

Análisis de partes interesadas para la misión satelital FACSAT-3

Analysis of acceptable parts for the FACSAT-3 satellite mission

Juan Manuel Cárdenas-García ^{1a}, Germán Darío Sáenz-Hernández ^{1b}, David Andrés Díaz-Álvarez ², Karen Nicole Pirazan-Villanueva ^{1c}, Sergio Fernando Barrera-Molano ^{1d}

¹ Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales (CITAE), Fuerza Aeroespacial Colombiana, Colombia. Orcid: 0000-0002-2917-0885 ^a, 0009-0008-2451-7107 ^b, 0000-0002-6382-0773 ^c, 0000-0003-1140-7634 ^d. Correos electrónicos: juanm.cardenas@fac.mil.co ^a, german.saenzh@fac.mil.co ^b, karen.villanueva@epfac.edu.co ^c, sergio.barrera@fac.mil.co ^d

² Grupo de investigación ASTRA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. Orcid: 0000-0002-3487-6735. Correo electrónico: david.diaza@udea.edu.co

Recibido: 12 diciembre, 2023. Aceptado: 4 abril, 2024. Versión final: 30 agosto, 2024.

Resumen

Colombia se adentró en la era espacial con el programa FACSAT de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, que busca posicionar satélites en la órbita terrestre baja. Tras los exitosos lanzamientos de FACSAT-1 y FACSAT-2, la atención se enfoca en el diseño de misión de FACSAT-3, una constelación de tres satélites destinada a la observación terrestre, con la posibilidad de incorporar una carga secundaria con otras aplicaciones. La definición del objetivo de la misión es un paso crucial en este proceso. La literatura especializada recomienda el análisis de las partes interesadas involucradas en el proyecto como un método fundamental para establecer los requisitos de cualquier misión espacial. En el caso de FACSAT-3, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de las necesidades de las partes interesadas, a través de encuestas y reuniones con numerosos participantes a nivel nacional. Una vez identificadas estas necesidades, se procedió a la formulación de los requisitos, asegurando que la constelación satelital pueda satisfacerlas. Con los requisitos operacionales y funcionales definidos, la constelación está lista para avanzar hacia la etapa de diseño. Este artículo presenta la metodología implementada para la determinación de estos requisitos preliminares esenciales en el contexto de la misión FACSAT-3.

Palabras clave: FACSAT-3; requisitos; constelación satelital; nanosatélite; partes interesadas; misión espacial; observación terrestre; sensores remotos; gestión de misión; ingeniería de sistemas.

Abstract

Colombia has embarked on its journey into the space era through the FACSAT program, led by the Colombian Aerospace Force, aiming to deploy satellites in low Earth orbit. Following the successful launches of FACSAT-1 and FACSAT-2, the focus has shifted towards the mission design of FACSAT-3, a constellation consisting of three satellites intended for terrestrial observation, with the possibility of incorporating secondary payloads for various applications. Defining the mission's objective stands as a pivotal step in this process. Specialized literature recommends the analysis of project stakeholders as a fundamental method for establishing the requirements of any space mission. In the case of FACSAT-3, an exhaustive analysis of the needs of these stakeholders was performed through surveys and meetings with numerous participants at the national level. Once these needs were identified, the formulation of the

requirements, ensuring that the satellite constellation could fulfill them. With operational and functional requirements in place, the constellation is ready to advance to the design phase. This article presents the methodology implemented these essential preliminary requirements identification within the context of the FACSAT-3 mission.

Keywords: FACSAT-3; requirements; satellite constellation; nanosatellite; stakeholders; space mission; Earth observation; remote sensing; mission management; engineering systems.

1. Introducción

En la actualidad, el mundo se encuentra inmerso en una nueva era espacial impulsada por avances significativos en la miniaturización de la electrónica. Este progreso ha democratizado el acceso al espacio, permitiendo a países en desarrollo participar activamente mediante la implementación de nanosatélites o CubeSats. En este contexto, las instituciones académicas han desempeñado un papel fundamental al impulsar el desarrollo de misiones satelitales de bajo costo, lo que ha contribuido significativamente al avance científico y tecnológico. En consecuencia, esta iniciativa se presenta como una propuesta viable para fomentar el crecimiento del sector espacial en el contexto colombiano [1].

Los nanosatélites o CubeSats son satélites de dimensiones estándar que no superan los 20 kg. Su nomenclatura se basa en el número de unidades que componen su estructura, donde una unidad equivale a un cubo de 10x10x10 cm. Esta convención de tamaño se ha convertido en un estándar global para la clasificación de satélites. En la observación terrestre en órbitas bajas (LEO) de aproximadamente 400 a 2000 km, prevalece la implementación de satélites de tres a seis unidades [2].

El desarrollo de nanosatélites se caracteriza por requerir recursos relativamente bajos y tiempos de construcción más cortos en comparación con los satélites de mayor tamaño. Este fenómeno ha resultado en un incremento notable en el número de lanzamientos, respaldado por la aparición de nuevas empresas privadas como SpaceX y RocketLab, que han desarrollado cohetes de bajo costo para facilitar el acceso al espacio por medio de misiones dedicadas o de carga compartida [3]. En esta era de auge en el lanzamiento de nanosatélites, es imperativo que Colombia participe activamente en esta nueva frontera espacial. En este sentido, la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) ha establecido la meta de aumentar el número de plataformas espaciales del país. Hasta la fecha, se han lanzado con éxito dos (2) nanosatélites: el FACSAT-1, de tres (3) unidades, y el FACSAT-2 "CHIRIBIQUETE", de seis (6) unidades, los cuales han mejorado significativamente las capacidades de observación del territorio colombiano y el análisis de gases de efecto invernadero [4].

