

Planificación Urbana de Baja Altitud: Elementos, Vías de Implementación y Respuestas de Planificación para la Coordinación Tierra-Aire

HUANG Jianzhong, HE Jiawen, ZHANG Weicong, XIAO Zuopeng, WU Zhiqiang

Resumen: El desarrollo de la economía de baja altitud ha generado nuevas exigencias para la utilización integrada del suelo y el espacio aéreo. En la planificación urbana de baja altitud, la coordinación tierra-aire se ha vuelto esencial para construir redes efectivas de servicios de baja altitud. Sin embargo, la investigación existente se ha centrado principalmente en cuestiones técnicas y carece de un análisis de los elementos y las vías de implementación desde una perspectiva de organización espacial. Tomando como ejemplo la logística de entrega con drones, este artículo, mediante una revisión bibliográfica y un estudio de casos, analiza los elementos, características y vías de implementación de la colaboración tierra-aire, examina los desafíos prácticos y propone estrategias de planificación correspondientes. El estudio encuentra que la coordinación tierra-aire se caracteriza por la coordinación multiactor de escenarios, la coordinación multiobjetivo de redes y la coordinación multinivel de nodos. En cuanto a la implementación, sigue una vía que jerarquiza la demanda para construir un espectro de escenarios de servicio, ancla los elementos terrestres para organizar las redes de rutas, e integra los nodos de instalaciones en el entorno construido. Para ello, el estudio sugiere que la planificación urbana de baja altitud debe identificar las necesidades reales, promover una planificación jerárquica, mejorar el control del espacio aéreo, coordinar el desarrollo de rutas, innovar los mecanismos de gestión e integrar las instalaciones en una red. Estas medidas pueden proveer las garantías espaciales para avanzar en el desarrollo coordinado de las operaciones terrestres y aéreas.

Palabras clave: economía de baja altitud; entrega con drones; coordinación tierra-aire; nueva infraestructura; nuevas fuerzas productivas de calidad

Desde que la economía de baja altitud fue incorporada por primera vez al Esquema de Planificación de la Red Nacional Integral de Transporte Tridimensional en 2021[1], las actividades de vuelo de baja altitud han estimulado rápidamente el desarrollo de industrias conexas, incluida la fabricación de aeronaves[2]. Han surgido aplicaciones en diversos campos, tales como la entrega logística, la inspección de infraestructuras, el rescate de emergencia, las operaciones agrícolas y el turismo cultural. Entre estas aplicaciones, la entrega con drones ha experimentado un rápido desarrollo, impulsada particularmente por empresas como China Post, JD.com, Meituan y SF Express. Los servicios de entrega con drones se han aplicado cada vez más en zonas comerciales urbanas de alta densidad, regiones rurales remotas, áreas escénicas, parques industriales, islas y escenarios de respuesta a desastres, proporcionando entrega rápida de alimentos, productos frescos, suministros médicos y materiales de emergencia. En comparación con los sistemas logísticos convencionales, la entrega con drones depende menos de la infraestructura de transporte terrestre y puede superar barreras geográficas, al tiempo que mejora significativamente la eficiencia del transporte. Como ejemplo relevante de cómo la economía de baja altitud

contribuye al desarrollo de nuevas fuerzas productivas de calidad[2], la entrega con drones se ha convertido en un fenómeno clave que requiere atención en la planificación urbana de baja altitud.

La rápida expansión de la entrega con drones demuestra que los recursos de baja altitud pueden conectar y reorganizar eficazmente los sistemas terrestres de oferta y demanda[3-5]. Aunque los drones y el vuelo de baja altitud constituyen los principales soportes y modos operativos de la logística de baja altitud, sus operaciones siguen dependiendo en gran medida de instalaciones, operadores, sistemas de información y condiciones espaciales terrestres. Las rutas de vuelo y las instalaciones de despegue y aterrizaje también están condicionadas por factores terrestres. Por lo tanto, la entrega con drones no es simplemente un proceso de conexión y transporte dentro del espacio aéreo; representa más bien la extensión de los recursos terrestres hacia el espacio de baja altitud y la incorporación espacial de los recursos aéreos en los entornos urbanos. En otras palabras, el desarrollo de la economía de baja altitud no puede separarse de los sistemas espaciales terrestres, y la investigación sobre el transporte de baja altitud debe enfatizar la relación coordinada entre los sistemas terrestre y aéreo.

Los estudios existentes sobre la coordinación tierra-aire en el desarrollo de baja altitud pueden resumirse en tres categorías. En primer lugar, algunas investigaciones examinan cómo los recursos terrestres y los sistemas de gestión influyen en la capacidad del espacio aéreo[6], la evaluación de riesgos[7], la planificación de rutas[8-9] y la gestión operativa[10-11]. En segundo lugar, la investigación se centra en la coordinación entre los drones y los modos de transporte terrestre[12], incluida la colaboración entre drones y camiones[13], vehículos eléctricos[14-15], vehículos autónomos[16] y robots[17]. En tercer lugar, algunos estudios analizan estrategias de optimización para la disposición de nodos[18-19], el diseño de rutas y la asignación de tareas desde la perspectiva de la coordinación tierra-aire[20-21]. Sin embargo, la investigación existente se ha concentrado primordialmente en los campos de la aviación y el transporte, haciendo énfasis en el desarrollo de algoritmos y la optimización tecnológica. Además, son relativamente pocos los estudios que han incorporado casos reales para investigar la organización espacial de la coordinación tierra-aire, incluyendo la composición de elementos terrestres y aéreos, los mecanismos de coordinación y las implicaciones para la planificación. En consecuencia, la relación entre el uso del suelo, el desarrollo espacial, la configuración de infraestructuras y la planificación de baja altitud permanece insuficientemente explorada.

Para abordar esta brecha, este estudio analiza los elementos estructurales y los requisitos técnicos de la coordinación tierra-aire en el vuelo de baja altitud, e identifica las características y los mecanismos internos de la coordinación en la entrega con drones. Mediante estudios de caso de empresas líderes, explora las vías de implementación de la coordinación tierra-aire basada en la entrega con drones, discute los desafíos prácticos y propone respuestas de planificación. El estudio tiene como objetivo proporcionar orientaciones metodológicas y de política para integrar la coordinación tierra-aire en la planificación urbana de baja altitud.

1. Elementos y Requisitos de la Coordinación Tierra-Aire

1.1. Elementos y Requisitos Técnicos de la Coordinación Tierra-Aire en el Vuelo de Baja Altitud

Conceptualmente, la coordinación tierra-aire puede rastrearse hasta el marco más amplio de

la "Red Integrada Espacio-Aire-Tierra" (Space-Air-Ground Integrated Network, SAGIN)[13, 17, 22] (Figura 1). Este marco se sustenta en sistemas de comunicación e información provistos por tecnologías espaciales, combinados con sistemas de infraestructura terrestre y estándares de datos unificados, para posibilitar el intercambio de información en tiempo real y la asignación coordinada de tareas de vuelo tanto en el tiempo como en el espacio. Mediante la integración y utilización de diferentes recursos, soporta actividades de transporte que involucran aeronaves tripuladas, drones y dirigibles, configurando así un sistema operativo colaborativo eficiente y estable[24].

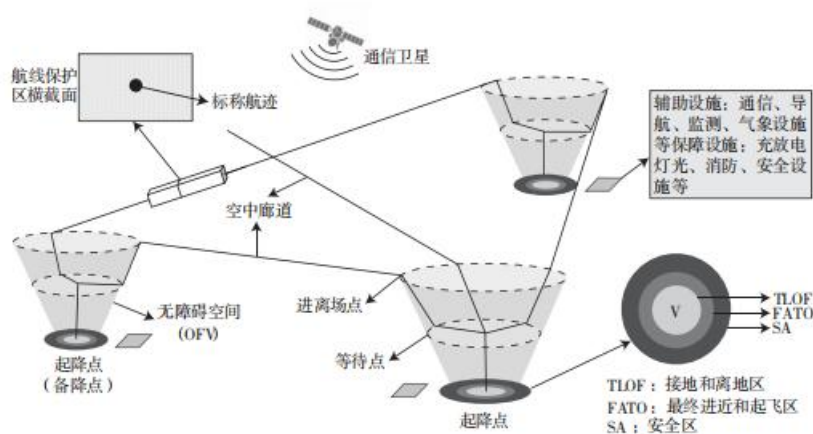


Fig. 1. Sistema de coordinación tierra-aire y sus elementos para el vuelo de baja altitud
El sistema aéreo comprende principalmente: los volúmenes libres de obstáculos (Obstacle-Free Volumes, OFV) requeridos para las operaciones verticales de despegue y aterrizaje de las aeronaves; los corredores aéreos que conectan los distintos sitios de despegue y aterrizaje; y las clasificaciones del espacio aéreo establecidas para garantizar la seguridad de las operaciones de vuelo. El volumen libre de obstáculos se refiere a un área espacial en forma de embudo sobre un sitio de despegue y aterrizaje vertical, diseñada para reducir la interferencia del entorno circundante, el ruido y los obstáculos durante las operaciones de las aeronaves[25].

