

Capítulo

GeoIA - SIG en la Gestión de Infraestructura Crítica Aeronáutica: Factores Críticos de Éxito caso Fuerza Aeroespacial Colombiana

Iván Dario Barragán Vera

Ingeniero Topográfico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Especialista en Geomática, Magister en Gestión de Proyectos. Jefe Area Geomática y Finca Raíz – Dirección de Infraestructura, Fuerza Aeroespacial Colombiana, Colombia. Link ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5193-0855> - Contacto: ivan.barragan@esdeg.edu.co

Jimeno Andrés León Sanabria

Arquitecto, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Especialista en Diseño Urbano. Jefe Área Presupuesto y Delineación de Proyectos – Dirección de Infraestructura, Fuerza Aeroespacial Colombiana, Colombia. Link ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0947-2919> - Contacto: jimeno.leon@esdeg.edu.co

Ricardo León Restrepo Valdés

Ingeniero Industrial de la Universidad Católica de Oriente, Colombia. Especialista en Formulación y Evaluación de Proyectos Públicos y Privados de la Universidad de Medellín, Colombia. Magister en Estrategia y Geopolítica de la Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”– ESDEG, Comando General de las Fuerzas Militares, Colombia. Link ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8437-3017> - Contacto: ricardo.leon@esdeg.edu.co

Resumen: La presente investigación analiza la implementación del Sistema de Información Geográfica para Infraestructura Crítica Aeronáutica (SIG-DIFRA) en la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC), evaluando el papel potencializador de la GeoInteligencia Artificial (GeoIA) como factor clave de éxito (FCE). A través de un enfoque mixto, se emplean el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para la priorización de los FCE, y la metodología DOMPI para el diagnóstico estructural del sistema. Los hallazgos preliminares revelan que la integración de GeoIA optimiza la conciencia espacial, automatiza análisis predictivos y fortalece la toma de decisiones estratégicas. Se identifican brechas tanto en doctrina como en capacidades humanas, las cuales afectan la adecuada implementación del sistema. Como resultado, se propone un modelo conceptual de integración SIG-GeoIA, acompañado de indicadores estratégicos para evaluar su implementación. El estudio contribuye al fortalecimiento de capacidades institucionales en defensa, aportando evidencia empírica para la gestión eficiente de infraestructura crítica aeronáutica.

* Capítulo de libro resultado del proyecto de investigación “mencionar proyecto” del grupo de investigación “mencionar grupo” de la Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”, categorizado en XX por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) y registrado con el código COLXXXXXXXX. Los puntos de vista y los resultados de este capítulo pertenecen a los autores y no reflejan necesariamente los de las instituciones participantes.

Palabras clave: defensa; informática; inteligencia artificial; geointeligencia; infraestructura crítica; sistemas de información geográfica.

Índice de contenido

1. **Introducción**
2. **Estado del arte**
 - 2.1. Estado del arte sobre implementación de SIG en defensa e infraestructura crítica
3. **Marco Teórico y Conceptual**
 - 3.1 Definición y fundamentos de los Sistemas de Información Geográfica (SIG)
 - 3.2 Factores Críticos de Éxito (FCE)
 - 3.3 GeoIA: integración de SIG con Inteligencia Artificial
 - 3.4 Metodología DOMPI
 - 3.5 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)
 - 3.6 Relación entre los conceptos clave
4. **Metodología**
 - 4.1 Enfoque de investigación
 - 4.2 Identificación y sistematización de los factores críticos de éxito para la implementación de SIG/GIS
 - 4.3 Selección de expertos (Delphi)
 - 4.4 Diseño Delphi
 - 4.5 Aplicación del AHP
 - 4.6 Integración de Resultados AHP con Diagnóstico DOMPI en la Implementación del SIG-DIFRA
 - 4.7 Plan de análisis
 - 4.8 Validación metodológica
5. **Desarrollo y análisis**
 - 5.1 Diagnóstico institucional del SIG-DIFRA

- 5.2 Jerarquización de FCE mediante AHP
 - 5.2.1 Ronda 1
 - 5.2.2 Ronda 2
 - 5.2.3 Ronda 3
- 5.3 Análisis y cierre del proceso Delphi
- 5.4 Jerarquización de Factores Críticos de Éxito mediante AHP
- 5.5 Identificación de brechas clave
- 5.6 Diseño conceptual del modelo GeoIA
- 5.7 Capacidades distintivas habilitadas por la GeoIA
- 6. Resultados**
 - 6.1 Resultados cuantitativos
 - 6.2 Resultados cualitativos
 - 6.3 Integración AHP – DOMPI
 - 6.4 Implicaciones estratégicas para la FAC
- 7. Discusión**
 - 7.1. Comparación con estudios internacionales
 - 7.2 Factores comunes y diferenciales en entornos militares
 - 7.3 Rol transformador de GeoIA
- 8. Conclusiones**
 - 8.1 Síntesis de hallazgos
 - 8.2 Aportes y aplicaciones estratégicas para la gestión de infraestructura crítica
- 9. Recomendaciones**
 - 9.1 Recomendaciones prácticas para la FAC
 - 9.2. Propuesta de KPIs
 - 9.3. Futuros pasos institucionales y académicos
- 10. Referencias**

Índice de Tablas

Tabla 1. Factores críticos de éxito para la implementación de SIG

Tabla 2. Ronda 1 – Identificación de Factores Clave de Éxito (FCE)

Tabla 3. Ronda 2 – Consolidación y Validación Preliminar

Tabla 4. Ronda 2 – Mediana – IQR

Tabla 5. Ronda 3 Validación y concesos

Tabla 6. Ronda 3 – Mediana e IQR Final

Tabla 7. Priorización de FCE

Tabla 8. Modelo conceptual GeoIA

Tabla 9. Propuesta KPIs

Índice de Imágenes

Imagen 1. Portadas Planes Piloto FAC

Imagen 2. Representación gráfica GeoIA

1. Introducción

En el contexto de la Cuarta Revolución Industrial, la gestión de infraestructura crítica aeronáutica en el sector defensa exige soluciones tecnológicas avanzadas que fortalezcan la soberanía, resiliencia operativa y capacidad de respuesta ante amenazas híbridas. En este escenario, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) emergen como herramientas esenciales para la toma de decisiones basada en evidencia geoespacial, permitiendo visualizar, analizar y modelar activos estratégicos del entorno operativo. Su incorporación en el ámbito militar ha evolucionado desde aplicaciones cartográficas hasta soluciones integradas con inteligencia artificial geoespacial (GeoIA), potenciando el análisis predictivo y la automatización de tareas clave en escenarios dinámicos.

En Colombia, la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) enfrenta el reto de consolidar un SIG específico para la gestión de infraestructura crítica aeronáutica (SIG-DIFRA), que responda a los lineamientos del planeamiento por capacidades con el fin de desarrollar mecanismos de detección y respuesta ante contextos de amenazas transversales. No obstante, persisten brechas institucionales, tecnológicas y doctrinales que limitan su implementación efectiva. Estudios internacionales (Mat Yatim et al., 2023; Eldrandaly, 2022) han demostrado que la identificación y priorización de factores críticos de éxito (FCE) son fundamentales para garantizar la sostenibilidad de estos sistemas. Sin embargo, en el contexto colombiano, se carece de un modelo sistemático que permita evaluar dichos factores en función de las capacidades reales y los objetivos estratégicos de defensa.

La presente investigación se orienta a partir de la siguiente pregunta central de investigación: ¿Cómo puede la GeoIA optimizar la gestión del SIG para mejorar la resiliencia de la infraestructura crítica aeronáutica? El objetivo general es diseñar un modelo conceptual de implementación del SIG-DIFRA, basado en la priorización de FCE mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) articulado con el diagnóstico estratégico DOMPI. Como objetivos específicos se proponen: (i) identificar los FCE en experiencias internacionales de implementación de SIG; (ii) aplicar la metodología DOMPI para

diagnosticar capacidades institucionales; (iii) jerarquizar los FCE mediante AHP; y (iv) proponer una arquitectura conceptual de integración SIG–GeoIA adaptada al entorno de defensa colombiano.

Este estudio emplea un enfoque mixto. El componente cualitativo contempla entrevistas semiestructuradas con expertos en SIG, GeoIA, así como muestreo intencionado y análisis de contenido temático. El componente cuantitativo se fundamenta en la recolección de datos espaciales de infraestructura aeronáutica crítica y su análisis mediante técnicas de estadística espacial y ponderación jerárquica (AHP). Se aplicarán cuestionarios estructurados para valorar los FCE identificados, integrando criterios como interoperabilidad, sostenibilidad, escalabilidad y alineación doctrinal. Esta triangulación metodológica permitirá una comprensión integral de las condiciones actuales y potenciales del SIG-DIFRA.

Este artículo se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta el marco teórico que fundamenta los conceptos de SIG, GeoIA, AHP y DOMPI; la sección 3 describe la metodología aplicada; la sección 4 expone los resultados del diagnóstico y análisis jerárquico; la sección 5 discute los hallazgos frente a la literatura; finalmente, la sección 6 presenta las conclusiones y recomendaciones estratégicas.

2. Estado del arte

2.1 Estado del arte sobre implementación de SIG en defensa e infraestructura crítica

La implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha sido un campo de estudio ampliamente documentado, especialmente en lo que respecta a su aplicación en defensa, seguridad e infraestructura crítica. Diversos estudios coinciden en que la adopción de SIG en organizaciones públicas y militares enfrenta una combinación de retos tecnológicos, organizacionales y humanos. A continuación, se presenta una síntesis del

estado del arte, construida a partir de los documentos académicos seleccionados, que constituyen evidencia empírica y teórica relevante para este estudio.

El trabajo de Eldrandaly et al. (2015), titulado "Evaluation of Critical Success Factors for GIS Implementation Using Analytic Hierarchy Proceses", constituye una referencia central para esta investigación. Los autores identifican Factores Críticos de Éxito (FCE) para la implementación de SIG, tales como el compromiso de la alta dirección, la calidad de los datos, la formación del personal y la infraestructura tecnológica. Empleando el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), logran establecer una jerarquía clara de estos factores, lo cual permite priorizar las áreas de intervención institucional. Esta metodología ha sido replicada con éxito en contextos gubernamentales y militares, demostrando su utilidad para la toma de decisiones complejas.

Por su parte, Aini et al. (2024) profundizan en la identificación de los principales desafíos que enfrentan las organizaciones públicas al implementar SIG, destacando la resistencia al cambio, la falta de claridad en los roles institucionales y la escasa coordinación interdepartamental. Su estudio en el contexto del gobierno local en Malasia aporta una perspectiva valiosa sobre la necesidad de una gobernanza tecnológica robusta para asegurar la sostenibilidad del sistema. Este hallazgo es extrapolable a instituciones de defensa, donde la jerarquía y la cultura organizacional tienen un peso determinante.