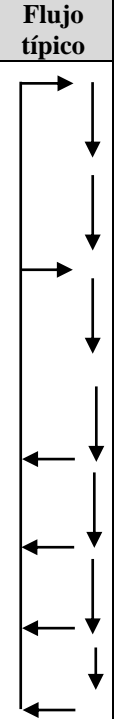
El Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Aeroespaciales (CITAE) de la FAC impulsa, desarrolla y aplica la investigación espacial en áreas como la inteligencia artificial, coherencia y plataformas espaciales. En el marco de la "Estrategia para el desarrollo aéreo y espacial de la Fuerza Aeroespacial Colombiana 2042", el CITAE lidera el diseño de la misión FACSAT-3, la cual establece un concepto inicial de una constelación compuesta por tres (3) nanosatélites, con una capacidad de hasta doce (12) unidades. Aunque la observación terrestre continúa siendo el enfoque primordial de esta constelación, expandiendo los resultados de las misiones previas FACSAT, se busca explorar conceptos de misión innovadores que permitan la inclusión de sensores para diferentes aplicaciones de nivel militar.

Dentro del contexto de las plataformas espaciales, como los satélites, es esencial definir con precisión su propósito, ciclo de vida útil y todos los aspectos técnicos de la misión. El libro "Space Mission Analysis and Design SMAD" de Larson se destaca como una referencia fundamental, ya que proporciona una guía exhaustiva para el diseño de misiones espaciales a través de diferentes fases, como se evidencian en la Tabla 1 [5]. El proceso comienza con la definición de los objetivos de la misión, a partir de los cuales se caracteriza la misión teniendo en cuenta todos los aspectos técnicos relevantes, estos incluyen el diagnóstico de las tecnologías disponibles, el estatuto de la misión y el alcance científico, tecnológico y operativo de la misión. Una vez que la misión está caracterizada, es posible evaluarla de manera integral estableciendo los requisitos tanto del sistema en su conjunto como de sus subsistemas, como se observa en la Tabla 1, estas últimas fases se convierten en iterativas debido a que el concepto de misión y la arquitectura de los sistemas se refinan en cada evaluación [5]. Por lo tanto, el trabajo se puede retomar en cualquier punto del flujo.

"The New SMAD" ofrece una sección específica sobre el diseño de nanosatélites proporcionando detalles más específicos sobre los desafíos y consideraciones únicas asociados con este tipo de misiones espaciales [6]. Además, es importante mencionar que la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) de Estados Unidos cuenta con su propia metodología para el análisis y diseño de misiones espaciales, estos pasos son parte de un proceso llamado "Ciclo de vida de desarrollo

de sistemas". Es importante destacar que la NASA adapta esta metodología a las necesidades específicas de cada misión y que se enfoca en la gestión de riesgos, la seguridad y la calidad en todas las etapas del ciclo de vida de desarrollo de sistemas. De manera similar, la Agencia Espacial Europea (ESA) ha desarrollado estándares recomendados para proyectos espaciales conocidos como "European Cooperation for Space Standardization", los cuales se aplican en Europa como guía para el diseño de misiones espaciales [7].

Tabla 1. Flujo de trabajo en el diseño de una misión espacial

Flujo típico	Fases	Pasos
	Definir objetivos	1. Definir objetivos generales y limitaciones
		2. Estimar necesidades y requisitos de la misión
	Caracterizar la misión	3. Definir conceptos alternativos de misión
		4. Definir arquitecturas alternativas de misión
		5. Identificar los lineamientos de cada concepto
		6. Caracterizar los conceptos de misión y arquitectura
	Evaluar la misión	7. Identificar requisitos críticos
		8. Evaluar la utilidad de la misión
		9. Definir el concepto de misión
	Definir requisitos	10. Definir requisitos del sistema
		11. Ubicar requisitos a elementos del sistema

Fuente: Adaptado del New SMAD [5].

Siguiendo con el enfoque tradicional en el diseño de misiones, es imperativo comprender con precisión las necesidades y requisitos de las partes interesadas o "stakeholders" para definir sus objetivos y evaluar su impacto directo, ya sea positivo o negativo, en el desarrollo del proyecto. Por lo tanto, el establecimiento de los requisitos técnicos de la misión requiere la implementación de un análisis exhaustivo de todos los involucrados en el proyecto.

Los "stakeholders", término que se refiere a los individuos e instituciones que se ven afectados de diversas maneras por las acciones de una empresa o

institución, ya sea de manera directa o indirecta, desempeñan un papel significativo en la consecución de los objetivos de dicha empresa o institución [8]. Las partes interesadas involucradas en el proyecto pueden ser los "Beneficiarios" comprenden tanto individuos como organizaciones que directa o indirectamente experimentarán los beneficios derivados de las intervenciones planificadas a través del proyecto. Por otra parte, los "Cooperantes" se refieren a todas aquellas personas o entidades que tienen la capacidad de colaborar y contribuir con recursos diversos, ya sea con recursos económicos o materiales, para respaldar la implementación de las intervenciones del proyecto. En contraparte también se encuentran los "Oponentes" que engloban a individuos, grupos de personas u organizaciones que, debido a su desacuerdo o insatisfacción con las posibles acciones previstas en el proyecto, podrían actuar como obstáculos para el logro de los objetivos establecidos. Por último, los "Perjudicados" son aquellas personas, grupos o entidades que podrían experimentar una disminución en su calidad de vida o bienestar como resultado directo de la ejecución del proyecto [9].

Como experiencia previa la FAC desarrolló un análisis para la identificación de los "stakeholders" en el contexto de la misión FACSAT-2. Dadas las limitaciones de recursos y espacio dentro del satélite de seis (6) unidades, se priorizó la inclusión de una carga de observación terrestre con el propósito de satisfacer las necesidades de la FAC en áreas relacionadas con la defensa y la observación del territorio [10].

Sin embargo, a medida que la misión FACSAT-2 avanzaba en la fase de diseño preliminar [11] de la misión, Ecopetrol manifestó su interés en la incorporación de una carga ambiental que respaldara su iniciativa "2040-Energía que transforma". Dentro de los objetivos de esta estrategia se encuentra la "Generación de valor con sostenibilidad", lo que incluye el control y la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) en sus operaciones. Este nuevo requisito impulsó la necesidad de implementar una carga secundaria en el satélite con la capacidad de medir la concentración de los gases de efecto invernadero. Como resultado, se produjo un cambio en los requisitos de la misión en una etapa avanzada de diseño, lo que llevó a una reubicación de los componentes electrónicos del satélite. Este cambio, aunque significativo, resultó necesario para alinear los objetivos de la misión con las expectativas de Ecopetrol. No obstante, dicha modificación también implicó la necesidad de ajustar las interfaces entre los diversos componentes del satélite. En el contexto de una misión espacial, tales modificaciones conllevan retrasos en la ejecución del proyecto.