El espacio aéreo generalmente se divide según diferentes niveles de permiso operativo, incluyendo zonas de vuelo permitidas, zonas controladas y zonas prohibidas. Las rutas de vuelo se ubican típicamente dentro de las zonas permitidas, donde las operaciones con drones pueden realizarse sin procedimientos adicionales de aprobación; las zonas controladas requieren autorización previa; y las zonas prohibidas restringen toda actividad de drones. El sistema terrestre se refiere primordialmente a las instalaciones de despegue y aterrizaje, que soportan las operaciones de drones que involucran carga, descarga de mercancías y transferencia de pasajeros. Estas instalaciones incluyen sitios de aterrizaje tipo hub, armarios o puntos de descenso para la transferencia de carga, y áreas de aterrizaje de emergencia reservadas para condiciones imprevistas tales como cambios meteorológicos o interferencias electromagnéticas. Desde una perspectiva espacial, las instalaciones de despegue y aterrizaje se componen de áreas de contacto y despegue (TLOF), áreas de aproximación final y despegue (FATO), áreas de seguridad (SA) e infraestructura de apoyo asociada[22]. El TLOF proporciona la plataforma física para el aterrizaje y despegue de la aeronave[26]; el FATO soporta los procedimientos de vuelo estacionario, aterrizaje y despegue; y las áreas de seguridad actúan como zonas de protección para reducir los riesgos

causados por desviaciones de las áreas operativas[25]. Las instalaciones de apoyo incluyen espacios de estacionamiento, sistemas de comunicación, navegación, monitoreo, sistemas meteorológicos, centros de mando, plataformas de datos, áreas de almacenamiento, instalaciones de carga, sistemas de iluminación y equipos contra incendios. En conjunto, estos elementos constituyen el marco espacial fundamental para la coordinación tierra-aire en el vuelo de baja altitud.

1.2. Características y Requisitos Internos de la Coordinación Tierra-Aire en la Entrega con Drones

El marco anterior explica los elementos clave de los sistemas de coordinación tierra-aire en el vuelo de baja altitud desde una perspectiva vertical y clarifica los requisitos técnicos para lograr la coordinación entre los diferentes elementos. En conjunto, estos elementos establecen el modelo operativo fundamental de la coordinación tierra-aire (Figura 2). Sin embargo, desde la perspectiva de las operaciones reales de entrega con drones, la coordinación tierra-aire involucra dimensiones y requisitos más complejos.

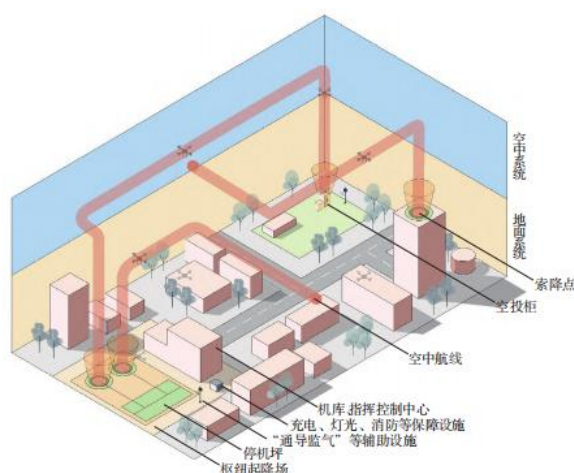


Fig. 2. Esquema de los sistemas de vuelo de baja altitud con coordinación tierra-aire

1.2.1. Coordinación Multiactor de Escenarios

La entrega con drones es esencialmente un servicio de logística de terceros que conecta a los proveedores de bienes y a los usuarios del lado de la demanda (Figura 3). Por lo tanto, el significado primordial de la coordinación tierra-aire radica en coordinar los productos, los actores de la oferta y la demanda, y los escenarios espaciales dentro de los procesos de entrega con drones.

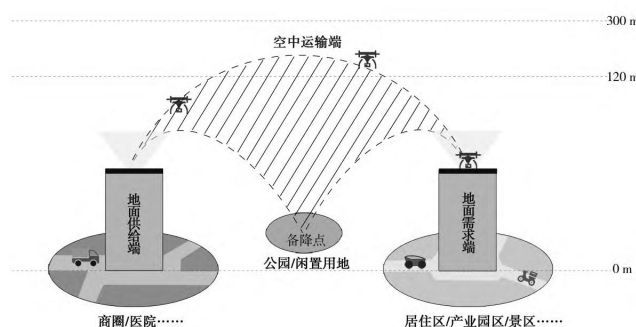


Fig. 3. Coordinación tierra-aire de la entrega con drones

Por ejemplo, la entrega de alimentos y bebidas desde zonas comerciales a los clientes representa un escenario urbano de entrega instantánea con drones; el transporte de

muestras médicas desde puntos de recolección distritales a centros urbanos de análisis representa la logística médica de baja altitud; la entrega de productos de primera necesidad desde bases costeras a comunidades insulares representa el transporte transmarítimo de baja altitud; el transporte de suministros de emergencia desde instalaciones de almacenamiento a zonas de desastre representa la entrega de emergencia con drones; la transferencia de equipos de construcción desde estaciones de servicio a sitios de obra representa la logística de ingeniería; y el transporte de productos agrícolas desde tierras de cultivo a estaciones de recolección representa la logística agrícola.

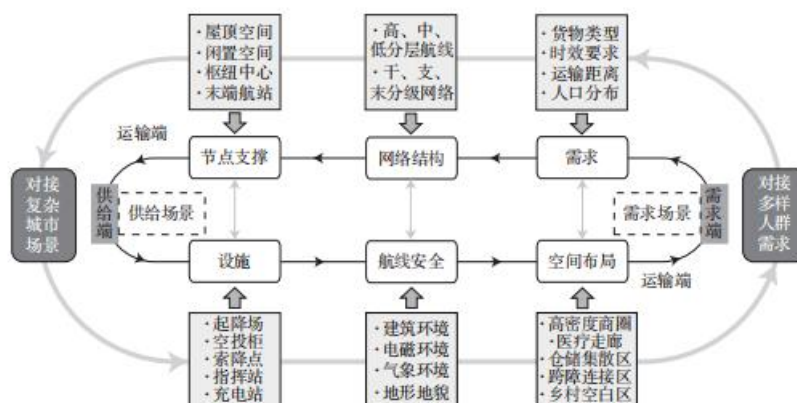


Fig. 4. Lógica de la vía de implementación de la coordinación tierra-aire para la entrega con drones

Las características de los productos, los actores de la oferta y la demanda, y los contextos espaciales determinan conjuntamente la frecuencia de entrega, la distribución origen-destino, la distancia de vuelo, el tiempo de respuesta y la estructura operativa de las redes "troncal-rama-terminal" (Figura 4). Estos factores constituyen la base para el diseño de las redes de rutas y el establecimiento de los sistemas de coordinación tierra-aire.

1.2.2. Coordinación Multiobjetivo de Redes

La investigación existente orientada a la tecnología sobre la coordinación tierra-aire se enfoca principalmente en garantizar la seguridad de vuelo y la fiabilidad de las rutas desde la perspectiva de los sistemas de transporte aéreo. En comparación con el transporte aéreo convencional, la entrega con drones opera a altitudes más bajas, lo que implica que la seguridad de vuelo debe considerar una gama más amplia de factores relacionados con el suelo, incluyendo el terreno, el uso del suelo, los entornos construidos, las actividades superficiales y la distribución de la población (Figura 4). Más allá de las consideraciones de seguridad, estos factores también influyen en múltiples objetivos. Por ejemplo, la determinación de rutas con base en las actividades terrestres puede mejorar la eficiencia económica; la consideración de las diferencias espaciales en la oferta y la demanda urbana puede mejorar la accesibilidad de los servicios de entrega con drones en áreas de alta demanda y desatendidas; la integración de drones con camiones, autobuses y transporte ferroviario puede mejorar la eficiencia operativa y la asequibilidad mediante el aprovechamiento de las ventajas de los distintos modos de transporte; y dicha integración puede fortalecer la resiliencia de la red. Por lo tanto, las rutas de entrega con drones no son sistemas de espacio aéreo independientes, sino que se encuentran profundamente interconectadas con las redes socioeconómicas y espaciales terrestres.