El estudio de Mat Yatim et al. (2023) centrado en la reimplementación de SIG en la compañía de energía Tenaga Nasional Berhad, ofrece un enfoque práctico sobre los factores de éxito desde la perspectiva de la gestión del cambio. Identifican que la participación del usuario final y la alineación con los objetivos estratégicos institucionales son condiciones necesarias para evitar el abandono prematuro del sistema. Esta investigación coincide con los hallazgos de los estudios previos en cuanto a la centralidad del recurso humano y la dirección institucional.

En el ámbito de seguridad y defensa, el informe "GIS for Homeland Security" de ESRI, (2020) plantea que los SIG deben considerarse como herramientas de resiliencia nacional, al integrar datos en tiempo real sobre infraestructuras, amenazas y recursos. El documento subraya la importancia de los estándares de interoperabilidad, la protección de la información geoespacial y la articulación interinstitucional, elementos particularmente relevantes para el caso colombiano.

De forma complementaria, el documento técnico "Investigation of Geobase Implementation Issues: Case Study of Infrastructure in the USAF" analiza los problemas operativos del sistema GeoBase en la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. Identifica barreras como la ausencia de roles funcionales definidos, la duplicidad de datos y la falta de integración entre sistemas heredados. Estas limitaciones son también observables en entornos como la FAC, lo que refuerza la necesidad de una implementación gradual, basada en diagnósticos sistemáticos y alineada con el planeamiento por capacidades.

Desde una perspectiva conceptual, el texto "Geographic Information System: Definition, Development, Applications and Components" de Sinha y Srivastava (2022) ofrece una revisión detallada sobre los componentes y evolución de los SIG, haciendo especial énfasis en su aplicación en escenarios de defensa y gestión de desastres. Resaltan que el éxito de estas plataformas depende de su adaptabilidad a entornos cambiantes, lo cual justifica el uso de modelos predictivos como los que proporciona la Inteligencia Artificial geoespacial.

Finalmente, el informe "Revolución de la Inteligencia Artificial en los SIG" (2023) elaborado por la Red de Universidades Colombianas, destaca el potencial de la GeoIA para transformar los procesos de análisis espacial. Identifica casos de uso exitosos en vigilancia de fronteras, predicción de amenazas ambientales y optimización de despliegues logísticos. Esta evidencia respalda la incorporación de la GeoIA como componente estructural del SIG-DIFRA.

En síntesis, el estado del arte permite identificar cinco tendencias clave:

1. La necesidad de alinear el SIG con la estrategia institucional y doctrinal.
2. La importancia de los FCE como base para una implementación exitosa.
3. La utilidad del AHP como metodología para jerarquizar decisiones complejas.
4. El valor de la metodología DOMPI para diagnósticos institucionales en defensa.
5. El papel emergente de la GeoIA como catalizador de transformación operativa.

Este marco permite contextualizar el estudio sobre el proyecto SIG-DIFRA en la FAC como una oportunidad para superar las limitaciones observadas en casos previos y avanzar hacia un modelo de inteligencia geoespacial institucionalizada, alineado con las demandas de seguridad y defensa del siglo XXI.

3. Marco Teórico y Conceptual

3.1 Definición y fundamentos de los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son plataformas tecnológicas que permiten capturar, almacenar, analizar y visualizar datos geoespaciales, posibilitando la toma de decisiones fundamentadas en el componente espacial de los fenómenos. Su aplicabilidad se extiende desde la cartografía de amenazas hasta la gestión de infraestructuras críticas.

En el ámbito militar, los SIG han evolucionado desde herramientas de mapeo hacia plataformas de mando y control interoperables. En la FAC, la implementación de un SIG para Infraestructura Crítica Aeronáutica (SIG-DIFRA) representa un salto cualitativo en la modernización institucional, integrando tecnologías geoespaciales con funciones operativas y de mando y control.

Un ejemplo real reciente es Mapping Geospatial AI Flood Risk in National Road Networks (Rezvani, Silva & Almeida, 2024), en ISPRS International Journal of Geo-Information, donde se emplean SIG combinados con GeoAI para evaluar riesgos de inundaciones sobre redes viales en Portugal. Este estudio utiliza datos abiertamente

disponibles, análisis espacial con modelos de aprendizaje de máquina, y técnicas de overlay espacial para identificar tramos de carreteras vulnerables frente a inundaciones.

Los componentes esenciales de los SIG —hardware, software, datos, personal y procedimientos— deben estar alineados bajo criterios de interoperabilidad, seguridad de la información y estandarización doctrinal. La calidad de los datos, por ejemplo, es determinante para la precisión del análisis espacial, mientras que el software define las capacidades de procesamiento y modelado.

Así mismo, la implementación efectiva de un SIG en el sector defensa demanda una visión integral de interoperabilidad, seguridad de la información y alineación doctrinal. La estructura organizacional, los protocolos de intercambio de datos y la capacitación continua del personal son elementos críticos para evitar que el SIG se convierta en un repositorio estático, desvinculado de las decisiones tácticas y estratégicas. De esta manera, el SIG-DIFRA se configura como una plataforma dinámica que permite a la FAC visualizar y gestionar su infraestructura crítica desde una perspectiva geoespacial integral.

3.2 Factores Críticos de Éxito (FCE)

La implementación de SIG institucionales está condicionada por Factores Críticos de Éxito (FCE), definidos como variables clave que inciden directamente en el éxito de la adopción tecnológica.

Entre los FCE identificados con mayor recurrencia se encuentran: (i) el compromiso de la alta dirección; (ii) la existencia de una visión y estrategia institucional clara; (iii) la participación activa de los usuarios finales; (iv) la calidad e interoperabilidad de los datos; (v) la capacitación y competencias del personal; (vi) la disponibilidad de recursos financieros y tecnológicos; y (vii) el soporte técnico continuo.

En la FAC, la identificación y jerarquización de FCE para el SIG-DIFRA resulta indispensable para orientar decisiones institucionales hacia un modelo operativo sostenible

y resiliente. La experiencia internacional demuestra que la falta de claridad en los FCE conduce a sistemas que, aunque tecnológicamente sofisticados, fracasan por ausencia de alineación con las necesidades reales de la institución.

3.3 GeoIA: integración de SIG con Inteligencia Artificial

La GeoInteligencia Artificial (GeoIA) constituye una evolución disruptiva de los SIG tradicionales, al integrar capacidades de Inteligencia Artificial (IA) para enriquecer el análisis geoespacial. Esta convergencia permite la automatización de tareas complejas como la detección de patrones, el análisis predictivo, la clasificación de imágenes satelitales y la segmentación semántica de datos espaciales (Zambrano Solís, 2023).

La aplicación de algoritmos de aprendizaje supervisado y no supervisado en contextos geoespaciales permite generar modelos que reconocen patrones en grandes volúmenes de datos, optimizando el tiempo de respuesta operativa. Esto es particularmente relevante en escenarios de defensa donde la anticipación de eventos y la conciencia situacional son fundamentales.

Aplicaciones recientes de GeoIA en defensa incluyen: detección automatizada de infraestructuras críticas vulnerables, predicción de rutas de amenaza, análisis de imágenes satelitales con redes neuronales y optimización logística basada en aprendizaje automático (El-Kenawy et al., 2023).

En el caso de Rezvani et al. (2024), se usa GeoAI para evaluar riesgo de inundación en la red vial, demostrando que los modelos predictivos basados en datos espaciales pueden identificar segmentos críticos. Esto es aplicable para defensa cuando se monitorea infraestructura estratégica, pistas de aterrizaje, hangares, accesos, etc.

La implementación de GeoIA en el SIG-DIFRA permitiría escalar su operatividad, incorporando capacidades como análisis predictivo de fallos en pistas de aterrizaje, monitoreo automatizado de instalaciones y simulación de escenarios ante eventos híbridos. Ello demanda una transformación de las competencias institucionales hacia perfiles con conocimientos en ciencia de datos, modelado geoespacial y ética algorítmica.

3.4 Metodología DOMPI

La metodología DOMPI (Doctrina, Organización, Material, Personal e Infraestructura) es un marco de referencia utilizado en Colombia para analizar y diagnosticar las capacidades institucionales de las Fuerzas Militares. Esta metodología parte de una concepción sistémica de la defensa, donde cada componente interactúa con los demás para conformar una capacidad operacional coherente y sostenible.

Doctrina: Evalúa la existencia y pertinencia de normativas, manuales operacionales y principios orientadores que sustentan el empleo de la capacidad analizada. En el caso del SIG-DIFRA, implica analizar si existen lineamientos doctrinales claros sobre su uso, actualización, interoperabilidad y seguridad.

Organización: Analiza la estructura institucional que soporta la implementación y operación del sistema. Considera si existen unidades, roles y responsabilidades definidas, y si la organización es adaptable a los cambios tecnológicos.

Material: Incluye los equipos, tecnologías y software necesarios para la operación efectiva del sistema. La evaluación se centra en la suficiencia, obsolescencia y compatibilidad del material disponible.

Personal: Considera el talento humano capacitado para diseñar, operar, mantener y evolucionar el sistema. Se analizan tanto aspectos cuantitativos (disponibilidad) como cualitativos (formación, competencias, experiencia).

Infraestructura: Refiere a las instalaciones físicas, redes de comunicación, centros de datos y plataformas digitales que soportan el funcionamiento del SIG.

El análisis DOMPI no solo permite identificar brechas críticas en la implementación del SIG-DIFRA, sino también establecer rutas de acción priorizadas para su fortalecimiento. Su aplicación metodológica proporciona un marco estructurado para alinear el sistema con el planeamiento por capacidades, enfoque adoptado por el Ministerio de Defensa Nacional.

3.5 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El Analytic Hierarchy Process (AHP), propuesto por Saaty (1980), ha sido ampliamente adoptado para estructurar decisiones multicriterio en contextos de incertidumbre. Su utilidad radica en la capacidad de descomponer un problema en

jerarquías lógicas y facilitar la asignación de pesos relativos a través de comparaciones por pares entre criterios. En el ámbito de los SIG, permite jerarquizar factores técnicos, organizacionales y humanos que afectan la implementación de plataformas geoespaciales (Aini et al., 2024). Su aplicación permite combinar conocimiento experto con análisis cuantitativo, generando una matriz de consistencia que valida los juicios emitidos.

El método AHP opera mediante comparaciones por pares y la construcción de una matriz de juicio que, a través del cálculo del vector propio, establece la ponderación relativa de cada criterio. Su valor radica en combinar conocimiento experto con análisis cuantitativo, y en validar la consistencia lógica de los juicios emitidos.

Este estudio empleará AHP para priorizar los FCE del SIG-DIFRA identificados en el análisis documental y entrevistas, facilitando la asignación de recursos y la toma de decisiones institucionales basadas en evidencia jerarquizada.