Esta experiencia resalta la importancia crítica de establecer los requisitos y las partes interesadas en las etapas iniciales del proceso de diseño de una misión espacial. Además, subraya cómo los "stakeholders" pueden convertirse en valiosos aliados al aportar recursos y apoyo al proyecto. Establecer una colaboración temprana y efectiva con estas partes interesadas clave puede no solo facilitar y agilizar la implementación de cambios necesarios, como en el caso de Ecopetrol, sino también contribuir al éxito general de la misión.

La determinación de los requisitos generales en misiones espaciales se lleva a cabo a través de diversas metodologías. En el pasado, estos requisitos se han delineado principalmente a partir de los objetivos de la misión. Sin embargo, en enfoques más contemporáneos, se reconoce la importancia de considerar las necesidades de las partes interesadas como un elemento fundamental en este proceso. Para lograrlo, se requiere realizar un análisis exhaustivo de estas necesidades, lo que se convierte en un paso esencial en la definición de los requisitos de la misión. Una vez completado este análisis, se procede a realizar un estudio operacional y funcional de las necesidades identificadas, lo que a su vez conduce a la formulación precisa de los requisitos que guiarán el desarrollo y la ejecución de la misión [12], [13].

En la **Figura 1** se muestran las etapas e insumos para la definición de los requisitos planteadas para este artículo.

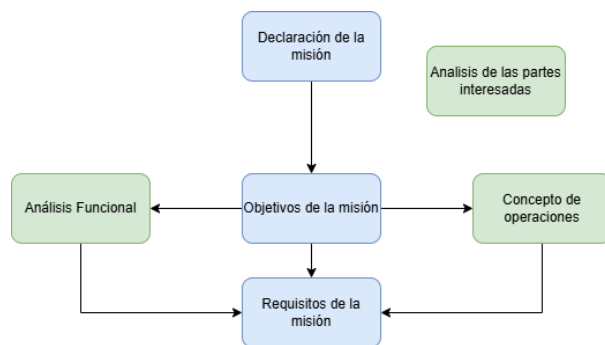


Figura 1. Metodología general para establecer requisitos. Fuente: adaptado de [12].

En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo principal proporcionar un enfoque más exhaustivo en el análisis de las posibles partes interesadas en la misión FACSAT-3. A diferencia de análisis previos, que se han enfocado en un número limitado de partes interesadas, esta investigación propone otra perspectiva, una que englobe a todos los sectores relevantes de la sociedad, la industria, la academia y el gobierno de Colombia.

La primera sección de este artículo introduce detalladamente la metodología empleada para llevar a

cabo este análisis. Se presenta un panorama general de las partes interesadas en Colombia, identificando sus características distintivas y necesidades específicas. Además, se aborda el proceso de recopilación de datos a través de encuestas, destacando cómo se identificaron a los principales aliados entre las partes interesadas involucrados.

En la siguiente sección, se examinan en profundidad las necesidades fundamentales que estas partes interesadas desean satisfacer en el contexto de la misión FACSAT-3. Se analiza cómo estas necesidades se traducen en requisitos concretos para la planificación y ejecución de la misión, destacando la importancia de alinear los objetivos del proyecto con las expectativas y demandas de las diversas partes interesadas.

Finalmente, el artículo concluye destacando el potencial de la constelación de satélites para proporcionar herramientas y soluciones específicas que beneficien a cada una de las partes interesadas previamente presentadas. Esta perspectiva integral refleja la importancia de una colaboración efectiva entre los distintos sectores de la sociedad en la implementación de proyectos espaciales de envergadura, como la misión FACSAT-3.

2. Metodología

En el marco del desarrollo de la constelación FACSAT-3, es esencial llevar a cabo un análisis riguroso que permita identificar y comprender las necesidades de las partes interesadas en este proyecto espacial. La colaboración y el compromiso de múltiples sectores de la sociedad, la industria, la academia y el gobierno son fundamentales para el éxito de la misión FACSAT-3. Por tanto, este artículo se propone abordar de manera integral el análisis de los requisitos necesarios para satisfacer las necesidades de estas partes interesadas. En este contexto, se presentan los objetivos que guiarán la investigación y el desarrollo de este estudio, los cuales se detallan a continuación.

2.1. Objetivos

El objetivo general de la presente investigación es Identificar los requisitos necesarios para satisfacer las necesidades de las partes interesadas en la constelación FACSAT-3. Los específicos se relacionan a continuación:

- Identificar las partes interesadas en la constelación FACSAT-3.
- Establecer las necesidades de las partes interesadas.

- Establecer los requisitos técnicos de la constelación FACSAT-3.

Para llevar a cabo la investigación de manera efectiva, se siguieron una serie de pasos, como se ilustra en la **Figura 2**. Estos pasos se definieron tomando como referencia las metodologías establecidas en el "New SMAD" y "el ECSS" [6], [7]. Además, la Metodología General Ajustada [13] proporcionó pautas esenciales para abordar la identificación de las partes interesadas en el proyecto. Una recomendación clave de esta metodología es iniciar con un análisis general de las partes interesadas involucrados en el proyecto, seguido de un análisis más detallado y específico de los mismos. Este enfoque permite obtener una contextualización más completa del panorama espacial colombiano, como se explorará en las secciones subsiguientes.

En contraste con países como Brasil, que disponen de un catálogo de la industria espacial brasileña [14] y una base de datos exhaustiva que abarca a todas las partes interesadas a nivel nacional dedicados a asuntos espaciales, en el caso de Colombia, la identificación precisa de las partes interesadas involucrados en proyectos espaciales había sido limitada en el pasado. Por esta razón, en el marco del programa FACSAT, se percibió la necesidad imperante de desarrollar una base de datos completa que incluyera a todas las partes interesadas en la misión FACSAT-3. Este enfoque sienta las bases para una comprensión integral de las necesidades y expectativas. Tal como se presentan en la **Figura 2**, serán abordadas con mayor profundidad en las siguientes secciones del artículo.

