas, Z., Abdullah, A., Lee, C., Jurado, J., Wachtel, S., Duede, J., Hoeffner, Z., Hulsey, T., Quirarte, R., Tay, R.: Protecting the Skies: GNSS-less Aircraft Navigation with Terrestrial Cellular Signals of Opportunity. In: *Proc. ION GNSS+ 2022*, pp. 1014–1025 (2022). <https://doi.org/10.33012/2022.18579>
  24. Shamaei, K., Khalife, J., Kassas, Z.M.: Exploiting LTE Signals for Navigation: Theory to Implementation. *IEEE Trans. Wireless Commun.* 17(4), 2173–2189 (2018). <https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2789882>
  25. Sweat, T.: GNSS-Denied Navigation Using LTE Signals of Opportunity on Low-Cost, Low-SWaP Hardware. Master’s thesis, Brigham Young University, Department of Electrical and Computer Engineering (2025). Available at <https://scholarsarchive.byu.edu/etd/10777>
  26. Winter, A., Morrison, A., Sokolova, N.: Analysis of 5G and LTE Signals for Opportunistic Navigation and Time Holdover. *Sensors* 24(1), 213 (2023). <https://doi.org/10.3390/s24010213>
  27. Brevick, A., Strandjord, K., Wang, P.: Evaluating Navigation Augmentation with LTE in the Urban Signal Environment. In: *Proc. International Technical Meeting of The Institute of Navigation (ION ITM 2023)*, Long Beach, CA, USA, pp. 1154–1168 (2023). <https://doi.org/10.33012/2023.18644>
  28. Bi, L., Xu, Z.X., Yang, L.: Low-cost UAV detection via WiFi traffic analysis and machine learning. *Sci. Rep.* 13, 20892 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47453-6>
  29. NATO Allied Command Transformation (ACT): Frontline Innovation: NATO’s 16th Innovation Challenge Counters Fibre-Optic Controlled Drone Threats. *NATO ACT Articles* (2025). Available at <https://www.act.nato.int/article/innovation-challenge-fibre-optic-drones/> (accessed on August 22, 2025).

30. Central Intelligence Agency (CIA), SIGINT Committee: Definition of Signals Intelligence. Memorandum, Office of the Chairman, Director of Central Intelligence, 24 March 1983. Available at <https://www.cia.gov/readingroom/docs/CIA-RDP85M00158R000200120035-1.pdf> (accessed on August 22, 2025).
31. National Security Agency (NSA): Signals Intelligence (SIGINT) Overview. NSA.gov (2025). Available at <https://www.nsa.gov/Signals-Intelligence/Overview/> (accessed on August 22, 2025).
32. Palamà, I., Gringoli, F., Bianchi, G., Blefari-Melazzi, N.: IMSI Catchers in the wild: A real world 4G/5G assessment. *Comput. Netw.* 194, 108137 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108137>
33. Gruzd, O.I., Kvashuk, O.D., Vorobyov, M.V.: Legal regulation and ethical aspects of the use of IMSI-Catcher. *Ukrainian Police: Theory, Legislation, Practice* 4, 3–8 (2024). <https://doi.org/10.32782/2709-9261-2024-4-12-1>
34. Pirayesh, H., Zeng, H.: Jamming Attacks and Anti-Jamming Strategies in Wireless Networks: A Comprehensive Survey. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 24(2), 767–809 (2022). <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3159185>
35. Skokowski, P., et al.: Practical Trial for Low-Energy Effective Jamming on Private Networks With 5G-NR and NB-IoT Radio Interfaces. *IEEE Access* 12, 51523–51535 (2024). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3385630>
36. Albanese, A., Sciancalepore, V., Costa-Pérez, X.: SARDO: An Automated Search-and-Rescue Drone-Based Solution for Victims Localization. *IEEE Trans. Mobile Comput.* 21(9), 3312–3325 (2022). <https://doi.org/10.1109/TMC.2021.3051273>
37. Tucker, T., Bennett, N., Kotuliak, M., Erni, S., Capkun, S., Butler, K., Traynor, P.: Detecting IMSI-Catchers by Characterizing Identity Exposing Messages in Cellular Traffic. University of Florida and ETH Zurich (preprint).
38. Richter, Y., Danieli, E., Levi, I., Richter, R.: A Taxonomy of Multi-Modal Cyber Radio Frequency (CRF) Mitigation Based on Passive Geo-Location and Hardware Characteristics. In: *Proc. IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas, Biomedical Engineering and Electronic Systems (COMCAS 2024)*, Tel Aviv, Israel, pp. 1–6 (2024). <https://doi.org/10.1109/COMCAS58210.2024.10666202>