1.2.3. Coordinación Multinivel de Nodos

La entrega con drones organiza las redes operativas mediante la integración de escenarios espaciales terrestres, generando diferentes tipos de nodos. Estos nodos incluyen tanto ubicaciones de despliegue de servicios a escala macro como instalaciones a escala micro embebidas en edificios o espacios urbanos, tales como las instalaciones de despegue y aterrizaje (Figura 4). Estos nodos embebidos funcionan como anclajes espaciales para las actividades de entrega con drones. Sirven como soportes físicos que respaldan la organización operativa y actúan como hubs de transferencia que conectan la entrega con drones con otros modos de transporte. En consecuencia, influyen directamente en la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta del servicio dentro de las redes de coordinación tierra-aire.

2. Casos de Estudio y Métodos de Investigación

2.1. Casos de Estudio

Este estudio adopta un enfoque de estudio de casos. Considerando el estado actual de desarrollo de la entrega con drones en China, se seleccionaron como casos de estudio empresas representativas dedicadas a escenarios de entrega instantánea, transporte logístico y transferencia médica, referidas como empresas M, S e Y (Tabla 1).

Tab. 1. Información básica de los casos empresariales

案例企业	主导业务	起降点/个	航线数量/条	平均航线距离/km	飞行高度/m
M	商圈的即时配送	61	49	2.0	120
S	网点间快递物流	222	549	6.3	120—300
Y	医院间物资转运	100	2550	7.2	120

注：M数据截至2025年8月，起降点包括起降场和空投柜；S数据截至2025年5月底；Y数据截至2025年4月，起降点包括起降场和索降点。

Nota: los datos de M corresponden a agosto de 2025; los puntos de despegue/aterrizaje incluyen campos de aterrizaje y armarios de entrega aérea. Los datos de S corresponden a finales de mayo de 2025. Los datos de Y corresponden a abril de 2025; los puntos de despegue/aterrizaje incluyen campos de aterrizaje y puntos de descenso.

Como una de las mayores plataformas chinas de comercio minorista instantáneo, la empresa M comenzó a explorar servicios de entrega con drones ligeros y de corta distancia (menos de 3 km) en 2017. A principios de 2021, completó con éxito su primer pedido de entrega con drones involving usuarios reales. En febrero de 2023, la empresa obtuvo la Carta de Aprobación para Operación de Prueba de Aeronaves No Tripuladas de Categoría Específica y la Licencia de Operación de Empresa de Aviación General, e inició operaciones piloto de entrega con drones en Shenzhen. A finales de 2024, la empresa M había establecido 53 rutas de entrega con drones en China. La mayoría de las rutas se concentraban en Shenzhen, con rutas adicionales desplegadas en Pekín, Shanghai, Guangzhou y otras ciudades. Sus escenarios de servicio abarcaban oficinas, comunidades residenciales, áreas escénicas, parques municipales, campus, bibliotecas y otros espacios urbanos.

Como uno de los mayores proveedores integrales de servicios logísticos de China, la empresa S presta servicios que incluyen entrega exprés, transporte de carga, logística de cadena de frío, logística médica y entrega intraurbana. La empresa comenzó a desarrollar drones de carga en 2015 y se convirtió en la primera empresa piloto aprobada por la Administración de Aviación Civil de China en 2017. En marzo de 2018, obtuvo la primera Licencia (Piloto) de Operación Aérea de Aeronaves No Tripuladas emitida por la Administración de Aviación Civil

de China. A finales de 2024, la empresa S había establecido 549 rutas de drones en todo el país, completando más de 1,1 millones de vuelos, transportando más de 6,2 millones de paquetes y alcanzando una distancia acumulada de vuelo superior a 5,7 millones de kilómetros.

La empresa Y fue establecida en 2015. En octubre de 2019, obtuvo la primera Carta de Aprobación para Operación de Prueba de Aeronaves No Tripuladas de Categoría Específica y la Licencia de Operación de Entrega Logística con Aeronaves No Tripuladas del mundo emitidas por la Administración de Aviación Civil de China. La empresa ofrece principalmente soluciones de entrega con drones en respuesta médica de emergencia, logística intraurbana, entrega de alimentos frescos, servicios postales exprés y logística de parques industriales. Al 14 de agosto de 2025, había completado más de 310.000 vuelos, con una duración total de vuelo cercana a 59.000 horas y una distancia acumulada superior a 2 millones de kilómetros. Las aplicaciones médicas representaban aproximadamente el 85% de sus operaciones urbanas de entrega con drones, cubriendo más de 50 ciudades y prestando servicio a más de cien alianzas médicas y hospitales de nivel superior al municipal.

2.2. Métodos de Investigación

Este estudio realizó un seguimiento continuo de las tres empresas mencionadas y de empresas relacionadas entre marzo de 2024 y junio de 2025. En primer lugar, se recopiló información sobre el desarrollo empresarial, la escala operativa, el despliegue espacial y los costos de operación a través de sitios web corporativos, plataformas de noticias, informes anuales y reportes financieros. En segundo lugar, se realizaron investigaciones de campo mediante visitas in situ y entrevistas con gerentes empresariales y personal pertinente. Estas investigaciones se centraron en los procesos de desarrollo empresarial, las principales áreas de negocio, los equipos operativos, las rutas de vuelo, los modelos de servicio, las condiciones operativas, los requisitos de seguridad y otra información relacionada. Se obtuvieron datos que incluyeron documentos de planificación de rutas, manuales de operación y planes de desarrollo futuro. También se realizaron encuestas de campo sobre sitios de aterrizaje, plataformas de mando, centros de datos, instalaciones de almacenamiento e instalaciones de mantenimiento para comprender los requisitos de suelo y las demandas espaciales. En tercer lugar, con base en sitios web empresariales, plataformas de visualización y aplicaciones móviles, se recopiló información adicional sobre rutas, instalaciones de aterrizaje y proveedores de servicios mediante métodos de prueba operativa. Posteriormente, se aplicaron ArcGIS y otras herramientas de análisis espacial para realizar simulaciones de visualización tridimensional.

3. Vías de Implementación de la Coordinación Tierra-Aire en la Entrega con Drones

3.1. Diferenciación de las Características de la Demanda y Construcción de un Espectro de Escenarios de Coordinación Tierra-Aire

La tarea primordial para lograr la coordinación tierra-aire en la entrega con drones es identificar las características de la demanda de contextos espaciales específicos y establecer los modelos de servicio correspondientes. Según los casos de las tres empresas, los modelos actuales de coordinación tierra-aire se orientan principalmente hacia las necesidades operativas específicas de cada empresa, utilizando los drones para mejorar los sistemas de servicio existentes (Tabla 2).

Tab. 2. Perfil de la demanda de logística de baja altitud y modelo de coordinación tierra-aire

场景需求	地空协同模式	示意图
商圈即时配送	商圈无人机配送+末端空投柜 骑手接驳配送/用户自取	
商圈集合配送	商圈骑手配送+枢纽站间无人机 运输+末端骑手配送	
景区即时配送	商场无人机配送+景区索降点/ 自动枢纽站用户自取	
快递物流配送	枢纽站间无人机转运/配送+末端 航站骑手接驳配送/用户自取	
医疗物资转运	区域中心血站无人机配送+ 各级医疗机构专员自取	
海洋海岛运输	枢纽站无人机运输+末端航站 骑手配送/用户自取	

Por ejemplo, la empresa M se enfoca principalmente en servicios de entrega de alimentos. Por lo tanto, su sistema de coordinación tierra-aire se organiza primordialmente en torno a zonas comerciales. Las instalaciones de aterrizaje se establecen en centros comerciales con alta concentración de tiendas, mientras que los armarios de entrega con drones se despliegan en áreas de alta demanda tales como comunidades residenciales, distritos de oficinas y áreas escénicas dentro de un radio aproximado de 0,5 a 2 km. Este modelo conforma una red de servicios tipo hub-and-spoke (radial), en la que los drones realizan entregas unidireccionales desde los centros comerciales hasta los armarios terminales de entrega. Los residentes pueden elegir si utilizan este servicio según sus necesidades, y pueden recoger los productos en los armarios de entrega o gestionar la entrega posterior a través de mensajeros. En contraste, la empresa S se dedica principalmente a la entrega de paquetes de alto valor y a servicios logísticos urgentes. Su modelo de coordinación tierra-aire se apoya en estaciones logísticas existentes para establecer instalaciones de despegue y aterrizaje y construir redes de estaciones interconectadas. El transporte rápido de baja altitud entre estaciones (dentro de aproximadamente 7 km) se desarrolla como un producto de servicio que los usuarios pueden seleccionar según la demanda. Sus principales objetivos de servicio incluyen productos de alto valor tales como oro y joyería, así como productos sensibles al tiempo como mariscos y frutas frescas. La empresa Y se enfoca en escenarios de

transporte médico, particularmente en las demandas de transferencia de muestras biológicas, vacunas y suministros médicos dentro de las redes médicas. Por lo tanto, establece instalaciones de aterrizaje en instituciones médicas y conforma una red de servicios de coordinación tierra-aire multinivel y bidireccional.