2.2. Identificación de las partes interesadas

Para el proyecto FACSAT-3, se mantiene como objetivo principal la observación de la Tierra desde el espacio, en línea con los satélites del programa FACSAT. Desde este

punto de partida, se dio inicio al análisis considerando las diversas aplicaciones para las cuales las imágenes satelitales pueden ser utilizadas.

La observación terrestre, a través de imágenes satelitales, desempeña un papel multifacético y esencial en diversas áreas. En primer lugar, en el ámbito medioambiental y climático, permite monitorizar con precisión los cambios en el clima, como patrones de temperatura, humedad y precipitación, contribuyendo a comprender y prever los efectos del cambio climático. Además, se utiliza para evaluar la calidad del aire y del agua, así como para identificar transformaciones en el uso de la tierra y pérdida de hábitats, facilitando un monitoreo ambiental más efectivo [15].

En segundo lugar, la observación terrestre es una herramienta invaluable para la gestión sostenible de los recursos naturales. Permite el monitoreo constante de la salud de los bosques y cultivos, garantizando la preservación y el uso responsable de estos recursos [16].

Finalmente, esta tecnología desempeña un papel crucial en la seguridad nacional y la defensa, al permitir la identificación de posibles amenazas y la supervisión de áreas estratégicas. Además, respalda la planificación urbana y el desarrollo de infraestructura, así como la investigación científica en una amplia gama de campos [16].

La variedad de aplicaciones mencionadas previamente, que se resumieron teniendo en cuenta las necesidades prioritarias del país, está en línea con el enfoque del Plan Nacional de Desarrollo, particularmente en su segundo objetivo, que pone "El agua, la biodiversidad y las personas, en el centro del ordenamiento territorial" como uno de los principales objetivos nacionales [17].

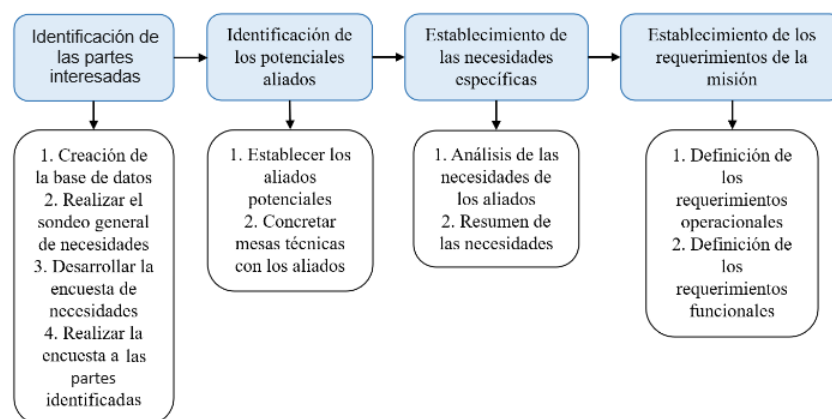


Figura 2. Etapas de la investigación. Fuente: elaboración propia.

Este enfoque resalta la importancia de la gestión de los recursos naturales en la agenda del país.

Una vez definidas estas aplicaciones, se procedió a identificar a las partes interesadas que podrían beneficiarse de ellas. Este proceso de identificación se inició con una aproximación desde una perspectiva nacional, considerando a Colombia como un actor general interesado en estas aplicaciones. Posteriormente, se profundizó en la identificación de partes interesadas específicos dentro de cada categoría de aplicación. Este enfoque de análisis holístico, que parte de una visión amplia para luego detenerse en partes interesadas específicos, proporciona una comprensión más completa de las partes interesadas en las aplicaciones de observación terrestre.

La **Figura 3** presenta el resultado del primer análisis que se llevó a cabo para identificar a las partes interesadas macro generales relacionadas con cada categoría de aplicación. Estas partes interesadas abarcan entidades gubernamentales, organizaciones civiles, entidades privadas y representantes académicos. A medida que se avanzaba en el análisis, se procedió a una especificación más detallada de estas partes interesadas, lo que finalmente condujo a la identificación de un total de 82 partes interesadas. Los criterios que se tuvieron en cuenta fueron los siguientes:

- La entidad trabaja o puede llegar a trabajar en una aplicación de la tecnología espacial.
- Existe una aplicación espacial que puede ser implementada por la entidad.
- La entidad presenta un equipo de trabajo o investigación en aplicaciones de tecnologías espaciales.

Entre las 82 partes interesadas analizadas, se destaca que la categoría con la mayor cantidad de interesados es la "Gestión de recursos naturales" con 35 instituciones (ver **Figura 4**). Esta predominancia se debe principalmente a la presencia significativa de corporaciones autónomas regionales en el país. Estas corporaciones se beneficiarían de la información generada por la constelación para impulsar sus actividades, que incluyen el monitoreo de la fauna y flora, la lucha contra la deforestación y la minería ilegal, entre otras.

Asimismo, como se puede apreciar en la **Figura 4**, la categoría que le sigue en número de partes interesadas es la "Investigación científica" con 21 referentes. Este fenómeno se explica por la considerable cantidad de instituciones de educación superior en Colombia que están involucradas en temáticas espaciales y que encuentran en la observación terrestre una herramienta valiosa para sus investigaciones.