3.6 Relación entre los conceptos clave

La implementación del SIG-DIFRA representa una intersección compleja de dimensiones tecnológicas, doctrinales, humanas y organizacionales. La integración coherente de estos componentes es lo que permite configurar el SIG no como un producto tecnológico aislado, sino como una capacidad institucional en sentido pleno.

El modelo conceptual que sustenta esta investigación parte del reconocimiento de los FCE como catalizadores del éxito. A través del AHP, estos factores pueden jerarquizarse en función de su impacto relativo, generando una ruta de intervención clara. DOMPI, por su parte, aporta una metodología de diagnóstico que asegura que la intervención esté alineada con la estructura y capacidades de la institución. Finalmente, la GeoIA introduce un componente transformacional, al permitir que el sistema no solo reaccione, sino que anticipe, sugiera y optimice decisiones.

En conjunto, estos marcos permiten construir una arquitectura conceptual y metodológica para el SIG-DIFRA basada en evidencia, adecuada al contexto colombiano, y alineada con las doctrinas de planeamiento por capacidades, interoperabilidad de defensa y transformación digital del sector seguridad. Este marco teórico no solo fundamenta la

investigación, sino que establece las bases para futuras implementaciones en escenarios análogos dentro y fuera del país.

4. Metodología

4.1 Enfoque de investigación

La presente investigación adopta un enfoque mixto, integrando técnicas cualitativas y cuantitativas para identificar, priorizar y validar los Factores Críticos de Éxito (FCE) en la implementación del SIG-DIFRA.

El componente cualitativo se operacionaliza mediante entrevistas semiestructuradas y la técnica Delphi, aplicadas a expertos en geo inteligencia y defensa, permitiendo identificar percepciones expertas, mapear barreras institucionales y construir consenso sobre la relevancia de los FCE. Se utilizaron escalas Likert para cuantificar la relevancia percibida de cada FCE.

Por su parte, el componente cuantitativo se desarrolla a través del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), una técnica de decisión multicriterio que permite jerarquizar los FCE mediante comparaciones por pares. Se aplicaron ponderaciones a criterios como interoperabilidad, seguridad, proximidad y capacidad de integración, verificando la consistencia ($CR \leq 0.1$) para validar los resultados.

La metodología DOMPI se incorpora como puente integrador entre los datos cualitativos y cuantitativos, funcionando como marco de diagnóstico estructural que orienta el cruce de resultados Delphi–AHP con las capacidades institucionales de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Esta triangulación metodológica asegura que los hallazgos estén alineados con el planeamiento por capacidades y respondan tanto a criterios técnicos como operacionales.

4.2 Identificación y sistematización de los factores críticos de éxito para la implementación de SIG/GIS

Para identificar los factores críticos de éxito o CSFs por sus siglas en inglés, que influyen en la implementación de un sistema de información geográfica (SIG) o Geographic Information System (GIS), se llevó a cabo una revisión documental exhaustiva de literatura científica y técnica. El proceso de selección de las fuentes consideró tres criterios principales:

- Pertinencia temática, asegurando que los estudios abordaran la implementación de SIG/GIS en sectores de defensa, seguridad o infraestructura crítica.
- Rigor metodológico, privilegiando trabajos que identificaran y evaluaran variables o factores determinantes de manera explícita.
- Diversidad de contextos, incluyendo experiencias en diferentes países y sectores para ampliar la aplicabilidad de los hallazgos.

En este proceso se revisaron investigaciones clave como las de Eldrandaly, Eldin y AbdelAziz (2015) y Aini, Abdullah y Yusof (2024), que aplicaron el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para priorizar CSFs. Asimismo, se analizaron estudios de casos prácticos en entornos corporativos y militares, como el de Mat Yatim, Ahmad y Hussin (2023) y el informe técnico del United States Air Force Civil Engineer Center (2018). También se incorporaron revisiones conceptuales y técnicas de Sinha y Srivastava (2022) y de ESRI (2020), que aportan perspectivas sobre interoperabilidad, estándares y seguridad de la información geoespacial.

A partir de las consultas e investigación realizada se extrajeron de manera sistemática los factores que se identificaron como claves. Posteriormente, estos fueron agrupados por similitud conceptual, eliminando duplicidades y consolidando categorías representativas. El resultado es la Tabla 1, que presenta los FCE organizados con su respectiva descripción y las referencias que respaldan cada uno.

Esta tabla constituye un insumo clave para la fase de priorización mediante AHP, la cual permitirá orientar las acciones estratégicas necesarias para garantizar una implementación efectiva y sostenible del SIG-DIFRA en la Fuerza Aeroespacial Colombiana.

Tabla 1. Factores críticos de éxito para la implementación de SIG

No.	Factor Crítico de Éxito	Descripción	Fuente
1	Compromiso y apoyo de la alta dirección	La participación activa y el respaldo explícito de la alta dirección son esenciales para la asignación de recursos y la priorización del SIG.	Eldrandaly, Eldin & AbdelAziz (2015); Aini, Abdullah & Yusof (2024)
2	Calidad e interoperabilidad de los datos	Los datos deben ser precisos, actualizados y compatibles entre diferentes sistemas para garantizar análisis efectivos.	Eldrandaly et al. (2015); Sinha & Srivastava (2022)
3	Capacitación y competencias del personal	El éxito del SIG depende de usuarios capacitados que comprendan el análisis geoespacial y el uso de herramientas asociadas.	Mat Yatim, Ahmad & Hussin (2023); Aini et al. (2024)
4	Visión y estrategia institucional clara	Definición de objetivos, alcance y beneficios esperados, alineados con la misión y estrategia organizacional.	Aini et al. (2024); Identification of CSFs (trad.)
5	Infraestructura tecnológica adecuada	Disponibilidad de hardware, software y conectividad que soporten el procesamiento geoespacial y el almacenamiento seguro.	Eldrandaly et al. (2015); United States Air Force Civil Engineer Center (2018)
6	Gobernanza y gestión de proyectos	Estructuras organizativas y roles claros para la toma de decisiones, supervisión y coordinación interdepartamental.	Aini et al. (2024); United States Air Force Civil Engineer Center (2018)
7	Protección y seguridad de la información	Políticas y herramientas para salvaguardar datos sensibles frente a amenazas cibernéticas o filtraciones.	Environmental Systems Research Institute (2020); United States Air Force Civil Engineer Center (2018)
8	Participación activa de los usuarios finales	Involucrar a los usuarios en el diseño, pruebas y retroalimentación del sistema para mejorar la adopción.	Mat Yatim et al. (2023); Aini et al. (2024)

Fuente: Elaboración propia con base en los datos recolectados en las fuentes descritas

4.3 Selección de expertos (Delphi)

El panel de expertos para la aplicación del método Delphi–AHP estuvo conformado por ocho (8) especialistas en geointeligencia, sistemas de información geográfica y defensa e infraestructura crítica aeronáutica. La selección se realizó bajo criterios estrictos de experiencia profesional, incluyendo:

- Trayectoria mínima de 5 años en la planificación, implementación y operación de SIG en entornos de defensa y seguridad nacional.
- Experiencia comprobada en proyectos estratégicos de modernización tecnológica y manejo de infraestructura aeronáutica.

De los expertos seleccionados, tres corresponden a los autores del presente artículo, quienes cumplen con los criterios de inclusión establecidos. La participación de los autores como parte del panel se sustenta en su conocimiento especializado y en la necesidad de contar con perfiles que, además de experiencia operativa, tengan acceso a información clasificada o de alta sensibilidad, indispensable para el análisis de Factores Clave de Éxito (FCE) en el SIG-DIFRA.

Aunque el número de participantes es inferior al recomendado para estudios Delphi en contextos amplios, se considera adecuado y metodológicamente válido para investigaciones en dominios de alta especialización y acceso restringido a expertos, tal como lo señalan Skulmoski, Hartman y Krahn (2007) y Okoli y Pawlowski (2004). En estos escenarios, la calidad y diversidad del conocimiento experto prevalece sobre la cantidad de participantes, siempre que se cumplan criterios estrictos de selección y se garantice la neutralidad del análisis.

Para asegurar la fiabilidad y rigor del proceso, se implementaron las siguientes medidas:

1. Anonimato en las rondas de consulta, de modo que los participantes desconocían la identidad y las respuestas individuales de los demás miembros del panel.
2. Agregación estadística de las respuestas mediante medidas de tendencia central y el coeficiente de concordancia de Kendall W, con valores $\geq 0,70$ en la última ronda, indicador de alto nivel de consenso.

3. Diversidad de perspectivas dentro del panel, incluyendo expertos con funciones estratégicas, operativas y técnicas, lo que permitió cubrir la totalidad del ciclo de vida del SIG-DIFRA.

4.4 Diseño Delphi

El estudio se desarrolló en tres rondas siguiendo el protocolo clásico de Linstone y Turoff (2002):

- Ronda 1: identificación abierta de FCE a partir de la experiencia de los expertos y la revisión de literatura especializada (Eldrandaly et al., 2015; Aini et al., 2024; Mat Yatim et al., 2023).
- Ronda 2: evaluación de la relevancia de cada FCE mediante escala Likert (1-5), cálculo del Índice de Validez de Contenido (CVI) y análisis de dispersión intercuartílica (IQR) para estimar consenso.
- Ronda 3: reevaluación de FCE con consenso inferior al 75%, buscando convergencia en las valoraciones.

4.5 Aplicación del AHP

Para jerarquizar los factores críticos de éxito (FCE) en la implementación de SIG, se aplicó el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) de Saaty (1980). La ponderación se obtuvo mediante comparaciones por pares usando la escala 1–9 propuesta por Saaty (1980). Se calculó el peso relativo de cada FCE y la razón de consistencia (CR), verificando que $CR \leq 0,1$, conforme a criterios de validez del método (Vargas, 2010).

4.6 Integración de Resultados AHP con Diagnóstico DOMPI en la Implementación del SIG-DIFRA

Los resultados del AHP se cruzaron con el diagnóstico DOMPI institucional (Doctrina, Organización, Material, Personal e Infraestructura), permitiendo identificar brechas de capacidad y asignar prioridades de intervención con el propósito de propiciar que la jerarquización de FCE se oriente a dimensiones con impacto estratégico y viabilidad

técnica, siguiendo lineamientos doctrinales de planeamiento por capacidades en defensa (Ministerio de Defensa Nacional, 2019).

4.7 Plan de análisis

- Cualitativo: codificación de FCE y síntesis temática, cálculo de CVI e IQR para consenso Delphi (Hasson et al., 2000).
- Cuantitativo: cálculo de pesos y consistencia AHP, análisis de sensibilidad para validar estabilidad de prioridades (Eldrandaly et al., 2015).
- Integrado: mapeo de resultados AHP sobre la matriz DOMPI para construir el modelo conceptual de implementación SIG–GeoIA.

4.8 Validación metodológica

La calidad del estudio se garantiza mediante: (i) trazabilidad documental de cuestionarios, matrices y criterios de cálculo; (ii) uso de indicadores de consistencia y validez de contenido; y (iii) adopción de buenas prácticas en estudios Delphi y AHP reportadas en la literatura (Hsu & Sandford, 2007; Okoli & Pawlowski, 2004; Saaty, 1980).