Un análisis comparativo de estos tres casos indica que el propósito fundamental de la coordinación tierra-aire basada en drones es reemplazar la entrega manual terrestre convencional mediante el transporte de baja altitud. Esta sustitución se impulsa principalmente por las características de los productos y los requisitos del servicio. Desde la perspectiva de los productos, la entrega con drones es adecuada primordialmente para bienes con fuertes exigencias de oportunidad temporal o alto valor económico. Desde la perspectiva de la demanda de servicio, la entrega con drones se introduce cuando el transporte terrestre convencional no puede satisfacer eficazmente los requisitos operativos. Estas situaciones incluyen: (1) redes viarias urbanas complejas y altamente densas que reducen la eficiencia del transporte terrestre; (2) barreras geográficas tales como montañas, ríos y mares que reducen la velocidad de entrega; (3) edificios de gran altura donde las ineficiencias del transporte vertical, tales como la espera de ascensores, afectan la eficiencia de entrega; (4) áreas específicas tales como destinos turísticos, recintos culturales y deportivos, y campus donde la oferta local no puede satisfacer adecuadamente la demanda; (5) problemas de accesibilidad espacial en áreas tales como zonas escénicas, universidades y parques donde la "búsqueda de accesos" o el "ingreso a los espacios" genera dificultades de entrega; (6) situaciones donde el clima extremo o los desastres interrumpen el transporte terrestre. Ante estos escenarios, las empresas adoptan diferentes estrategias, que incluyen la construcción independiente o el desarrollo colaborativo de sistemas de servicio de entrega con drones, según sus características operativas y ventajas de recursos.

3.2. Anclaje de Elementos Terrestres y Organización de Redes de Rutas con Coordinación Tierra-Aire

Las redes de rutas constituyen el componente central de la coordinación tierra-aire. Con base en las prácticas de las empresas S, M e Y, la planificación de rutas de drones involucra trayectorias de vuelo bajo diferentes estados operativos, incluyendo despegue, aterrizaje, crucero y vuelo estacionario. Estas rutas deben considerar múltiples factores relacionados con el suelo, incluyendo paisajes naturales, uso del suelo, entornos construidos y actividades humanas (Tabla 3).

Tab. 3. Factores de influencia e impactos positivos-negativos en el establecimiento de rutas de logística de baja altitud desde la perspectiva de la coordinación tierra-aire

	要素	安全性	可靠性	公共接受度
自然地貌	山体/绿地	★★★★	☆☆☆	★★★★★
	水体	★★★★	★★★★	★★★★★
	道路	★★★★	★★★	★★★★
土地利用	铁路、高速铁路	☆☆☆☆	☆☆	
	机场	☆☆☆☆	☆☆☆	
	核电站、油库	☆☆☆☆	☆☆☆☆	
	高等级居住区	☆☆☆☆	★★★	☆☆☆☆
	学校、政府机关	☆☆☆☆		☆☆☆☆
	工业、物流仓储区	★★★	☆☆☆	★★★★★
	空地荒地、未利用地	★★★	★★★★★	★★★★★
	高层建筑	☆☆		☆☆☆☆
建成环境	建筑物风口	☆☆☆	☆☆☆	
	铁塔、高压线、电力线	☆☆☆	☆☆☆	
	通信基站	☆☆☆	☆☆☆☆	
地面活动	建筑工地(塔吊)	☆	☆☆☆	
	市民活动(风筝、人群活动)	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆

注：★为正向效应，☆为负向效应

Estos factores pueden influir positiva o negativamente en la seguridad, la fiabilidad y la aceptación pública de las rutas. Específicamente: la seguridad se refiere a la protección de las personas e instalaciones en tierra, incluyendo el daño potencial causado por accidentes de aeronaves, los riesgos de desastres secundarios y la dificultad de localizar drones o productos transportados. La fiabilidad se refiere a la capacidad de mantener operaciones estables bajo condiciones meteorológicas cambiantes, entornos electromagnéticos y condiciones de obstáculos variables. La aceptación pública se refiere a los impactos de las operaciones de drones sobre los residentes, particularmente en términos de molestias por ruido y preocupaciones de privacidad.

(1) Factores de paisaje natural. Los paisajes naturales, incluyendo montañas, zonas verdes y cuerpos de agua, pueden reducir el daño potencial a los usuarios terrestres en caso de falla de la aeronave y, por lo tanto, constituyen factores positivos para la planificación de rutas. Sin embargo, las áreas montañosas pueden experimentar también condiciones meteorológicas inestables, lo que afecta la fiabilidad operativa. Las áreas montañosas, las zonas verdes y los cuerpos de agua también influyen en la dificultad de búsqueda de aeronaves accidentadas y requieren una evaluación cuidadosa de los posibles riesgos secundarios.

(2) Factores de uso del suelo. Los espacios viarios bajo las rutas de drones pueden proporcionar entornos relativamente abiertos, mejorando la seguridad, la fiabilidad y la aceptación pública de las rutas. Por lo tanto, las rutas de drones operadas por las empresas M, S e Y generalmente se alinean con los principales corredores de transporte (Figura 5).



Fig. 5. Esquema de rutas de entrega con drones de baja altitud en entornos tridimensionales en el distrito de Nanshan, Shenzhen

Sin embargo, las perturbaciones visuales causadas por el despegue y aterrizaje de drones pueden influir en la seguridad vial y en la aceptación pública. Las instalaciones de importancia estratégica o con altos requisitos de seguridad, tales como aeropuertos civiles y militares, centrales nucleares, instalaciones de almacenamiento de petróleo y ferrocarriles de alta velocidad, se convierten en zonas prohibidas para las rutas de entrega con drones (Figura 6).

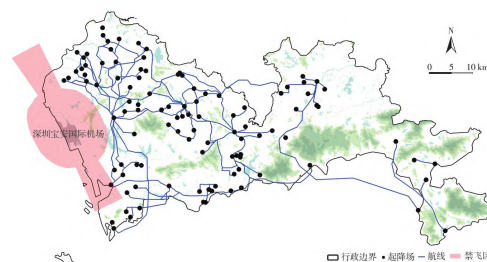


Fig. 6. Estado actual de la red de entrega con drones de la empresa S en Shenzhen

Las instalaciones gubernamentales y las zonas residenciales de alta gama pueden influir negativamente en la planificación de rutas debido a preocupaciones de privacidad y aceptación pública. Las áreas sensibles tales como jardines infantiles, escuelas, residencias de ancianos y comunidades residenciales también se consideran factores restrictivos por sus impactos acústicos. En contraste, los parques industriales, los almacenes logísticos, los terrenos baldíos y los espacios no utilizados pueden servir como ubicaciones favorables debido a su mayor tolerancia al ruido y a la mayor disponibilidad de áreas de aterrizaje de emergencia.

(3) Factores del entorno construido. Los edificios de gran altura y otros obstáculos físicos influyen en la seguridad de vuelo al crear riesgos potenciales de colisión. Las configuraciones edificatorias pueden generar zonas de cizallamiento de viento que afectan las condiciones meteorológicas locales. Las torres de comunicaciones, las líneas de alta tensión y las instalaciones eléctricas no solo constituyen obstáculos físicos, sino que también alteran los entornos electromagnéticos, influyendo así en la seguridad de las rutas.

(4) Factores de actividad terrestre. Los obstáculos dinámicos, incluyendo aves, cometas, globos y grúas torre en sitios de construcción, pueden afectar negativamente la seguridad del vuelo de baja altitud y, por lo tanto, deben considerarse como restricciones en la planificación de rutas.

3.3. Integración en el Entorno Construido y Expansión de los Nodos de Coordinación Tierra-Aire

En comparación con las rutas de vuelo que utilizan primordialmente el espacio público de baja altitud, las instalaciones de despegue y aterrizaje ocupan tipos espaciales más diversos (Tabla 4).