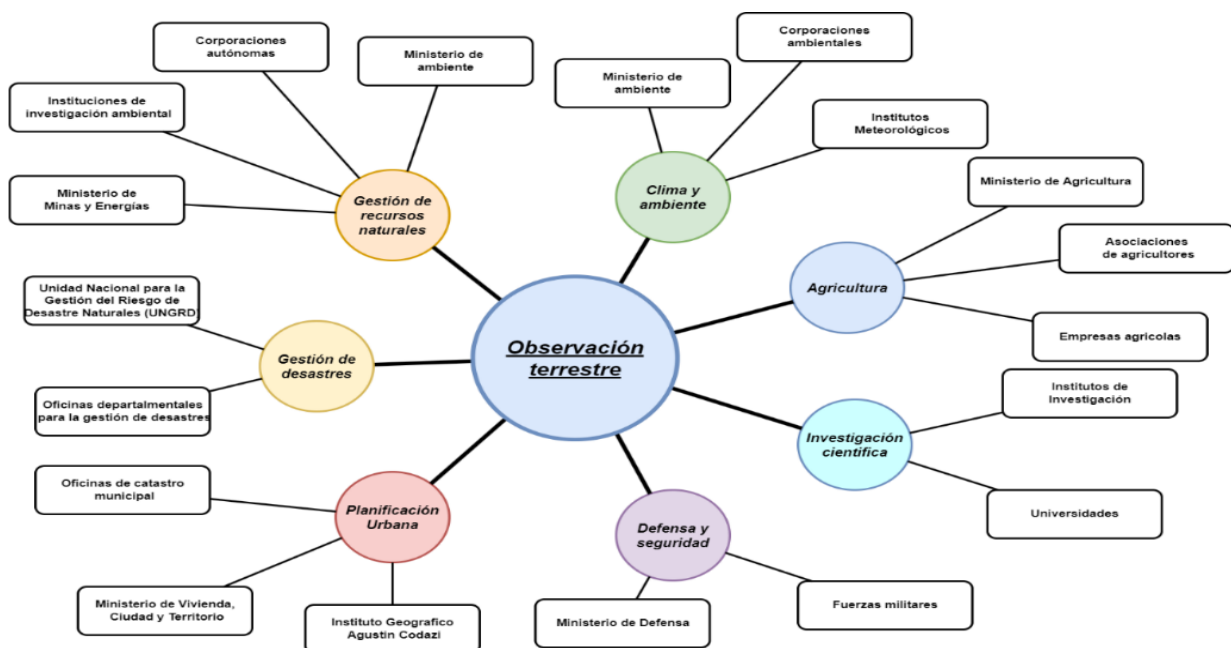


Figura 3. Análisis general de las partes interesadas interesados. Fuente: elaboración propia.

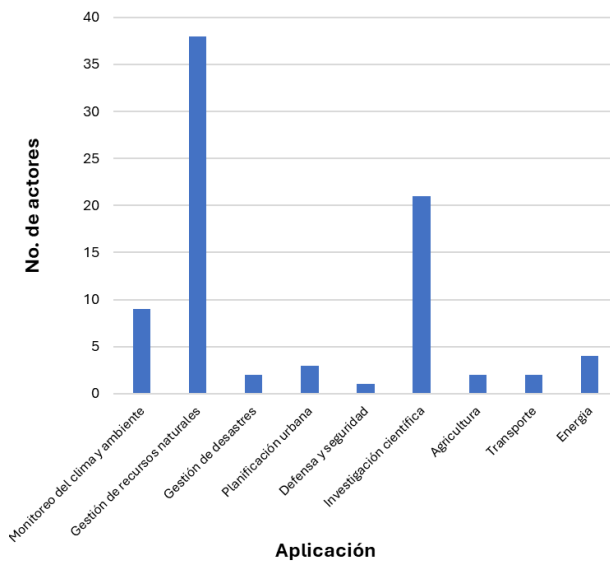


Figura 4. Número de partes interesadas por aplicación.
Fuente: elaboración propia.

La categorización de las partes interesadas se llevó a cabo considerando su naturaleza y se dividió en cuatro grupos principales: entidades privadas, entidades públicas, instituciones académicas y sociedades organizadas. Durante este proceso, se observó un significativo aumento en el número de partes interesadas involucradas en el proyecto, lo cual se debió a la inclusión de nuevos participantes, tales como clústeres de empresas, embajadas y asociaciones, entre otros. Estas nuevas partes interesadas han demostrado un marcado interés en fomentar el desarrollo espacial basado en esta misión.

En total, se identificaron 101 partes interesadas, como se ilustra en la [Figura 5](#). Esta categorización registra una gran importancia, ya que proporciona una comprensión más clara del posible impacto que estas partes interesadas pueden tener en la misión. Asimismo, estas categorías ofrecen una visión inicial sobre la distribución de las partes interesadas, lo que será fundamental para futuras interacciones y colaboraciones. Además, esta clasificación facilita la identificación de los recursos, tanto humanos como financieros, que cada uno de estas partes interesadas podría aportar al proyecto en su proceso de desarrollo.

A continuación, se llevó a cabo un análisis detallado para determinar la posición que distintas partes interesadas podrían adoptar en relación con la misión. El objetivo principal de este análisis era identificar a aquellas partes interesadas que podrían realizar contribuciones constructivas con el fin de establecer posibles alianzas

estratégicas que pudieran proporcionar recursos económicos, personal o infraestructura para la misión.

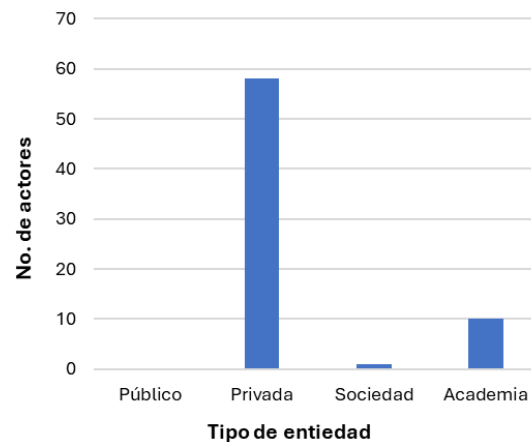


Figura 5. Número de partes interesadas por tipo de entidad. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se llevó a cabo un análisis detallado para determinar la posición que distintas partes interesadas podrían adoptar en relación con la misión. El objetivo principal de este análisis era identificar a aquellas partes interesadas que podrían realizar contribuciones constructivas. Esta evaluación se reveló como un paso esencial para establecer posibles alianzas estratégicas que pudieran proporcionar recursos económicos o infraestructura necesarios.