5. Desarrollo y análisis

5.1 Diagnóstico institucional del SIG-DIFRA

El diagnóstico inicial del Proyecto (SIG-DIFRA) de la FAC, pretende establecer desde la perspectiva funcional de la Dirección de Infraestructura (DIFRA), un análisis del estado actual del proyecto y su proceso de implementación, a partir del análisis documental de lineamientos institucionales de la Jefatura Tecnologías de la Información y Comunicaciones – (JETIC), como lo es el “Plan estratégico de tecnologías de la información y comunicaciones” (PETIC 2023-2026), planes de arquitectura TIC, documentos de adquisición y licenciamiento, entrevistas realizadas a personal de la DIFRA, ESRI y personal externo a las instituciones que estuvieron vinculados al proyecto SIG-

DIFRA en su etapa inicial. Lo anterior con el fin de evaluar el estado actual del sistema, sus capacidades tecnológicas, su alineación con las estrategias de defensa y ciberseguridad.

Desde la Dirección de Infraestructura se reconoce que el SIG-DIFRA se fundamenta en tecnologías licenciadas por ESRI, bajo acuerdos corporativos FAC-ESRI denominados ELA (2019, 2020, 2022; 2023). Así mismo, el proyecto se articula con las necesidades de centralizar la información de los Planes Pilotos de las diferentes Unidades Militares Aéreas (UMAS), a través de una herramienta geográfica moderna que permita integrar las diferentes variables que componen un Plan Piloto, para así llevar a cabo un adecuado proceso de planificación de infraestructura, gestión predial, mantenimiento de activos, entre otros. El sistema permitirá integrar información espacial con atributos administrativos, lo que optimiza la visualización y control de la infraestructura.

Sin embargo, se han identificado ciertas limitaciones en la interoperabilidad entre sistemas, escasa apropiación del sistema por parte de usuarios operacionales y fragmentación en los flujos de datos. A pesar de contar con una base tecnológica robusta (Licenciamiento ELA), la Dirección de Infraestructura evidencia la necesidad de fortalecer las capacidades institucionales en análisis geoespacial avanzado y gobernanza de datos, en materia de información georreferenciada de los Planes Piloto de las UMAS.

1. Estado actual del proyecto:

El proyecto se encuentra en fase de implementación, aún sin despliegue al usuario final. Se han realizado trabajos de campo orientados a la actualización de la información cartográfica en algunas Unidades de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC). De manera paralela, se adelantó un estudio de prospectiva para orientar el crecimiento y desarrollo de las Unidades Militares. A continuación, se presentan las portadas de los documentos estructurados como parte del trabajo inicial, el cual servirá de base para el desarrollo del Sistema de Información Geográfica para la Defensa de la Infraestructura Aeroespacial (SIG-DIFRA).

Imagen 1. Portadas Planes Piloto FAC



Fuente: Elaboración propia

2. Apreciación general del avance del proyecto:

El proyecto presenta avances sustantivos en la consolidación de la base de datos geográfica, integración parcial de ciertas fuentes de información y diseño de la arquitectura del sistema. Sin embargo, se identifica que el ritmo de implementación ha sido afectado por:

- Cambios en los lineamientos y prioridades establecidas por diversos directores de Infraestructura de la DIFRA a lo largo del tiempo, lo cual ha generado la interrupción en la consecución de la información geográfica fuente para alimentar el sistema, dedicación del personal al proyecto, entre otros.
- Brechas de comunicación entre la Dirección de Infraestructura y la Jefatura de Tecnologías de la Información (JETIC).

3. Marco Institucional y Normativo

El Plan Estratégico de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (PETIC) 2023-2026 establece los principios rectores del desarrollo TIC en la FAC, orientando proyectos como SIG-DIFRA hacia la transformación digital, interoperabilidad y ciberseguridad (FAC, 2023). El Plan de Arquitectura de Sistemas de Información y Comunicaciones define los componentes estructurales y de gobernanza de la arquitectura tecnológica institucional. Por su parte, la Directiva Permanente 004 de 2022 refuerza la necesidad de gestionar tecnológicamente los sistemas críticos de defensa, incluyendo los relacionados con la infraestructura aeronáutica.

4. Diagnóstico institucional del SIG-DIFRA (DOMPI)

El análisis mediante la metodología DOMPI (Doctrina, Organización, Material, Personal e Infraestructura) permitió evaluar de manera integral las capacidades institucionales de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) en relación con la implementación del SIG-DIFRA.

En **Doctrina**, se identificó que no existe aún un marco normativo específico que regule el uso, interoperabilidad y actualización del SIG-DIFRA, lo que genera vacíos en la estandarización de procesos y en la alineación con la estrategia de defensa nacional (Ministerio de Defensa Nacional, 2019). La ausencia de procedimientos operativos específicos genera vacíos en la estandarización, interoperabilidad y trazabilidad de la información geoespacial, lo que contrasta con las recomendaciones de la OTAN y la ICAO para la gestión de infraestructura crítica. Según la norma ISO 19157 (Información Geográfica - Calidad de los datos), la calidad geoespacial debe ser verificada por procedimientos documentados y sistemáticos.

En **Organización**, la estructura actual en la Dirección de Infraestructura (DIFRA) carece de una unidad formal dedicada a la gestión del SIG, y las responsabilidades relacionadas se encuentran distribuidas entre diferentes dependencias sin una coordinación centralizada.

En el componente **Material**, aunque se dispone de software GIS, licenciamiento ELA y servidores dedicados, se evidencian limitaciones en la capacidad de ciertos equipos de cómputo de la DIFRA y en la integración con otros sistemas de mando y control.

En **Personal**, el diagnóstico muestra un número reducido de especialistas en análisis geoespacial y administración de bases de datos, a nivel de la DIFRA, con escasas oportunidades de capacitación continua. No existe personal exclusivo ni planta dedicada al mantenimiento, operación y actualización del SIG-DIFRA. Las actividades han sido delegadas como funciones adicionales a personal técnico sin formación especializada ni disponibilidad plena, generando riesgos de sostenibilidad, dependencia externa y pérdida de continuidad técnica.

Finalmente, en **Infraestructura**, se observa que las redes de comunicación y la conectividad entre bases aéreas presentan una adecuada conectividad para la transmisión de datos geoespaciales en tiempo real.

En conjunto, este diagnóstico evidencia que la madurez institucional para la implementación del SIG-DIFRA se encuentra en una etapa temprana, con avances en recursos materiales, pero con brechas significativas en doctrina, personal y gobernanza.

5. Entrevistas a personal:

Se llevo a cabo la elaboración de un formato tipo entrevista con el fin de poder contar con la percepción de diversos funcionarios FAC que participan actualmente en el proyecto, personal externo a la FAC el cual hizo parte del proyecto en sus inicios (Oficiales retirados, personal contratista) así como personal de ESRI COLOMBIA, vinculado actualmente al licenciamiento corporativo ELA

El instrumento de diagnóstico (entrevista) fue diseñado bajo una estructura modular que permitiera identificar factores técnicos, organizativos y estratégicos que inciden en la operación y sostenibilidad del SIG-DIFRA. Las preguntas incluidas pretenden responder a las siguientes temáticas:

- **Información General:** Caracterizar a los participantes en términos de experiencia, rol y pertenencia institucional, para contextualizar el nivel de apropiación y conocimiento del sistema.
- **Componentes Técnicos del SIG:** Evaluar el estado actual de la infraestructura tecnológica (hardware, software, redes) y su potencial de interoperabilidad con otros sistemas institucionales, así como el cumplimiento de estándares internacionales de calidad geoespacial.
- **Gestión de Datos Geográficos:** Analizar la calidad, actualización, respaldo y seguridad de la información geoespacial administrada por el SIG-DIFRA.
- **Gobernanza y Organización:** Identificar si existen instancias regulatorias formales, claridad en los roles y responsabilidades, y mecanismos de coordinación institucional.
- **Capacidades Humanas y Formación:** Determinar el nivel de formación, especialización, cobertura de personal y existencia de programas de capacitación y certificación.
- **Identificación de Brechas y Riesgos:** Reconocer fallas, debilidades estructurales y riesgos potenciales que puedan comprometer la continuidad operativa y seguridad del sistema.
- **Visión Estratégica y Propuestas:** Recopilar perspectivas sobre prioridades futuras, buenas prácticas a implementar y tecnologías emergentes que puedan fortalecer el SIG-DIFRA.

Esta estructura buscó garantizar una lectura integral del ecosistema SIG en la FAC, permitiendo una triangulación de percepciones técnicas, operativas y prospectivas. A continuación, se presenta el análisis de los resultados tanto a nivel crítico por pregunta, así como a nivel temático:

Análisis Crítico por Pregunta - Diagnóstico SIG-DIFRA FAC

Este análisis presenta una síntesis objetiva y crítica de las respuestas obtenidas en la encuesta aplicada a funcionarios de la FAC, personal de ESRI y expertos vinculados al

desarrollo del Sistema de Información Geográfica de la Dirección de Infraestructura (SIG-DIFRA). Las preguntas se citan textualmente según el cuestionario aplicado.

1. Nombre, Cargo, Entidad o dependencia, Años de experiencia en SIG, Rol desempeña o ha desempeñado frente al SIG

Predominan perfiles operativos y técnicos como topógrafo y técnico operario topógrafo, con afiliación principalmente a la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) y dependencias como DIFRA y AGEFI. Se observa que varios entrevistados tienen poca o nula experiencia previa, lo que evidencia una brecha de conocimiento y ausencia de liderazgos estratégicos claramente definidos.

2. ¿Cómo evalúa la infraestructura tecnológica actual del SIG-DIFRA (software, hardware, redes, servidores)?

Las percepciones son mixtas: algunos valoran su funcionalidad y estabilidad, mientras otros subrayan carencias de hardware y capacidades de servidor, reflejando un entorno operativo, pero no completamente robusto.

3. ¿Es posible que se implemente una arquitectura de interoperabilidad o integración del SIG-DIFRA con otros sistemas institucionales?

Existe consenso sobre su viabilidad técnica, pero se advierte que requiere unificación de estándares y una gobernanza clara.

4. ¿Qué estándares se aplican en cuanto a datos geoespaciales (ISO 19115, INSPIRE, FGDC, OGC, etc.)?

Se mencionan estándares como ISO 19115, OGC e INSPIRE, aunque su conocimiento y aplicación no es homogéneo, indicando la necesidad de formación adicional.

5. ¿Cuál debería ser el nivel de calidad y actualización de la base de datos geoespacial para el SIG-DIFRA? ¿Con la información que se tiene actualmente del SIG-DIFRA se cumple con estos niveles?

Existe consenso en que no se cumple con la actualización requerida, y que se necesita información en tiempo real, precisa y consistente.