Tab. 4. Tipos y distribución espacial de los campos de aterrizaje

空间类型	M		S	Y
	起降场 / 个	空投柜 / 个	起降场 / 个	起降场 / 个
建筑楼顶	10	0	91	0
院落空间	0	4	2	16
街道空间	0	21	0	2
公园空间	0	20	0	6
总计	10	45	93	24

注：报告的数据是M公司、S公司在深圳，Y公司在合肥的统计数据

Nota: los datos reportados corresponden a las empresas M y S en Shenzhen, y a la empresa Y en Hefei.

Actualmente, las instalaciones de entrega con drones incluyen principalmente campos de aterrizaje, armarios de entrega y puntos de descenso. Los distintos tipos de instalaciones tienen diferentes funciones e infraestructura de apoyo. Los campos de aterrizaje proporcionan múltiples funciones, incluyendo despegue y aterrizaje de drones, almacenamiento, control, carga y descarga. Por lo tanto, suelen estar equipados con sistemas de comunicación, instalaciones de navegación, sistemas de monitoreo, equipo meteorológico, instalaciones de carga, sistemas contra incendios, plataformas de control, áreas de almacenamiento y múltiples posiciones de aterrizaje. El área requerida generalmente supera

los 300 m². Los armarios de entrega con drones funcionan principalmente como instalaciones inteligentes para la recepción y recolección de productos. Suelen ocupar aproximadamente 10 m² y están equipados con sistemas de suministro eléctrico y dispositivos de gestión, sirviendo tanto como instalaciones de transferencia como puntos de recolección autoservicio. Los puntos de descenso son instalaciones más simples. Generalmente se definen mediante marcadores de posicionamiento visual ubicados en el suelo o en superficies de edificios. Los drones utilizan tecnologías de posicionamiento geográfico y reconocimiento de imágenes para identificar ubicaciones específicas y descender la carga mediante sistemas de suspensión, sin requerir instalaciones de apoyo adicionales. Este tipo de instalación es adecuado para el despliegue a gran escala con el fin de ampliar la cobertura del servicio.

En términos de implementación, las empresas de drones se apoyan principalmente en entornos construidos existentes, incluyendo azoteas de edificios, patios, espacios viarios y parques públicos, para establecer instalaciones de aterrizaje y nodos relacionados (Figura 7).

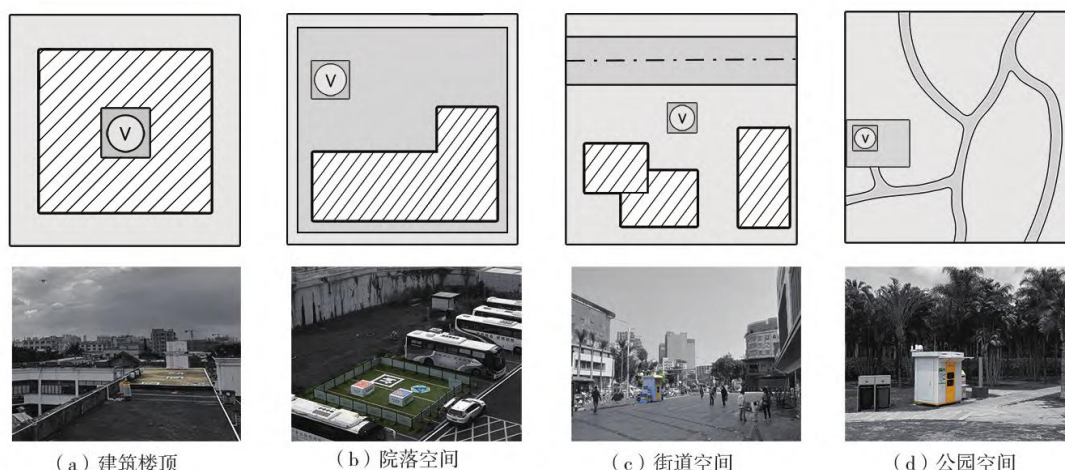


Fig. 7. Tipos de entornos construidos que albergan nodos para la entrega con drones con coordinación tierra-aire

Por ejemplo, la empresa M adopta principalmente dos enfoques: ① el arrendamiento de espacios abiertos sobre complejos comerciales, tales como edificios podio y azoteas de oficinas, para establecer campos de aterrizaje o puntos de descenso; ② el establecimiento de armarios de entrega o puntos de descenso dentro de los espacios viarios y de parque, tras obtener la aprobación de las autoridades administrativas pertinentes. Debido a la amplia red de instalaciones logísticas propias o arrendadas de la empresa S, sus campos de aterrizaje se construyen principalmente sobre las azoteas o en los espacios de patio de las estaciones logísticas existentes. Además de estos enfoques, la empresa Y adopta otro modelo: los demandantes del servicio de entrega con drones (tales como hospitales y centros de sangre) invierten independientemente en sus propios recursos espaciales, mientras que la empresa Y asume la construcción de las instalaciones de aterrizaje. Estas estrategias de despliegue espacial demuestran que, durante la etapa temprana de expansión de la industria, las empresas de entrega con drones se centran en ampliar las redes de instalaciones de aterrizaje y controlar los costos. Con base en las diferencias en la adquisición de recursos espaciales, las empresas han desarrollado diversas vías de implementación.

4. Desafíos y Respuestas de Planificación

4.1. Evaluación de la Demanda Real y Promoción de una Planificación Jerárquica para la

Coordinación Tierra-Aire

La entrega con drones es esencialmente una actividad de transporte de carga, que logra la transferencia espacial de bienes mediante el vuelo de baja altitud. La aparición de esta demanda de transporte requiere una comparación entre la entrega con drones y los modos de transporte alternativos para identificar los escenarios de aplicación adecuados. Estos escenarios apropiados involucran múltiples dimensiones, incluyendo los productos transportados, el tiempo de respuesta requerido y las condiciones espaciales. La idoneidad no está determinada únicamente por la factibilidad técnica y la seguridad, sino también por la eficiencia económica. En otras palabras, la entrega con drones debe proporcionar mayores beneficios económicos que los métodos de transporte convencionales para alcanzar la sostenibilidad a largo plazo. Desde la perspectiva de las características de los productos, las aplicaciones comerciales sostenibles actuales de la entrega con drones por parte de las empresas M, S e Y involucran principalmente productos caracterizados por ser: urgentes; difíciles de transportar; de alto riesgo; de alto valor. Estos incluyen entregas urgentes intraurbanas, productos difíciles de alcanzar mediante el transporte terrestre, productos que requieren garantías adicionales de tiempo y productos valiosos. Con base en estas características de los productos y los correspondientes escenarios espacio-temporales discutidos anteriormente, la entrega con drones crea una diferencia de valor entre el transporte de baja altitud y el transporte terrestre, generando así una demanda genuina. Por lo tanto, la planificación urbana de baja altitud debe evaluar la lógica "tecnología-economía" subyacente a la coordinación tierra-aire, en lugar de asumir una demanda universal o promover ciegamente el despliegue de infraestructura. Específicamente, la planificación debe establecer indicadores de evaluación y marcos de valoración para los diferentes escenarios de demanda, determinar las prioridades de desarrollo según las diferencias de escenarios y formular estrategias de planificación a corto, mediano y largo plazo. Debe otorgarse prioridad al apoyo de las aplicaciones de entrega con drones en campos tales como la respuesta médica de emergencia y la logística de cadena de frío de alto valor, mediante la provisión de apoyo espacial e infraestructura. En el nivel de implementación, la planificación debe identificar los escenarios de aplicación potenciales durante los procesos de renovación urbana y reservar las condiciones espaciales apropiadas, permitiendo que la entrega con drones evolucione gradualmente desde proyectos piloto aislados hacia aplicaciones a gran escala.