En este contexto, se procedió a categorizar a las partes interesadas en dos grupos principales: Beneficiarios y Cooperantes. Aquellos que manifestaron principalmente un interés en utilizar los recursos satelitales para sus propios fines, siendo considerados Beneficiarios. Mientras tanto, otros demostraron una disposición activa a colaborar con el proyecto, lo que las convirtió en partes interesadas altamente relevantes. La [Figura 6](#) que muestra el número de partes interesadas por tipo de impacto, reflejando claramente una variación entre aquellos que buscarían la explotación de la información de la información satelital (39) y su contraparte que estarían dispuestos a participar activamente y contribuir a la misión (62), esto debido a que la gestión de recursos naturales implica el uso de sensores que satisfagan los requisitos de los productos esperados y la investigación científica promueve busca participar activamente brindando soluciones de ingeniería aplicada.

Lo siguiente fue mapear el tipo de apoyo posible desde las diferentes partes interesadas a la constelación FACSAT-3. Para este propósito se implementó un análisis con base en las capacidades de cada actor dependiendo del uso que les dan actualmente a las

tecnologías espaciales. La encuesta tuvo en cuenta la manera en que la FAC analiza y plantea las capacidades como: doctrina y documentos que soportan la capacidad, organización, material y equipo, personal e infraestructura - (DOMPI) las cuales son necesarias para llevar a cabo las tareas de la institución. [18] Es así como se puede evidenciar cual puede llegar a ser el principal aporte de estas partes interesadas entre recursos humanos, infraestructura, aportes económicos, entre otros. Por lo tanto, en la Figura 7 se presenta el análisis realizado, que ilustra cómo cada actor puede contribuir activamente al proyecto de manera diversa. Se destaca que la mayoría de las instituciones exhiben una contribución significativa en términos de recursos económicos y humanos de manera paralela.

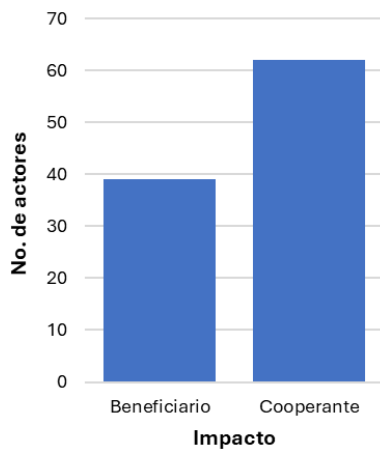


Figura 6. Número de partes interesadas por tipo de impacto. Fuente: elaboración propia.

2.3. Desarrollo de encuestas

Una vez completada la identificación de las partes interesadas involucrados en la misión y con una base de datos completa a disposición, se dio inicio a la siguiente fase, que consistía en la elaboración de una encuesta detallada. El objetivo principal de esta encuesta era llevar a cabo un análisis más exhaustivo y pormenorizado de cada uno de las partes interesadas identificados. Para lograr esto, las partes interesadas se dividieron en dos categorías principales: entidades, que englobaban tanto empresas públicas como privadas, y la academia, que comprendía instituciones de educación superior que ya estaban involucradas en el ámbito espacial a través de proyectos de desarrollo, investigaciones u otras actividades relacionadas.

Se diseñaron encuestas específicas para cada una de estas categorías con el fin de indagar con mayor precisión acerca de las necesidades y requisitos de las diferentes partes interesadas dentro de sus respectivos ámbitos.

Además, esta herramienta de encuesta se utilizó como un medio de comunicación para presentar de manera efectiva la misión FACSAT-3, sus objetivos y el posible impacto que podría tener en las partes interesadas involucradas en el ámbito espacial.

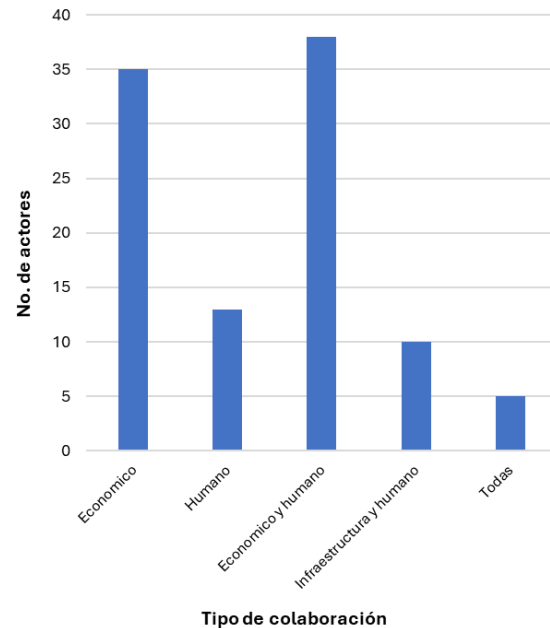


Figura 7. Número de partes interesadas por tipo de colaboración. Fuente: elaboración propia.

Considerando que el propósito es determinar las necesidades de cada actor, las preguntas se orientaron a comprender mejor las actividades que cada entidad está desarrollando en la actualidad. Esto incluía proyectos, investigaciones o aplicaciones en las que estaban involucrados, así como la procedencia de los recursos, tanto informáticos como económicos, que utilizan para llevar a cabo dichas actividades.

A través de este primer sondeo, se logró la participación de 12 partes interesadas en el proceso, lo que representó un 8% del total de partes interesadas identificadas en la categoría de entidades. En cuanto a las instituciones académicas, se encuestaron satisfactoriamente 4 universidades, abarcando así un 30% del total de universidades identificadas.

Es así como en la Figura 8 se puede claramente identificar que la aplicación que genera un mayor interés entre las entidades es la observación terrestre, seguida de cerca por el análisis de gases de efecto invernadero (GEI). Además, cabe destacar que estas entidades también demostraron tener un conocimiento significativo sobre las aplicaciones relacionadas con el Internet de las cosas (IoT).

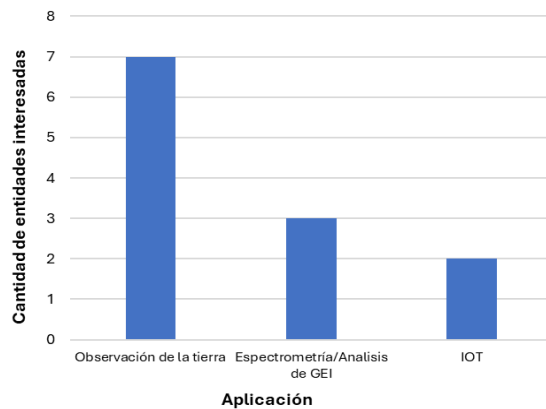


Figura 8. Entidades interesadas por aplicación. Fuente: elaboración propia.