6. ¿Se cuenta con políticas de metadatos, control de versiones y respaldo de información?

Se reportan respaldos, pero no siempre existe un control de versiones ni una política consolidada de metadatos.

7. ¿Existen protocolos de seguridad de la información geográfica?

Algunos señalan que la seguridad se gestiona mediante ESRI y protocolos existentes, pero no hay un estándar interno homogéneo.

8. ¿Qué instancia o comité regula el funcionamiento del SIG-DIFRA institucional?

Se menciona la Dirección de Infraestructura y la Jefatura TIC de la FAC, aunque no existe un comité formal multidisciplinario.

9. ¿Están claramente definidos los roles y responsabilidades de los actores del SIG-DIFRA?

Se encuentran en proceso de definición, con roles difusos y falta de diferenciación entre funciones técnicas y decisorias.

10. ¿Qué nivel de formación tienen los usuarios y administradores del SIG?

Existe heterogeneidad en la formación, pero la capacitación especializada continua es insuficiente.

11. ¿Se realizan capacitaciones periódicas, certificaciones o entrenamientos técnicos?

Son insuficientes o esporádicas, limitando el crecimiento de capacidades institucionales.

12. ¿Se cuenta con personal suficiente y con perfil especializado?

No se cuenta con el personal suficiente ni con perfiles plenamente especializados.

13. ¿Cuáles considera que son las principales debilidades del SIG-DIFRA actualmente?

Falta de capacitación, hardware insuficiente y baja actualización de datos son las más señaladas.

14. ¿Qué riesgos técnicos, organizativos o estratégicos podrían comprometer su continuidad?

Se destacan fallas técnicas, riesgos de ciberseguridad y falta de continuidad contractual.

15. ¿Se han presentado fallos relevantes en la operación del SIG? ¿Cómo se gestionaron?

Pocos reportan fallos críticos, lo que podría reflejar estabilidad o falta de mecanismos de reporte.

16. ¿Cuál debería ser la prioridad para fortalecer el SIG-DIFRA en los próximos 2 años?

Prioridades: capacitación especializada, actualización tecnológica y estandarización de procesos.

17. ¿Qué buenas prácticas recomienda para garantizar la sostenibilidad del sistema?

Actualización continua, generación de usuarios de consulta y protocolos institucionales de gestión geoespacial.

18. ¿Qué tecnologías emergentes (IA, big data, drones, IoT) podrían ser incorporadas?

IA, drones y sensores remotos son las más citadas; algunos no tienen conocimiento sobre estas tecnologías.

19. ¿Desea agregar alguna observación o recomendación final?

Recomendaciones: fortalecimiento institucional del SIG, dotación de hardware y continuidad progresiva en la implementación.

Análisis de Resultados de la Encuesta Diagnóstica SIG-DIFRA a nivel temático:

Información General del Entrevistado:

El perfil de los encuestados muestra una composición heterogénea, con cargos que van desde técnicos operativos y topógrafos, hasta administradores y oficiales responsables de la gestión de infraestructura. Las dependencias incluyen tanto unidades de la Fuerza Aeroespacial Colombiana como contratistas y especialistas de ESRI. El rango de experiencia en SIG oscila entre 1 y más de 10 años, evidenciando un capital humano con distintos niveles de madurez tecnológica. La mayoría ha desempeñado roles de desarrollador y administrador, aunque también se identifican perfiles decisores y usuarios finales.

Implicación: Esta diversidad de perfiles enriquece el diagnóstico, pero también puede generar diferencias en la percepción de prioridades y capacidades.

Componentes Técnicos del SIG:

En cuanto a la infraestructura tecnológica, un 60% de los entrevistados la considera funcional y estable, aunque un 40% identifica limitaciones de hardware y la necesidad de reforzar la conectividad y servidores. Sobre la interoperabilidad, la mayoría coincide en que es técnicamente posible, pero requiere unificación de estándares y protocolos de seguridad. Los estándares más mencionados son ISO 19115, INSPIRE y FGDC, junto con referencias a especificaciones OGC.

Implicación: Existe la base técnica para la integración con otros sistemas institucionales, pero es necesario un plan formal de interoperabilidad.

Gestión de Datos Geográficos:

El consenso es que la base de datos geoespacial debe tener alta calidad y actualización en tiempo real, pero actualmente no se cumple este estándar en todos los casos. Un 70% reporta contar con políticas de metadatos y respaldo, aunque el control de

versiones no está plenamente implementado. La seguridad de la información se gestiona principalmente desde la infraestructura de ESRI y protocolos internos de la FAC.

Implicación: Se requiere un esquema de gobernanza de datos más robusto y un ciclo de actualización sistemático.

Gobernanza y Organización:

Las funciones de regulación recaen en la Dirección de Infraestructura y la Jefatura TIC. Aunque la mayoría indica que los roles y responsabilidades están definidos, persiste una falta de socialización que limita la generación de usuarios de consulta y el uso transversal del sistema.

Implicación: El modelo de gobernanza debe incluir mecanismos de comunicación interna y una estrategia de adopción institucional.

Capacidades Humanas y Formación:

Predomina un déficit de personal especializado y falta de capacitaciones periódicas. Aunque algunos entrevistados han recibido formación virtual o presencial, no existe un programa estructurado de certificaciones.

Implicación: El capital humano es un factor crítico de éxito y actualmente representa una de las principales brechas del SIG-DIFRA.

Brechas y Riesgos:

Las debilidades más citadas incluyen: falta de actualización de datos, capacitación insuficiente, y escasez de hardware especializado. Los riesgos más señalados son la ciberseguridad, la continuidad del contrato de software y fallas técnicas.

Implicación: Es necesario establecer un plan de mitigación de riesgos tecnológicos y organizativos.

6. Conclusiones del diagnóstico y recomendaciones:

El diagnóstico del SIG-DIFRA evidencia un sistema con una base tecnológica funcional y estable. La diversidad de perfiles entre los participantes permite contar con distintas perspectivas técnicas y operativas, lo que enriquece el análisis de necesidades y fortalezas.

No obstante, se detectan brechas críticas en la actualización de la base de datos geoespacial, la socialización interna del sistema, y la disponibilidad de personal especializado. Asimismo, la dependencia de contratos de software y la ausencia de un plan estructurado de formación representan riesgos para la sostenibilidad del sistema.

Las oportunidades identificadas se concentran en la interoperabilidad con otros sistemas institucionales, la estandarización de procesos y la adopción de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, los drones, los sensores remotos y el Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés Internet of Things). Sin embargo, estos avances requieren un marco de gobernanza y recursos humanos capacitados para su implementación exitosa.

Recomendaciones Estratégicas

1. Actualización sistemática de la base de datos geoespacial

- a. Implementar un ciclo de actualización periódico y controlado, con indicadores de completitud, precisión y consistencia lógica.
- b. Integrar herramientas de validación automática y control de calidad.

2. Plan de formación y certificación continua

- a. Diseñar un programa institucional de capacitación en SIG, con certificaciones reconocidas internacionalmente.
- b. Incluir formación en nuevas tecnologías aplicadas a la geointeligencia.

3. Estandarización e interoperabilidad

- a. Adoptar un marco unificado de estándares geoespaciales (ISO, OGC) para garantizar la integración con otros sistemas institucionales y externos.
- b. Desarrollar APIs y mecanismos seguros de intercambio de datos.

4. Fortalecimiento del modelo de gobernanza

- a. Formalizar roles y responsabilidades mediante un documento institucional de gobernanza SIG-DIFRA.
- b. Crear un comité técnico permanente que supervise el avance, la seguridad y la interoperabilidad del sistema.

5. Gestión de riesgos y continuidad operativa

- a. Elaborar un plan de mitigación de riesgos que contemple ciberseguridad, obsolescencia tecnológica y continuidad de contratos.
- b. Implementar simulacros de contingencia y recuperación de datos.

Síntesis estratégica:

El SIG-DIFRA se encuentra en una fase de consolidación, con bases técnicas sólidas, pero con debilidades que podrían comprometer su continuidad si no se abordan. La adopción de un enfoque integral que combine modernización tecnológica, fortalecimiento organizacional y formación especializada es esencial para garantizar su sostenibilidad y posicionamiento como herramienta crítica para la gestión de la infraestructura aeronáutica.

5.2 Jerarquización de FCE mediante AHP

Mediante el uso de la metodología Delphi se planteó la conformación de un panel de expertos con los cuales poder llegar a un consenso sobre cuáles son los factores clave de éxito para la implementación de un SIG, metodología que requirió la búsqueda de personal experto con los cuales se realizaron tres rondas expuestas a continuación:

5.2.1 Ronda 1:

Basados en la identificación de los factores críticos de éxito que influyen en la implementación de un sistema de información geográfica (SIG) llevada a cabo bajo la revisión documental de literatura expuesta en el numeral 4.2 *“Identificación y sistematización de los factores críticos de éxito para la implementación de SIG/GIS”*, se propuso como base al panel de experto su pertinencia para validación y adicionalmente se

solicitó incluir aspectos o factores que a su juicio y experiencia consideraran deberían ser incorporados. Obteniendo como resultado la tabla 2.

Tabla 2. Ronda 1 – Identificación de Factores Clave de Éxito (FCE)

ID	Correo electrónico	Desde su experiencia, ¿considera que los factores expuestos en la imagen son los más críticos para el éxito en la implementación de un SIG?	¿Indique cuales factores, diferentes a los descritos anteriormente, deberían incluirse como factores críticos para el éxito en la implementación de un SIG?
1	anonymous	SI	Actualización tecnológica continua - Integrar innovaciones como GeoIA y análisis predictivo. - Revolución de la Inteligencia Artificial en los SIG (Red de Universidades Colombianas, 2023)
2	anonymous	SI	Como parte de la VISION Y ESTRATEGIA INSTITUCIONAL CLARA, el proyecto SIG-DIFRA debe enmarcarse bajo una directiva o resolución FAC la cual emita políticas, responsabilidades, y tiempos esperados para la implementación del proyecto. En CALIDAD E INTEROPERABILIDAD DE LOS DATOS debe incluirse lo referente a la elaboración de procedimientos técnicos de gestión de la información geográfica para el proyecto (captura, cargue, procesamiento, periodicidad)
3	anonymous	SI	Capacitación y gestión del conocimiento
4	anonymous	SI	Matriz de riesgos asociada a la implementación del SIG con el fin de mitigar afectaciones a su implementación y perdurabilidad, documentación robusta del sistema (metadatos , diseño y desarrollo)
5	anonymous	SI	Garantizar los recursos para la adquisición de software y capacitación del personal
6	anonymous	SI	Se podría integrar el cumplimiento de la incorporación de normativas ISO para la calidad de los datos.
7	anonymous	SI	Entrenamiento y capacitación, Mejoramiento continuo
8	anonymous	SI	Considero que los factores anteriormente descritos son los pertinentes para el éxito de un SIG.

Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Ronda 2:

En la segunda ronda del proceso Delphi, se trabajó con el mismo panel de expertos conformado en la fase inicial, compuesto por [número] profesionales con experiencia en implementación y gestión de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en contextos de

infraestructura crítica. El objetivo principal de esta ronda fue refinar y consolidar las valoraciones iniciales sobre la importancia relativa de cada Factor Crítico Exógeno (FCE) identificado en la Ronda 1, buscando reducir la dispersión y avanzar hacia el consenso.

Para ello, se elaboró un cuestionario que incluía:

Lista de FCE identificados en la Ronda 1, con sus definiciones operativas.

Escala de valoración tipo Likert de 5 puntos, donde 1 representaba “Nada importante” y 5 “Crítico para el éxito del SIG”.

Retroalimentación estadística agregada de la ronda anterior, presentada a cada experto en forma de:

Mediana: valor central de las calificaciones del panel.

Rango Intercuartílico (IQR): medida de dispersión calculada como la diferencia entre el tercer cuartil (Q3) y el primer cuartil (Q1), que permite evaluar el grado de consenso.

La mediana se utilizó como indicador robusto de tendencia central, dado que no se ve afectada por valores atípicos. Por su parte, el IQR se empleó como criterio para medir el consenso, considerando que valores ≤ 1 indican alto acuerdo, mientras que valores ≥ 2 reflejan heterogeneidad en las opiniones (Hasson et al., 2000; Hsu & Sandford, 2007).

Los resultados obtenidos son los siguientes descritos en la tabla 3 y 4:

Tabla 3. Ronda 2 – Consolidación y Validación Preliminar

Factor Clave Éxito	1	2	3	4	5	6	7	8
Compromiso y apoyo de la alta dirección - Respaldo institucional y asignación de recursos estratégicos para la implementación del SIG.	5	5	5	5	5	5	5	5
Calidad e interoperabilidad de los datos - Los datos deben ser precisos, actualizados y compatibles entre diferentes sistemas para garantizar análisis efectivos.	3	5	4	5	5	4	4	5
Capacitación y competencias del personal -El éxito del SIG depende de usuarios capacitados que comprendan el análisis geoespacial y el uso de herramientas asociadas.	5	5	4	4	5	4	4	5

Visión y estrategia institucional clara - Definición de objetivos, alcance y beneficios esperados, alineados con la misión y estrategia organizacional.	4	4	3	5	5	5	5	5
Infraestructura tecnológica adecuada - Disponibilidad de hardware, software y conectividad que soporten el procesamiento geoespacial y el almacenamiento seguro.	3	3	3	4	5	4	5	5
Gobernanza y gestión de proyectos - Estructuras organizativas y roles claros para la toma de decisiones, supervisión y coordinación interdepartamental.	4	2	2	4	5	5	4	5
Protección y seguridad de la información - Políticas y herramientas para salvaguardar datos sensibles frente a amenazas cibernéticas o filtraciones.	4	4	4	5	5	3	5	5
Participación activa de los usuarios finales -Involucrar a los usuarios en el diseño, pruebas y retroalimentación del sistema para mejorar la adopción.	3	3	4	5	5	3	3	3
Actualización tecnológica continua - Integrar innovaciones como GeoIA y análisis predictivo.	5	3	5	4	5	4	4	3
Gestión del conocimiento - procesos para identificar, crear, retener, compartir y usar el conocimiento dentro de la organización	5	3	2	4	5	3	3	5
Matriz de riesgos asociada a la implementación del SIG - mitigar afectaciones a su implementación y perdurabilidad, (metadatos, diseño y desarrollo)	3	3	1	5	5	2	4	5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Ronda 2 – Mediana - IQR

Código	Factor Crítico Exógeno (FCE)	Mediana R2	IQR R2
FCE1	Compromiso y apoyo de la alta dirección	5.0	0.0
FCE2	Calidad e interoperabilidad de los datos	4.0	1.0
FCE3	Capacitación y competencias del personal	4.0	1.0
FCE4	Visión y estrategia institucional clara	5.0	1.0
FCE5	Infraestructura tecnológica adecuada	4.0	2.0
FCE6	Gobernanza y gestión de proyectos	4.0	2.0
FCE7	Protección y seguridad de la información	4.0	1.0
FCE8	Participación activa de los usuarios finales	3.0	2.0
FCE9	Actualización tecnológica continua	5.0	1.0
FCE10	Gestión del conocimiento	3.0	2.0
FCE11	Matriz de riesgos asociada al SIG	3.0	3.0

Fuente: Elaboración propia

5.2.3 Ronda 3:

La tercera ronda del proceso Delphi se desarrolló con el objetivo de validar el consenso alcanzado en las fases anteriores, enfocándose en aquellos Factores Críticos de

Éxito (FCE) que presentaron mayor dispersión en la Ronda 2 ($IQR \geq 2.0$) y en los que se requería una reevaluación para consolidar las valoraciones del panel. Se mantuvo la conformación de los ocho expertos previamente seleccionados, con experiencia demostrada en implementación y gestión de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en entornos de infraestructura crítica.

Para esta ronda, se diseñó un cuestionario centrado exclusivamente en los FCE con menor nivel de acuerdo previo, proporcionando a los expertos:

- Las definiciones operativas de cada factor,
- Las estadísticas de la ronda anterior (mediana e IQR),
- Y una escala tipo Likert de 5 puntos para reevaluar la importancia percibida.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 5. Ronda 3 Validación y conceso

FCE	1	2	3	4	5	6	7	8
FCE1	Compromiso y apoyo de la alta dirección	5	5	5	5	5	5	5
FCE2	Calidad e interoperabilidad de los datos	4	5	5	4	5	4	4
FCE3	Capacitación y competencias del personal	4	4	5	4	5	4	5
FCE4	Visión y estrategia institucional clara	4	5	5	5	5	5	4
FCE5	Infraestructura tecnológica adecuada	4	4	5	4	4	4	3
FCE6	Gobernanza y gestión de proyectos	2	4	5	4	5	4	5
FCE7	Protección y seguridad de la información	4	5	5	4	5	4	3
FCE8	Participación activa de los usuarios finales	3	5	5	5	4	3	3
FCE9	Actualización tecnológica continua	5	4	4	4	4	4	5
FCE10	Gestión del conocimiento	3	5	5	4	5	3	4
FCE11	Matriz de riesgos asociada a la implementación del SIG	2	4	4	5	4	3	4

Fuente: Elaboración propia

5.3 Análisis y Cierre del Proceso Delphi

Los resultados de la tercera ronda evidencian una mejora significativa en los niveles de consenso del panel de expertos. Todos los Factores Críticos de Éxito (FCE), con excepción de FCE8 (Participación de usuarios finales) y FCE10 (Gestión del conocimiento), lograron un IQR ≤ 1.0 , cumpliendo con el umbral de consenso establecido en la literatura (Hasson et al., 2006). Además, la totalidad de los factores obtuvo una mediana igual o superior a 4.0, lo que indica una alta percepción de importancia para el éxito de la implementación de un SIG en contextos de infraestructura crítica, ver tabla 6.

Tabla 6. Ronda 3 – Mediana e IQR Final

	FCE	Mediana R3	IQR R3
FCE1	Compromiso y apoyo de la alta dirección	5.0	0.0
FCE2	Calidad e interoperabilidad de los datos	4.0	1.0
FCE3	Capacitación y competencias del personal	4.5	1.0
FCE4	Visión y estrategia institucional clara	5.0	1.0
FCE5	Infraestructura tecnológica adecuada	4.0	1.0
FCE6	Gobernanza y gestión de proyectos	4.5	1.0
FCE7	Protección y seguridad de la información	4.0	1.0
FCE8	Participación activa de los usuarios finales	4.0	2.0
FCE9	Actualización tecnológica continua	4.0	1.0
FCE10	Gestión del conocimiento	4.0	2.0
FCE11	Matriz de riesgos asociada al SIG	4.0	1.0

Fuente: Elaboración propia

Como resultado del análisis cuantitativo de las valoraciones, se identificaron los cinco factores más relevantes, tanto por su alta mediana como por el bajo nivel de dispersión entre expertos. Estos factores, que serán considerados prioritarios para la etapa de jerarquización mediante AHP, son:

- FCE1 – Compromiso y apoyo de la alta dirección: obtuvo consenso pleno (mediana = 5.0; IQR = 0.0), reflejando su rol estructural como catalizador institucional del proyecto SIG.
- FCE4 – Visión y estrategia institucional clara: alineación estratégica reconocida como clave para sostenibilidad y dirección del sistema.

- FCE3 – Capacitación y competencias del personal: la gestión del talento técnico fue resaltada como eje de operacionalización efectiva.
- FCE6 – Gobernanza y gestión de proyectos: asociada a la definición de roles, estructuras de supervisión y capacidad de implementación.
- FCE2 – Calidad e interoperabilidad de los datos: considerada indispensable para garantizar análisis fiables y toma de decisiones informadas.

Estos cinco factores serán integrados en la siguiente fase metodológica, utilizando el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), con el fin de determinar su ponderación relativa y construir un modelo de priorización aplicable a entornos de defensa e infraestructura crítica.

5.4 Jerarquización de Factores Críticos de Éxito mediante AHP

Tras la aplicación de la metodología de jerarquización AHP mediante el software SuperDecisions, se procedió a la comparación por pares de los cinco Factores Críticos de Éxito (FCE) identificados como más relevantes durante el proceso Delphi. El objetivo fue establecer una priorización objetiva que orientara la toma de decisiones estratégicas en torno a la implementación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) en el contexto de infraestructura crítica aeronáutica.

La estructura jerárquica del modelo se definió bajo un único mérito de evaluación y sin la incorporación de subcriterios ni alternativas, dado que el análisis se centró exclusivamente en la valoración relativa de los FCE. Las comparaciones por pares fueron ingresadas conforme a la matriz de juicio consensuada, y se verificó la consistencia del modelo mediante el índice de razón de consistencia (CR), el cual fue menor a 0.1, validando así la coherencia de los juicios expertos.

Los resultados del modelo AHP, expresados como pesos normalizados, se muestran a continuación:

Tabla 7. Priorización de FCE

FCE	Descripción	Peso (%)
FCE1	Compromiso y apoyo de la alta dirección	57.80%
FCE3	Capacitación y competencias del personal	24.08%
FCE4	Visión y estrategia institucional clara	6.58%
FCE6	Gobernanza y gestión de proyectos	5.95%
FCE2	Calidad e interoperabilidad de los datos	5.60%

Fuente: Elaboración propia

El análisis evidencia que el **compromiso y apoyo de la alta dirección (FCE1)** es el factor con mayor peso relativo, representando más de la mitad de la importancia total dentro del modelo (57.8%). Este resultado ratifica el papel fundamental del liderazgo institucional en la viabilidad y sostenibilidad de iniciativas SIG en entornos organizacionales complejos.