Además, algunas empresas sostienen que la entrega con drones debería considerarse desde una perspectiva más amplia y de largo plazo en lo que respecta a su relación con otros modos de transporte. Por ejemplo, con el futuro envejecimiento poblacional, la disminución de las tasas de natalidad y la mejora de los sistemas de seguridad social, el costo laboral global de la entrega terrestre puede continuar aumentando, mientras que se espera que los costos de fabricación de drones disminuyan. La expansión de la capacidad de carga, los modelos de entrega colectiva y las aplicaciones a gran escala pueden reducir los costos marginales de entrega. Mediante la conexión con camiones, transporte ferroviario y otros sistemas de transporte, la entrega con drones puede aprovechar mejor sus ventajas a través del transporte multimodal. Asimismo, tras la adopción a gran escala de sistemas de transporte de pasajeros de baja altitud, particularmente los vehículos de despegue y aterrizaje vertical eléctrico (eVTOL), podrían surgir sistemas integrados de transporte de pasajeros y carga[28]. Por lo tanto, la planificación urbana de baja altitud debe mantener una

actitud cauta pero abierta hacia el desarrollo futuro de la entrega con drones, considerando las posibles transformaciones organizativas causadas por aplicaciones a gran escala. La planificación debe identificar proactivamente los escenarios potenciales, reservar condiciones espaciales y establecer condiciones de acceso para el desarrollo futuro. En el nivel de implementación, los resultados de la evaluación sobre los escenarios de aplicación de baja altitud deberían incorporarse a la planificación espacial territorial y a la planificación integral del transporte. Los recursos terrestres y de baja altitud deberían coordinarse; el espacio aéreo y las rutas de baja altitud deberían clasificarse y aprobarse; y deberían establecerse mecanismos eficientes de coordinación tierra-aire.

4.2. Mejora de la Gestión del Espacio Aéreo y Coordinación del Desarrollo de Rutas

Durante la etapa temprana del desarrollo de la economía de baja altitud, las rutas de drones generalmente son estudiadas, planificadas, solicitadas y operadas de forma independiente por las empresas. Este fenómeno es particularmente evidente en la entrega con drones. Las empresas examinadas en este estudio han invertido recursos significativos en el desarrollo de rutas y consideran estas redes como activos centrales. Desde una perspectiva más amplia, las plataformas de servicios de baja altitud desarrolladas por diferentes provincias y ciudades atienden principalmente a empresas locales y permanecen desconectadas entre sí, lo que dificulta la consecución de operaciones integradas interempresariales e interregionales. Con el desarrollo ulterior de la economía de baja altitud, podría emerger una competencia por los recursos de rutas, reduciendo la eficiencia de utilización de los recursos de baja altitud. Para abordar esta cuestión, la investigación académica e industrial ha propuesto diversas estrategias, incluyendo la optimización de la clasificación del espacio aéreo, el establecimiento de rutas públicas, la promoción del uso compartido del espacio aéreo y la liberación dinámica de recursos del espacio aéreo. Por ejemplo, algunos estudios sugieren que el espacio aéreo debería clasificarse según los diferentes requisitos operativos y altitudes de vuelo, tales como: drones de consumo por debajo de 120 m; drones de entrega instantánea a 120–200 m; drones de transporte logístico a 200–300 m. Con base en el análisis de la planificación de rutas empresariales, este estudio sostiene que tanto la zonificación del espacio aéreo como la planificación de rutas no deberían considerarse meramente como cuestiones de transporte aéreo. Su relación con los sistemas terrestres no debería entenderse como una simple proyección "de arriba hacia abajo" del espacio aéreo sobre el suelo. Por el contrario, la planificación debería adoptar un enfoque "de abajo hacia arriba", que extienda los sistemas espaciales terrestres hacia el espacio de baja altitud. Lograr tal extensión requiere innovación teórica y adaptación técnica.

Desde una perspectiva técnica, la entrega con drones representa una transformación de la movilidad de los elementos urbanos del espacio bidimensional al espacio tridimensional. Por lo tanto, la planificación debe analizar los obstáculos y sus cambios dinámicos dentro de los entornos tridimensionales[28-30], evaluar la accesibilidad y las estrategias de enrutamiento considerando factores de seguridad y económicos, e identificar corredores adecuados de bajo impacto y alta seguridad sobre espacios tales como ríos y cuerpos de agua. Al mismo tiempo, la planificación debe clasificar las áreas sensibles al ruido y a la privacidad según las condiciones de uso del suelo y establecer estándares de retranqueo de rutas para reducir los impactos negativos causados por las operaciones de drones. En el nivel de planificación local, las ciudades pueden desarrollar planes especializados para la clasificación del espacio aéreo de baja altitud y la gestión de rutas, con base en los entornos urbanos tridimensionales y las

condiciones de uso del suelo. Tales planes deben clarificar: los métodos de clasificación del espacio aéreo; la disposición de las rutas; las zonas de amortiguamiento de seguridad; y proporcionar una base para la construcción de infraestructura posterior y la aprobación de rutas.

De manera más fundamental, se requiere investigación teórica sobre los derechos de desarrollo y los mecanismos de gobernanza espacial del espacio de baja altitud. Desde la perspectiva de la propiedad, los recursos de baja altitud, al igual que los recursos del espacio aéreo, pertenecen al Estado y son de propiedad colectiva del público. Desde la perspectiva de la utilización, los derechos de desarrollo son ejercidos actualmente por los gobiernos en representación del público[31]. Sin embargo, la implementación de tales "derechos públicos" ha enfrentado desafíos prácticos, particularmente en lo que respecta a los debates sobre los derechos aéreos[32]. En los Estados Unidos, los derechos del espacio aéreo por debajo de 500 pies (aproximadamente 150 m) generalmente se asocian con la propiedad del suelo, mientras que el espacio aéreo superior se considera espacio aéreo navegable. Los propietarios poseen derechos sobre los "alcances inmediatos" del espacio aéreo sobre sus propiedades, incluyendo el derecho a utilizar una extensión espacial comparable al área del suelo que ocupan o controlan[33]. En China, la normativa pertinente permanece relativamente poco clara. La Ley de Propiedad de la República Popular China (2007) introdujo el concepto de servidumbres dentro de los derechos de usufructo relacionados con los suelos de construcción. El Código Civil de la República Popular China (2021), en su artículo 345, establece además que: "Los derechos de uso del suelo de construcción pueden establecerse separadamente sobre la superficie, el espacio aéreo o el espacio subterráneo del suelo". Asimismo, las regulaciones relativas a las relaciones de vecindad clarifican las aplicaciones prácticas de los derechos relacionados con la iluminación, el acceso y otros usos espaciales[32, 34]. Por lo tanto, puede considerarse que el espacio aéreo de los edificios y las áreas circundantes pueden quedar comprendidos dentro del ámbito de los derechos de servidumbre, aunque las leyes vigentes aún no han definido con claridad sus formas jurídicas y relaciones de propiedad. En consecuencia, la futura planificación urbana de baja altitud, incluida la planificación de la entrega con drones, necesita clarificar la relación entre los derechos públicos y privados sobre los recursos espaciales de baja altitud. Debe establecer fundamentos legales para: los sistemas catastrales tridimensionales; las bases de datos espaciales urbanas tridimensionales; la designación de rutas públicas; la regulación del uso de los recursos de baja altitud; y los mecanismos de utilización onerosa.

4.3. Innovación de Políticas de Planificación y Gobernanza para Promover la Integración de Instalaciones en Redes

Como puntos de conexión de la coordinación tierra-aire, las instalaciones de despegue y aterrizaje constituyen infraestructura crítica para la entrega con drones. Actualmente, estas instalaciones dependen principalmente de azoteas y espacios públicos. Desde la perspectiva de los derechos de propiedad, los edificios públicos generalmente tienen estructuras de propiedad claramente definidas, mientras que las azoteas residenciales pertenecen al régimen de propiedad compartida, y los espacios públicos viarios son de propiedad estatal[35]. Sin embargo, en general, estos espacios públicos terrestres y los espacios aéreos sobre azoteas suelen presentar relaciones de propiedad poco claras, lo que dificulta su transformación funcional y se convierte en un cuello de botella importante que restringe el desarrollo de la entrega con drones. Por lo tanto, la planificación espacial no solo debe

organizar técnicamente las rutas y las instalaciones de aterrizaje con anticipación, sino también establecer mecanismos institucionales que respalden la implementación de las instalaciones. En particular, la planificación debe extraer lecciones de las instalaciones de servicios comunitarios existentes y coordinarse con los propietarios originales y las autoridades municipales respecto a la asignación de: derechos; responsabilidades; beneficios económicos. Para los proyectos de nueva construcción o reurbanización, las instalaciones para drones pueden incorporarse a los mecanismos de incentivos basados en el coeficiente de edificabilidad[36]. Con base en la evaluación de la demanda discutida en la sección 4.1, deben reservarse espacios dedicados a la entrega con drones en las áreas de alta demanda, y las plataformas de aterrizaje deben incorporarse a la gestión de la planificación detallada reguladora. Desde la perspectiva de los sistemas de planificación, las instalaciones de aterrizaje y los espacios de suelo requeridos deben integrarse en: los sistemas de clasificación del uso del suelo; las normativas de compatibilidad edificatoria; y los marcos de planificación de infraestructura.