De igual forma a las entidades se les preguntó el nivel de procesamiento que necesitaban en los datos satelitales. Las imágenes satelitales se pueden entregar como datos crudos (L0 o 1) o en un nivel mayor de procesamiento donde ya están orto rectificadas y georreferenciadas (L1 o 3) [19]. Como se puede evidenciar en la Figura 9 la mayoría de las entidades prefieren las imágenes con un nivel de procesamiento L1 debido al tipo de aplicación y personal técnico que poseen.

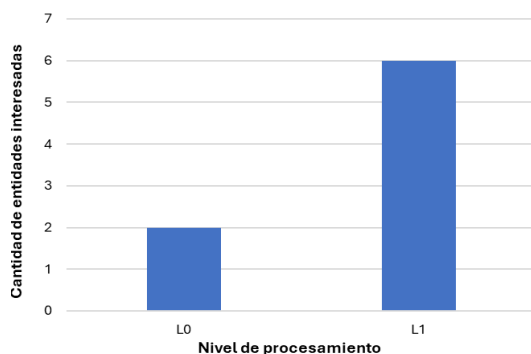


Figura 9. Entidades interesadas en un nivel de procesamiento específico. Fuente: elaboración propia.

Dentro de la misión, es de suma relevancia comprender las diversas formas en que las partes interesadas pueden colaborar y asociarse con él, ya que su influencia puede variar tanto en términos positivos como negativos para su desarrollo. Por lo tanto, se planteó a las partes interesadas la pregunta acerca de cómo podrían vincularse, ya sea económicamente, desde una perspectiva técnica o como usuarios finales.

La mayoría de las partes interesadas expresaron su interés en ser usuarios finales, dado su deseo de aprovechar la información generada por la misión. Sin embargo, algunas partes interesadas manifestaron su disposición a participar tanto desde una perspectiva

económica como técnica. Estos últimos, sin duda, representan aliados potenciales de gran valor, ya que su involucramiento podría ser activo a lo largo de todo el proceso de ejecución y desarrollo del proyecto Figura 10.

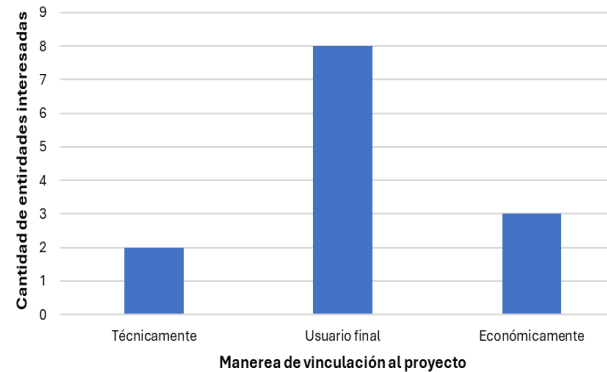


Figura 10 Cantidad de entidades por tipo de vinculación. Fuente: elaboración propia.

2.4. Identificación de principales aliados

Con base en la información anterior, se identificaron cuatro partes interesadas que se perfilan como potenciales aliados para la misión FACSAT-3. Estas partes interesadas han demostrado un interés activo en participar en el proyecto, respaldado por las iniciativas que actualmente están desarrollando en el ámbito del uso y exploración de las tecnologías espaciales. Además, cuentan con la capacidad económica necesaria para respaldar la ejecución del proyecto. Estas partes interesadas son: Empresas Públicas de Medellín (EPM), Ecopetrol, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH).

Para fortalecer estas posibles alianzas, se llevaron a cabo mesas técnicas con cada uno de las partes interesadas mencionadas, durante las cuales se estableció un diálogo directo para explorar cómo podrían colaborar de manera efectiva en el ciclo de vida de la misión. El principal objetivo de estas interacciones fue identificar áreas de trabajo comunes que pudieran alinear los intereses de las entidades y desarrollar un plan de trabajo conjunto que abarque toda la ejecución del proyecto.

En este proceso de diálogo y colaboración, se enfatizó en comprender con mayor claridad las necesidades específicas de cada actor en relación con la misión FACSAT-3, como se detalla en la Tabla 2. Estas partes interesadas, que actualmente utilizan datos principalmente relacionados con el medio ambiente, encuentran de gran interés la mejora de sus capacidades de operación y análisis en este ámbito.

Tabla 2. Resultados identificación necesidades de stakeholders misión FACSAT-3

Entidad	Necesidad	Razón
EPM	<p>Monitorear e identificar cambios en las masas de agua de las hidroeléctricas.</p> <p>Monitorear el material flotante en la represa de Hidroituango.</p>	<p>El material flotante (macrófitos) puede afectar la calidad del agua por lo que es necesario tener un control efectivo sobre el mismo [20], [21].</p> <p>La fluctuación del nivel del agua, identificación de zonas de deforestación para temas de compensación ambiental, estudios de crecimiento poblacional para caracterización de terreno en obras de acueducto, zonas de invasión y presencia de cultivos ilícitos que últimamente se han incrementado al ser zonas de difícil acceso.</p>
Ecopetrol	<p>Monitorear el CO₂ generado por la operación de la empresa en puntos estratégicos como las refinerías.</p>	<p>Ecopetrol dentro de sus objetivos de sostenibilidad tiene varios objetivos para el 2050:</p> <p>Cero emisiones netas de CO₂</p> <p>Cero quemas rutinarias de gas al 2030</p> <p>Cero vertimientos de agua al 2045</p> <p>Actualmente la empresa cuenta con un proyecto para monitorear los gases de efecto invernadero. El FACSAT-2 hace uso de un instrumento que permite medir la concentración de los gases de efecto invernadero.</p>
IDEAM	<p>Monitorear la deforestación y la emisión de gases de efecto invernadero.</p> <p>Monitorear caudales y cauces de ríos.</p> <p>Monitorear el avance de deforestación.</p>	<p>El IDEAM tiene la responsabilidad de monitorear la deforestación y la emisión de gases de efecto invernadero en Colombia. Esto se debe a la importancia crítica de la conservación de los recursos naturales y la mitigación del cambio climático. La deforestación amenaza la biodiversidad y contribuye significativamente este problema, lo que hace necesario contar con herramientas de monitoreo precisas. Además, desempeña un papel crucial en la gestión de desastres naturales y en la protección de la población ante eventos como inundaciones.</p>
ANH	<p>Seguimiento de potenciales energéticos</p> <p>Implementación de planes de choques para la transformación energética del país.</p>	<p>La agencia está encargada del proceso de la transformación energética del país. Es así como entender esta transformación desde diferentes aspectos es necesario. La información satelital permite aprovechar diferentes fuentes energéticas como la eólica.</p>