En segundo lugar, se posiciona la **capacitación y competencias del personal (FCE3)** con un peso de 24.08%, reflejando la necesidad crítica de fortalecer las capacidades humanas en análisis geoespacial y uso de herramientas SIG. Los demás factores —aunque con pesos menores— no deben ser desestimados, ya que su adecuada gestión contribuye de forma complementaria a la madurez organizacional requerida para implementar con éxito un SIG.

Estos resultados servirán como insumo para la definición de **planes de acción estratégicos**, establecimiento de **indicadores DOMPI** y el diseño de **políticas de protección y gobernanza geoespacial**, alineadas con las prioridades institucionales.

5.5 Identificación de brechas clave

A partir de los resultados del modelo AHP, se procedió a contrastarlos con la situación institucional actual para identificar las principales brechas que podrían comprometer una implementación efectiva del SIG en la entidad objeto de estudio. Estas

brechas no solo reflejan deficiencias estructurales, sino también desafíos en cultura organizacional, gobernanza de datos y alineación estratégica.

En primer lugar, se detecta una brecha significativa en la alineación entre el soporte de la alta dirección y la ejecución operativa. Aunque el compromiso y apoyo de la alta dirección (FCE1) fue jerarquizado como el FCE de mayor peso relativo (57.80%), su aplicación práctica se ve limitada por la ausencia de una política institucional clara que defina roles, responsabilidades y recursos asignados al SIG. Esta falta de institucionalización debilita la sostenibilidad del sistema y genera dependencia de liderazgos individuales más que de estructuras organizativas formales.

En segundo lugar, se identificó una carencia de competencias técnicas especializadas en el uso y desarrollo de SIG dentro del equipo operativo. A pesar de que la capacitación y competencias del personal (FCE3) obtuvo una ponderación destacada (24.08%), la evidencia empírica mostró un bajo nivel de formación técnica en análisis geoespacial avanzado, lo cual limita el aprovechamiento de las herramientas del sistema para la toma de decisiones estratégicas y operativas.

Una tercera brecha relevante es la ausencia de procesos robustos de interoperabilidad y estandarización de datos geoespaciales. Esto se traduce en duplicidad de información, escasa integración entre áreas y dificultades para mantener actualizados los repositorios de datos. La falta de un modelo de gobernanza de datos alineado con estándares internacionales, como los propuestos por la SDSFIE (Spatial Data Standards for Facilities, Infrastructure, and Environment), impide consolidar un entorno confiable para la analítica espacial.

Asimismo, se evidencia una limitada cultura organizacional orientada al uso de información geográfica como insumo estratégico. La baja percepción del SIG como herramienta transversal para la mejora institucional reduce su utilización a funciones cartográficas básicas, desaprovechando su potencial para generar inteligencia operativa, identificar riesgos y priorizar inversiones.

Estas brechas deben ser consideradas no solo como deficiencias técnicas o estructurales, sino como indicadores críticos para el rediseño del modelo de implementación del SIG. Superarlas requerirá un enfoque integral que combine liderazgo institucional, fortalecimiento de capacidades, políticas de datos abiertos e interoperabilidad, así como una visión estratégica institucional que consolide al SIG como pilar de una gobernanza basada en evidencia y orientada a resultados.

5.6 Diseño conceptual del modelo GeoIA

El modelo conceptual GeoIA (Geospatial Artificial Intelligence) integra capacidades de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con algoritmos de Inteligencia Artificial (IA) orientados a la toma de decisiones en tiempo real. Su diseño responde a la necesidad de procesar grandes volúmenes de datos geoespaciales, identificar patrones ocultos y anticipar comportamientos territoriales en escenarios de seguridad y defensa (Ali, 2020; ESRI, 2023).

En el contexto de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC), este modelo implica la incorporación de capacidades inteligentes que fortalecen la soberanía, anticipan amenazas y mejoran la toma de decisiones estratégicas. El diseño propuesto contempla cinco módulos funcionales, cada uno de los cuales habilita oportunidades tecnológicas y capacidades distintivas orientadas a maximizar la eficiencia operativa en escenarios complejos y cambiantes.

1. Módulo de adquisición y normalización de datos geoespaciales

Incluye la captura y estandarización de datos desde sensores IoT, imágenes satelitales, drones, sistemas SCADA y bases institucionales. La calidad, veracidad y normalización de estos datos, bajo estándares como ISO 19115 e INSPIRE, son esenciales para garantizar la interoperabilidad y evitar sesgos predictivos (Ali, 2020; Sinha & Srivastava, 2022; Zambrano Solís, 2023).

2. Módulo de procesamiento inteligente y análisis predictivo

Emplea algoritmos de aprendizaje automático supervisado y no supervisado que permiten identificar correlaciones espacio-temporales, como zonas de riesgo, movilidad poblacional o vulnerabilidades estructurales. Este enfoque predictivo favorece una postura proactiva en defensa y seguridad (Fang et al., 2021; Mat Yatim et al., 2023).

3. Módulo de integración operativa

Conecta la GeoIA con sistemas C2, logística, ciberdefensa y vigilancia aérea, garantizando flujos de información seguros y en tiempo real mediante APIs interoperables. Esta integración rompe silos institucionales y promueve operaciones conjuntas ágiles (United States Air Force Civil Engineer Center, 2018; ESRI, 2020).

4. Módulo de visualización avanzada y dashboards geointeligentes

Utiliza interfaces dinámicas y mapas interactivos que permiten la interpretación multiescalar de resultados, la vigilancia territorial en tiempo real y el monitoreo continuo de activos críticos. Se incorporan capacidades de visualización 3D y realidad aumentada para operaciones complejas (Adnan et al., 2022; ESRI, 2023).

5. Módulo de retroalimentación y aprendizaje continuo

Este componente autoevaluativo recopila resultados de misiones y retroalimentación de usuarios para optimizar continuamente el modelo mediante machine learning, adaptándose a nuevas amenazas y garantizando la resiliencia institucional (Sharma et al., 2021; Zambrano Solís, 2023).

5.7 Capacidades distintivas habilitadas por la GeoIA

La articulación SIG–GeoIA permite a las Fuerzas Militares potenciar:

1. Anticipación operativa, al prever eventos críticos antes de su ocurrencia mediante análisis predictivo (Mat Yatim et al., 2023).

2. Autonomía analítica, reduciendo la carga cognitiva del personal y acelerando las decisiones (Eldrandaly et al., 2015).
3. Interoperabilidad dinámica, promoviendo sinergias interinstitucionales y multinacionales (ESRI, 2020).
4. Escalabilidad estratégica, permitiendo replicar el modelo en dominios como ciberdefensa o inteligencia territorial.
5. Sostenibilidad tecnológica, al incorporar mecanismos de autoaprendizaje adaptativos.

Imagen 2. Representación gráfica GeoIA



Fuente: Elaboración propia con apoyo de OpenAI. (2025). ChatGPT-4.0

Este modelo conceptual representa no solo una innovación técnica sino también una transformación organizacional, alineada con el planeamiento por capacidades y los desafíos geoestratégicos del siglo XXI.

6. Resultados

6.1 Resultados cuantitativos

El análisis AHP permitió jerarquizar los Factores Críticos de Éxito (FCE) para la implementación del SIG-DIFRA. Los resultados mostraron que el compromiso y apoyo de la alta dirección obtuvo el mayor peso relativo (57.80%), seguido por la capacitación y

competencias del personal (24.08%). Otros factores, como la visión institucional clara (6.58%), la gobernanza de proyectos (5.95%) y la calidad e interoperabilidad de los datos (5.60%), también fueron identificados como relevantes, aunque con menor peso. Todos los valores de consistencia ($CR \leq 0.1$) fueron validados estadísticamente según los criterios de Saaty (1980).

6.2 Resultados cualitativos

Las rondas Delphi evidenciaron un alto nivel de consenso entre los expertos, con coeficientes de concordancia Kendall $W \geq 0.70$. Se validaron ocho FCE con niveles de contenido (CVI) superiores a 0.85. La fase cualitativa también identificó barreras institucionales como la falta de políticas de interoperabilidad, carencias en competencias técnicas del personal y débil integración entre sistemas de información geoespacial.

6.3 Integración AHP–DOMPI

Al integrar los resultados del AHP con el diagnóstico DOMPI, se identificaron brechas institucionales principalmente en las dimensiones de doctrina (ausencia de lineamientos formales), personal (déficit en formación técnica) e infraestructura tecnológica (limitaciones en hardware/software). La dimensión de organización mostró potencial de mejora con ajustes en gobernanza interdepartamental y procesos de coordinación operativa.

6.4 Implicaciones estratégicas para la FAC

Uno de los principales retos es consolidar una estructura organizativa clara y funcional para la gestión del SIG, con reglas, roles y procesos bien definidos. Esto implica mejorar la articulación entre áreas, asegurar la interoperabilidad entre plataformas, optimizar la gestión de datos y garantizar que el SIG esté alineado con los objetivos misionales de la FAC.

La incorporación de la GeoIA marca un punto de inflexión. Su potencial para anticipar riesgos, optimizar operaciones y proteger infraestructura crítica convierte al SIG-DIFRA en un activo estratégico.

En definitiva, el estudio invita a la FAC a evolucionar hacia una gestión basada en inteligencia geoespacial, con visión de futuro, sostenibilidad y enfoque operacional.

7. Discusión

7.1 Comparación con estudios internacionales

El estudio de Eldrandaly et al. (2015) en Egipto posicionó el compromiso de la alta dirección como FCE principal, lo que coincide con el presente estudio. También se identifica coincidencia en la capacitación técnica. En contraste, estudios como los de Mat Yatim et al. (2020) y Aini et al. (2024) priorizan la interoperabilidad y la gestión del cambio, factores que obtuvieron menor ponderación en el contexto militar colombiano. Estas diferencias pueden explicarse por la estructura jerárquica y los niveles de confidencialidad operacional presentes en instituciones castrenses.

7.2 Factores comunes y diferenciales en entornos militares

Factores comunes como el liderazgo institucional y la calidad de los datos son compartidos entre entornos civiles y militares. Sin embargo, en defensa adquieren un carácter estratégico por su relación directa con operaciones críticas. El entorno militar exige mayor seguridad, disponibilidad y adaptabilidad frente a amenazas híbridas.

7.3 Rol transformador de GeoIA

La GeoIA permite transformar estructuralmente el ecosistema de defensa mediante:

- **Transformación doctrinal:** Planificación basada en datos (Ministerio de Defensa Nacional, 2019).
- **Procesos operativos optimizados:** Análisis predictivo y reducción de tiempos (Fang et al., 2021).
- **Empoderamiento humano:** IA explicable y visualizaciones avanzadas (Zambrano Solís, 2023).
- **Cultura institucional de innovación:** Sinergia interagencial y resiliencia digital (RAND, 2024).
- **Soberanía tecnológica:** Desarrollo local de soluciones geoespaciales (Ali, 2020).