Mediante estas medidas, pueden desarrollarse nuevos tipos de infraestructura e integrarse gradualmente en las redes urbanas. Más allá de la integración espacial, también deben reservarse condiciones inteligentes y automatizadas para conectar las instalaciones de aterrizaje con otros sistemas de transporte y espacios funcionales. Las instalaciones de aterrizaje no solo conectan el espacio aéreo y el espacio terrestre, sino que también vinculan a los proveedores iniciales y los consumidores finales, conformando los primeros y últimos 100–300 metros del proceso logístico. Actualmente, estas etapas inicial y terminal del transporte aún dependen en gran medida de la entrega manual por mensajeros o del auto-recolección por parte de los usuarios [Figura 8(a)]. Aunque estas distancias son de solo 100–300 metros, su consumo de tiempo puede exceder el del segmento de vuelo del dron, y sus costos pueden también superar los del transporte aéreo. Por lo tanto, estas etapas se han convertido en cuellos de botella críticos que restringen la eficiencia y la viabilidad económica de la entrega con drones. Para apoyar las aplicaciones futuras a gran escala de la entrega con drones de baja altitud, la renovación urbana y la gestión de edificios deben adaptarse mejor a las características de la logística basada en drones. Las posibles medidas incluyen: la instalación de ascensores de carga [Figura 8(b)]; el despliegue de robots logísticos [Figura 8(c)]; la introducción de sistemas de recepción montados en ventanas [Figura 8(d)]; y otros sistemas inteligentes para mejorar la eficiencia en las etapas de despacho inicial y recepción final.

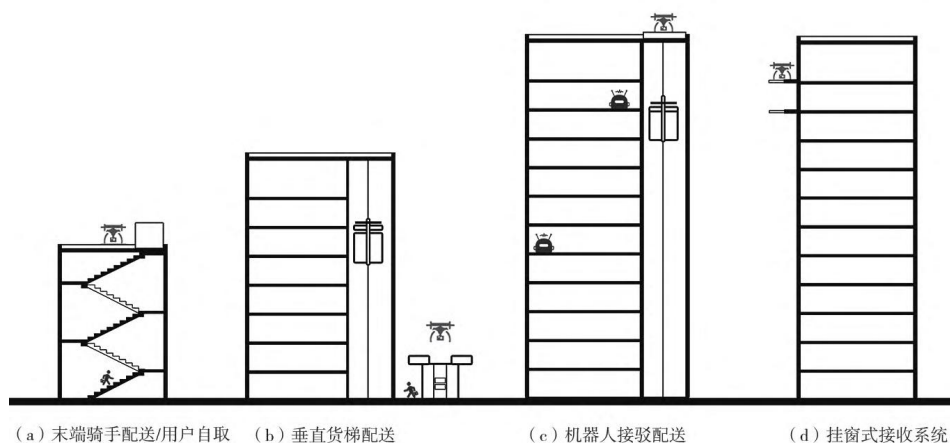


Fig. 8. Disposición vertical de los nodos para la entrega con drones con coordinación tierra-

aire

5. Conclusiones y Perspectivas

Representada por la entrega con drones, la economía de baja altitud se está desarrollando a una velocidad sin precedentes. Ha promovido el establecimiento de sistemas de coordinación tierra-aire en entornos geográficos diversos y complejos, conectando la oferta y la demanda mediante diferentes escenarios de aplicación y posibilitando la replicación y expansión a gran escala de los servicios de baja altitud.

Estos servicios emergentes de baja altitud están reconfigurando los patrones de producción y vida cotidiana urbanos, al tiempo que generan nuevos desafíos para la planificación espacial urbana. Los enfoques tradicionales de planificación generalmente optimizan los recursos terrestres desde una perspectiva bidimensional y son incapaces de responder eficazmente a las demandas de asignación espacial y temporal generadas por la entrega con drones y otras aplicaciones de baja altitud. Por lo tanto, el espacio de baja altitud debería incorporarse al ámbito de la planificación espacial. Las investigaciones futuras deberían explorar los mecanismos de construcción, las reglas de utilización y los enfoques de planificación de los espacios de baja altitud, investigar las interacciones coordinadas entre los sistemas terrestre y aéreo, y desarrollar nuevos modelos espaciales adaptados a la economía de baja altitud. Estos esfuerzos enriquecerán el marco conceptual y las metodologías técnicas de la planificación urbana de baja altitud y responderán a los requisitos emergentes de infraestructura y espacio asociados con el rápido desarrollo de baja altitud[37-39]. Con base en la revisión bibliográfica, la investigación de campo y el análisis de simulación, este estudio sintetiza los elementos y características de la coordinación tierra-aire en la entrega con drones, realiza estudios de caso en profundidad de tres empresas líderes de entrega con drones, identifica las vías de implementación y los desafíos, y propone respuestas de planificación. Las principales conclusiones son las siguientes:

(1) La coordinación tierra-aire requiere no solo la integración tecnológica de los datos y los sistemas operativos entre los elementos aéreos y terrestres, sino también la coordinación espacial entre los escenarios, los sistemas de red y los nodos. La coordinación tierra-aire no debe entenderse meramente como un objetivo tecnológico; representa más bien un prototipo de desarrollo de nueva infraestructura que considera simultáneamente objetivos económicos, tecnológicos y espaciales.

(2) En las aplicaciones prácticas, la coordinación tierra-aire muestra vías de implementación caracterizadas por: la construcción de sistemas de escenarios de servicio según las características de la demanda; la organización de redes de rutas con base en las condiciones espaciales terrestres; y la incorporación y expansión de instalaciones nodales dentro de los entornos construidos. Estas vías reflejan el proceso fundamental de la economía de baja altitud como una integración de "extenderse hacia arriba y conectar hacia abajo", lo cual debe convertirse en un foco clave de la planificación urbana de baja altitud.

(3) En respuesta a los desafíos relacionados con la identificación de la demanda, el desarrollo de rutas y la construcción de instalaciones de aterrizaje, la planificación urbana necesita innovar los mecanismos de gobernanza espacial y los métodos técnicos. La planificación debe: mejorar la gobernanza de los recursos de baja altitud; promover la coordinación entre las rutas de baja altitud y los sistemas de transporte terrestre; implementar un despliegue jerárquico y categorizado de la infraestructura espacial; y modernizar los espacios urbanos existentes mediante la transformación inteligente.

A través de estas medidas, pueden ampliarse la amplitud, la profundidad y la velocidad de implementación de los servicios de baja altitud. La coordinación tierra-aire en el vuelo de baja altitud representa una colaboración espacial multidimensional basada en sistemas espaciales y un mecanismo de coordinación multinivel arraigado en los entornos urbanos. Durante el proceso de reestructuración espacial desencadenado por la entrega con drones, la planificación urbana puede desempeñar un papel clave en la construcción del marco operativo de los espacios urbanos futuros. Mediante la integración de los conocimientos de planificación y las herramientas de gobernanza — incluyendo: la regulación espacial jerárquica y prospectiva; la asignación coordinada de recursos espaciales; los mecanismos profundos de recursos espaciales — la planificación urbana puede establecer un campo especializado de planificación urbana de baja altitud y proporcionar apoyo técnico para la realización espacial y la evolución de la economía de baja altitud. Los estudios futuros deberían fortalecer aún más el análisis empírico mediante estudios de caso adicionales, desarrollar herramientas tecnológicas y simular la efectividad de la gobernanza.

Notas

① Los riesgos asociados a las operaciones con drones, incluyendo las amenazas a la seguridad de vidas y bienes, así como las preocupaciones de privacidad causadas por las cámaras de a bordo, son factores importantes que influyen en la aceptación pública. En las prácticas internacionales, algunas empresas han adoptado tecnologías de procesamiento de imágenes, tales como el tratamiento en escala de grises de las imágenes capturadas, para reducir las preocupaciones de privacidad y atender el creciente número de quejas y apelaciones públicas.

② El ruido es uno de los principales factores que afectan la aceptación pública. En particular, el ruido generado durante el despegue y el aterrizaje de los drones tiene impactos significativos en las áreas sensibles al ruido, tales como residencias de ancianos, escuelas, comunidades residenciales e instalaciones gubernamentales. Según mediciones existentes, las operaciones de drones de baja altitud generan aproximadamente 60–85 dB(A) de ruido, excediendo los límites especificados en la Norma de Calidad Ambiental para el Ruido emitida por el Ministerio de Protección Ambiental de la República Popular China[40]. La norma establece los siguientes límites de ruido diurno y nocturno: 50 dB(A) y 40 dB(A) respectivamente, para las zonas funcionales acústicas ambientales de categoría 0, tales como áreas de rehabilitación y atención sanitaria; 55 dB(A) y 45 dB(A) respectivamente, para las zonas de categoría 1, incluyendo áreas residenciales, educativas y gubernamentales.