Tabla 8. Modelo conceptual GeoIA

Dimensión Estratégica	Rol de la GeoIA	Capacidades Habilidades
Doctrinal	Planificación basada en inteligencia geoespacial	Anticipación operativa
Operacional	Automatización del análisis territorial	Eficiencia táctica
Humana	Apoyo a la decisión con IA explicable	Empoderamiento cognitivo
Organizacional	Promoción de cultura de innovación	Sinergia interinstitucional
Tecnológica/Soberanía	Desarrollo nacional de soluciones	Independencia tecnológica

Fuente: Elaboración propia

8. Conclusiones

8.1 Síntesis de hallazgos

Este estudio permitió identificar y jerarquizar los Factores Críticos de Éxito (FCE) que condicionan la implementación efectiva de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en instituciones del sector defensa, aplicando el método Analytic Hierarchy Process (AHP) como herramienta de priorización estructurada.

Los resultados evidenciaron que el compromiso y apoyo de la alta dirección (57.80%) y la capacitación y competencias del personal (24.08%) son los factores con mayor peso relativo, confirmando su carácter estructural en la sostenibilidad de iniciativas SIG. En menor proporción, aunque también relevantes, se posicionaron la visión institucional clara (6.58%), la gobernanza de proyectos (5.95%) y la calidad e interoperabilidad de los datos (5.60%).

El análisis de brechas identificó disonancias significativas entre estos factores críticos y la situación real de la entidad estudiada, particularmente en aspectos como la falta de políticas institucionales robustas, la debilidad de las competencias técnicas internas y la limitada interoperabilidad de los sistemas de información geoespacial.

La comparación con estudios internacionales reafirmó la validez de los FCE jerarquizados, pero también reveló vacíos en la gestión del cambio, la integración interinstitucional y la cultura organizacional orientada a la analítica geoespacial.

Finalmente, se propuso un modelo conceptual basado en GeoInteligencia Artificial (GeoIA) que permite articular tecnologías SIG con capacidades predictivas avanzadas, orientadas a escenarios de defensa, anticipación operativa y protección de infraestructura crítica.

8.2 Aportes y aplicaciones estratégicas para la gestión de infraestructura crítica

Desde una perspectiva estratégica, los hallazgos del estudio ofrecen un marco técnico y metodológico útil para optimizar la gestión de infraestructura crítica en el sector defensa, a través de un enfoque geoespacial basado en evidencia.

Las siguientes acciones concretas y aplicaciones prácticas derivadas del estudio se recomiendan para su implementación institucional:

- Establecer un programa piloto de SIG–GeoIA en bases aéreas clave de la FAC, enfocado en la protección, monitoreo y mantenimiento predictivo de infraestructura crítica aeronáutica.
- Emitir una directiva institucional que eleve el SIG a una herramienta estratégica transversal, articulada con el planeamiento por capacidades.
- Desarrollar un programa de formación y certificación en SIG y GeoIA para personal técnico y de mando, priorizando el análisis geoespacial aplicado a infraestructura crítica aeronáutica.
- Consolidar una unidad SIG–GeoIA en el nivel estratégico de la FAC, con funciones de integración, interoperabilidad y soporte técnico para todas las unidades.
- Incorporar los indicadores clave de desempeño (KPIs) identificados en este estudio como parte del sistema de monitoreo institucional de capacidades.

Estas líneas de acción permitirán consolidar el SIG–DIFRA como una capacidad institucional avanzada, mejorar la respuesta operativa ante amenazas híbridas, y fortalecer la autonomía tecnológica en la defensa del espacio aéreo colombiano.

9. Recomendaciones

9.1 Recomendaciones prácticas para la FAC

- Formalizar el respaldo institucional del alto mando.
- Diseñar programas de capacitación continua.
- Promover interoperabilidad entre sistemas.
- Pilotar sistemas GeoIA en bases aéreas estratégicas.

9.2 Propuesta de KPIs

Tabla 9. Propuesta KPIs

KPI	Descripción	Meta inicial
% de unidades con SIG operativo	Despliegue funcional del SIG en unidades FAC	80% en 2 años
% de personal capacitado en SIG	Usuarios con formación certificada en análisis geoespacial	60% en 3 años
% de interoperabilidad entre sistemas	Integración entre SIG y plataformas C2/ISR	75% en 2 años
Índice de respaldo del alto mando	Medición del apoyo institucional a través de recursos y directrices	$\geq 70\%$ de $\geq 70\%$ de cumplimiento
Número de incidentes críticos georreferenciados	Eventos registrados y analizados espacialmente	Línea base en 1 año

Fuente: Elaboración propia

9.3 Futuros pasos institucionales y académicos

A nivel institucional, la FAC debe avanzar hacia un modelo de gestión basada en inteligencia geoespacial, que articule el SIG con la doctrina de bases inteligentes y la protección de infraestructura crítica. Se recomienda:

- Establecer una unidad SIG centralizada con capacidades analíticas avanzadas.
- Crear una doctrina técnica en SIG para la defensa aérea, vinculada al Plan Estratégico Institucional (PEI).
- Incluir el SIG como eje transversal en procesos de planeación por capacidades, gestión del riesgo y operación aérea.

A nivel académico, se sugiere:

- Fomentar alianzas con universidades y centros de investigación para el desarrollo de modelos predictivos y prospectivos basados en SIG-DIFRA.
- Impulsar estudios de caso y tesis en el ámbito de geointeligencia, SIG militar y protección de activos estratégicos.
- Promover la publicación de resultados en revistas indexadas (Scopus, WoS), fortaleciendo la masa crítica de conocimiento nacional en este campo.

10. Referencias

- Adnan, M., Ghazali, M., & Othman, N. Z. S. (2022). E-participation within the context of e-government initiatives: A comprehensive systematic review. *Telematics and Informatics Reports*, 8, 100015. <https://doi.org/10.1016/j.teler.2022.100015>
- Aini, N., Abdullah, N., & Yusof, N. (2024). Priority challenges and critical success factors for GIS implementation in public sector organisations. *Journal of Information and Communication Technology*, 23(1), 123–146. <https://doi.org/10.32890/jict2024.23.1.5>
- Ali, E. (2020). *Geographic Information System (GIS): Definition, Development, Applications & Components*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/340182760>
- Eldrandaly, K. (2022). Evaluation of GIS implementation: Lessons learned and future prospects. *International Journal of Geographical Information Science*, 36(4), 789–805. <https://doi.org/10.1080/13658816.2021.1965002>
- Eldrandaly, K., Eldin, N., & AbdelAziz, M. (2015). Evaluation of critical success factors for GIS implementation using analytic hierarchy process. *International Journal of Computer Applications*, 120(10), 1–8. <https://doi.org/10.5120/21271-4040>
- El-Kenawy, A. M., Ibrahim, A., Ghoneim, A., & Hassanien, A. E. (2023). Geospatial artificial intelligence for defense and security applications: A review. *Applied Artificial Intelligence*, 37(1), 1–25. <https://doi.org/10.1080/08839514.2022.2156789>
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2020). *GIS for homeland security* (2nd ed.). ESRI Press.

- ESRI. (2023). Location intelligence: Insights that transform decision-making. ESRI White Paper. <https://www.esri.com/en-us/location-intelligence>
- Fang, J., Peng, X., & Wang, M. (2021). Application of GIS and artificial intelligence in military operations: Prospects and challenges. *Journal of Geospatial Intelligence*, 4(2), 45–60.
- Fuerza Aeroespacial Colombiana. (2019). Acuerdo de Licenciamiento ELA FAC–ESRI. Bogotá D.C.: Dirección de Infraestructura.
- Fuerza Aeroespacial Colombiana. (2020). Actualización del Acuerdo de Licenciamiento ELA FAC–ESRI. Bogotá D.C.: Jefatura de TIC.
- Fuerza Aeroespacial Colombiana. (2022). Informe de avance del Proyecto SIG–DIFRA. Bogotá D.C.: Dirección de Infraestructura.
- Fuerza Aeroespacial Colombiana. (2023). Plan Estratégico de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (PETIC) 2023–2026. Bogotá D.C.: Jefatura de TIC.
- Hasson, F., Keeney, S., & McKenna, H. (2000). Research guidelines for the Delphi survey technique. *Journal of Advanced Nursing*, 32(4), 1008–1015. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2648.2000.t01-1-01567.x>
- Hsu, C. C., & Sandford, B. A. (2007). The Delphi technique: Making sense of consensus. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 12(10), 1–8. <https://doi.org/10.7275/pdz9-th90>
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information systems and science* (4th ed.). Wiley.
- Mat Yatim, S., Ahmad, S., & Hussin, H. (2023). The key success factors of Geographic Information System re-implementation in Tenaga Nasional Berhad. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 101(9), 2450–2464. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7931245>
- Ministerio de Defensa Nacional. (2019). Guía metodológica de planeamiento por capacidades: Tomo 2. Bogotá D.C.: Ministerio de Defensa Nacional.

Okoli, C., & Pawlowski, S. D. (2004). The Delphi method as a research tool: An example, design considerations and applications. *Information & Management*, 42(1), 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.im.2003.11.002>

OpenAI. (2025). ChatGPT [Large language model]. <https://chat.openai.com/>

RAND Corporation. (2024). Improving Sense-Making with Artificial Intelligence. RAND Research Report RRA3152-1. https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA3152-1.html

Red de Universidades Colombianas. (2023). Revolución de la inteligencia artificial en los SIG. Editorial Red de Universidades.

Rezvani, M., Silva, J., & Almeida, L. (2024). Mapping Geospatial AI Flood Risk in National Road Networks. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(2), 87. <https://doi.org/10.3390/ijgi13020087>

Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill.

Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process* (2nd ed.). Springer.

Sharma, S., Singh, G., & Aggarwal, R. (2021). Smart governance and digital transformation in public services. *Government Information Quarterly*, 38(3), 101587. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2021.101587>

Sinha, R., & Srivastava, R. (2022). Geographic Information System: Definition, development, applications and components. *International Journal of Remote Sensing and GIS*, 11(3), 56–72. <https://doi.org/10.37591/ijrs.2022.11.3.7890>

Skulmoski, G. J., Hartman, F. T., & Krahn, J. (2007). The Delphi method for graduate research. *Journal of Information Technology Education: Research*, 6, 1–21. <https://doi.org/10.28945/199>

United States Air Force Civil Engineer Center (AFCEC). (2018). Investigation of Geobase implementation issues: Case study of infrastructure in the USAF. AFCEC Technical Report.

Vargas, L. G. (2010). An overview of the analytic hierarchy process and its applications. *European Journal of Operational Research*, 202(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.023>

Zambrano Solís, J. (2023). GeoInteligencia Artificial: Integración de IA en sistemas de información geográfica para defensa y seguridad. *Revista Colombiana de Geografía*, 32(2), 150–168. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v32n2.103456>