Referencias

- [1] Central Committee of the Communist Party of China, State Council. Outline of the National Comprehensive Three-dimensional Transportation Network Planning[EB/OL]. (2021-02-24) [2025-07-05]. https://www.gov.cn/zhengce/202203/content_3635479.htm.
- [2] Wu Z Q, Yan J, Xu H W, et al. Ten Key Issues in the Annual Development of Urban and Rural Planning Discipline (2024–2025)[J]. Urban Planning Forum, 2024(6): 8-11.
- [3] Liao X H, Qu W Q, Xu C C, et al. Review of Urban Air Mobility and New Infrastructure Low-altitude Public Air Routes[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(24): 1-29.
- [4] Liao X H, Zhang J, Huang Y H. Preliminary Discussion on the Characteristics of Low-altitude Geography and Its Expansion of Geographic Research[J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(3): 551-564.

- [5] Liao X H, Huang Y H, Xu C C. Research on Low-altitude Airspace Resources for UAV Applications[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2607-2620.
- [6] Zhang H H, Yi J, Li S, et al. A Review of Low-altitude Airspace Capacity Evaluation Research[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(6): 78-93.
- [7] Li A, Hansen M, Zou B. Traffic Management and Resource Allocation for UAV-based Parcel Delivery in Low-altitude Urban Space[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 143: 103808.
- [8] Zhang Q R, Wei R X, He R K, et al. UAV Route Planning in Dense Urban Irregular Obstacle Environments[J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(10): 133-139.
- [9] Liu Q, Chen Y Y, Hong X W, et al. International Experiences of Urban Low-altitude Airspace Planning for UAV Applications[J]. *Urban Planning Forum*, 2024(5): 64-70.
- [10] Safadi Y, Geroliminis N, Haddad J. Integrated Departure and Boundary Control for Low-altitude Air City Transport Systems[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2024, 189: 103020.
- [11] Chen D, Tang C, Xie Y, et al. Two-level Real-time Trajectory Planning of UAVs for Urban Low-altitude Logistics Delivery[J/OL]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025: 1-20 [2025-07-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20250417.1126.002.html>.
- [12] Ding Y, Xin B, Chen J. A Review of Recent Advances in Coordination Between Unmanned Aerial and Ground Vehicles[J]. *Unmanned Systems*, 2021, 9(2): 97-117.
- [13] Huang S H, Huang Y H, Blazquez C A, et al. Solving the Vehicle Routing Problem with Drone for Delivery Services Using an Ant Colony Optimization Algorithm[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2022, 51: 101536.
- [14] Dukkanci O, Campbell J F, Kara B Y. Facility Location Decisions for Drone Delivery with Riding: A Literature Review[J]. *Computers & Operations Research*, 2024, 167: 106672.
- [15] Li Y, Liu M, Hu H, et al. A Cost Analysis of the Collaborative Delivery Mode of Drones and Riders in Food Delivery Scenarios[J]. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 2025, 28(2): 1-30.
- [16] Wang X Y, Wang H M, Sun Q Q. Multi-task Cooperative Control of UAV-UGV Unmanned Cluster Systems[J]. *Unmanned Systems Technology*, 2023, 6(6): 70-79.
- [17] Liu C, Zhao J, Sun N. A Review of Collaborative Air-ground Robots Research[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2022, 106(3): 60.
- [18] Qin R, Yang Z B. Research on Location Optimization of UAV Delivery Landing Sites in Urban Areas[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2024(15): 50-54.
- [19] Xiao Z P, Zhang W C, Li Y Y, et al. Organizational Characteristics and Challenges of Ground-air Coordination for Low-altitude UAV Delivery: A Case Study of Shenzhen[J]. *Resources Science*, 2025, 47(8): 1663-1674.
- [20] Shavarani S M, Golabi M, Izbirak G. A Capacitated Biobjective Location Problem with Uniformly Distributed Demands in the DAV-supported Delivery Operation[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2019, 26(4): 1-24.
- [21] Chang Y S, Lee H J. Optimal Delivery Routing with Wider Drone-delivery Areas Along a Shorter Truck-route[J]. *Expert Systems with Applications*, 2018, 104: 307-317.
- [22] FAA. Engineering Brief No.105A, Vertiport Design, Supplemental Guidance to Advisory Circular 150/5390-2D, Heliport Design[R/OL]. (2024-12-27) [2025-07-07]. https://www.faa.gov/airports/engineering/engineeringbriefs/eb105a_vertiports.
- [23] Civil Aviation Administration of China. Specification for Route Planning of Light and Small

Unmanned Aircraft Logistics Operations in Urban Scenarios[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2022.

[24] Sheng J, Cai X, Li Q, et al. Space-air-ground Integrated Network Development and Applications in High-speed Railways: A Survey[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 23(8): 10066-10085.

[25] CASA. Guide to Vertiport Design[R/OL]. (2024-05-29). <https://www.casa.gov.au/sites/default/files/2024-05/guide-to-vertiport-design.pdf>.

[26] China Civil Airports Association. Technical Requirements for Electric Vertical Take-off and Landing Aircraft (eVTOL) Landing Facilities[S]. Beijing: China Civil Airports Association, 2024.

[27] China Mobile, Xunyi. Logistics Capillaries of Future Cities: 5G Robot Transportation Network White Paper[R/OL]. (2019-01) [2025-06-25]. <https://xyi-web.oss-cn-hangzhou.aliyuncs.com/files/5G机器人运力网络白皮书20210901.pdf>.

[28] Liu J M, Su X J, Shen Z J. Exploration of Coordinated Development Models of Urban Low-altitude Airspace and Above-ground/Underground Space from the Perspective of UAV Traffic Governance[J]. International Urban Planning, 2024, 39(3): 1-16.

[29] Chen J, Gao Y, Guo C Y, et al. Basic Ideas and Key Tasks of Real-world 3D Scene Empowering Low-altitude Economy[J]. Journal of Spatial Information, 2025, 32(1): 1-10.

[30] Li X, Gan W, Shen C, et al. Impact Assessment and Facility Renewal of Urban Air Mobility from the Perspective of Low-altitude Economy[J]. *Planners*, 2025, 41(3): 33-41.

[31] Chen B H, Xie Y. Types and Legislative Models of Spatial Rights in Property Law[J]. Journal of Finance and Law, 2018(3): 15-30.

[32] Chen X J. Low-altitude Use Rights under the Background of Low-altitude Airspace Opening[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2016, 29(1): 47-57.

[33] United States Congress. The Air Commerce Act of 1926[S]. (1926-05-20) [2025-07-15]. https://archive.org/download/UnitedStatesAirCommerceAct1926/United%20States%20Air%20Commerce%20Act%20-%201926_text.pdf.

[34] Zhao X M. Forms and Analysis of Land Spatial Rights Utilization[J]. Tribune of Political Science and Law, 2011, 29(2): 90-99.

[35] Zhang J, Zhao Z L, Wang Y N, et al. Difficulties and Operational Mechanisms of Community-embedded Service Facilities Construction from the Perspective of Urban Renewal[J]. Urban Planning Forum, 2025(1): 71-77.

[36] Zhou G K, Zhuo J. Theoretical Logic and Institutional Construction of Development Rights Transfer and Incentives under Urban Renewal[J]. Urban Planning Forum, 2023(3): 66-74.

[37] Liu T T, Dai S Z, Song H Y. Exploration of New Types of Smart Society Infrastructure and Data Infrastructure Planning[J]. Urban Planning Forum, 2019(4): 95-101.

[38] Wang K, Zhao Y J, Zhang J X, et al. Academic Discussion on "New Quality Productive Forces and Urban-rural Planning"[J]. Urban Planning Forum, 2024(4): 1-10.

[39] Wang G T, Liu X, Li F, et al. Reflections on Urban Studies in the New Era: Urban Problems—Urban Science—Urbanology[J]. Urban Planning Forum, 2025(3): 9-15.

[40] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Environmental Quality Standard for Noise[S]. (2008-08-19) [2025-07-15]. <https://www.mee.gov.cn/ywggz/fgbz/bz/bzwb/wlhi/shizlbz/200809/W020111121351590491>

445.pdf.

Ai 辅助翻译