3. Resultados

Con base en el análisis de las necesidades identificadas en las partes interesadas mencionados anteriormente, se procede al establecimiento de los requisitos de alto nivel para la misión FACSAT-3. Estos requisitos se agrupan en dos categorías principales: operacionales y funcionales. Los requisitos operacionales se refieren a los criterios que la constelación debe satisfacer durante su operación, mientras que los funcionales se relacionan con las capacidades específicas que debe poseer la constelación [17]. Para desarrollar requisitos de misión efectivos, es fundamental considerar que estos son los aspectos que la misión debe cumplir. Es decir, al finalizar el diseño de la misión, se realiza una verificación para determinar si el sistema satisface cada uno de estos requisitos, lo que permite evaluar si la misión cumple con su objetivo.

En este contexto, se aplica la metodología VALID (Validación, Alineación, Diseño, Identificación y Localización) para garantizar la correcta formulación de los requisitos [22]. Los requisitos generales de la misión sirven como lineamientos para cada fase y nivel de desarrollo del sistema. Es así como se pueden evidenciar algunos de los requisitos operacionales de la misión, los cuales han sido formulados siguiendo esta metodología para asegurar su calidad y adecuación a los objetivos del proyecto. A continuación, se presentan los requisitos operacionales preliminares como resultado del análisis de partes interesadas en la [Tabla 3](#).

Los requisitos funcionales influirán directamente en los sistemas de la constelación. Estos sistemas deben satisfacer las necesidades de las partes interesadas interesados. Es así como los requisitos funcionales obtenidos por esta identificación de necesidades son lineamientos generales de la misión por lo que van a dar una guía para los requisitos específicos de cada

subsistema. En la **Tabla 4**, se evidencian algunos de los requisitos funcionales para la misión FACSAT-3.

4. Conclusiones

La identificación y colaboración con las partes interesadas desempeñan un papel esencial en el desarrollo y éxito de una misión satelital como FACSAT-3. En Colombia, el uso de información satelital está en constante crecimiento en diversas instituciones y sectores, como las corporaciones autónomas regionales que aprovechan estas tecnologías para el monitoreo ambiental en distintas regiones del país. A través de la identificación de estas partes interesadas a nivel nacional, se ha demostrado que el uso de tecnologías espaciales es fundamental en las operaciones de muchas entidades.

Es importante destacar que, aunque la encuesta fue respondida por un 9% de las partes interesadas identificados, sigue siendo esencial continuar difundiendo los objetivos del proyecto FACSAT-3. La promoción activa del programa mediante reuniones y eventos puede despertar el interés de más partes interesadas, incentivándolos a participar activamente en el proyecto. Los stakeholders recibirían beneficios significativos al involucrarse prematuramente en las actividades de diseño de misión y alinear sus misionariedades con los objetivos de la misión FACSAT-3. Esto les permitiría maximizar su participación y contribución a la misión.

Tabla 3. Requisitos operacionales de la constelación FACSAT-3

ID	Descripción
FAC3-OP-01	La constelación FACSAT-3 debe tener la capacidad de orientarse hacia los objetivos estratégicos de las partes interesadas para la captura de información.
FAC3-OP-02	La constelación FACSAT-3 debe tener un centro de distribución de datos en tierra que cuente con las capacidades para descargar y transmitir la información eficientemente hacia las partes interesadas.
FAC3-OP-03	La constelación FACSAT-3 debe tener la capacidad de comunicarse con la estación en tierra de manera confiable.
FAC3-OP-04	La constelación FACSAT-3 debe conseguir realizar capturas de objetivos estratégicos de las partes interesadas al menos una vez por mes.
FAC3-OP-05	La constelación FACSAT-3 debe entregar datos satelitales iguales o mejor que las actualmente usadas por las partes interesadas.
FAC3-OP-06	La constelación FACSAT-3 debe tener la capacidad de monitorear ágilmente desastres naturales mediante su carga útil.
FAC3-OP-07	La constelación FACSAT-3 debe tener la capacidad de operar de manera continua como mínimo por 10 años.

Tabla 4. Requisitos funcionales generales de la constelación FACSAT-3

ID	Descripción
FAC3-FU-01	La constelación FACSAT-3 debe tener la capacidad de capturar imágenes satelitales con calidad calidad entre 2 a 4 metros por pixel, sobre los objetivos estratégicos de las partes interesadas.
FAC3-FU-02	La constelación FACSAT-3 debe tener la capacidad de medir y monitorear los gases de efecto invernadero en la operación de las partes interesadas.
FAC3-FU-03	La constelación FACSAT-3 debe tener un sistema de comunicación confiable y seguro para transmitir los datos a la estación en tierra.
FAC3-FU-04	La constelación FACSAT-3 debe tener la posibilidad de tener más de una carga útil que permita obtener diferentes datos de los objetivos estratégicos.
FAC3-FU-05	La constelación FACSAT-3 debe tener la posibilidad de incluir una carga científica desarrollada por la academia.
FAC3-FU-06	La constelación FACSAT-3 debe cubrir en su totalidad los objetivos estratégicos de cada parte interesada durante la operación según se determine el grado de prioridad de cada uno.
FAC3-FU-07	La constelación FACSAT-3 debe tener la posibilidad de comunicarse con estaciones terrenas de las universidades.

La constelación FACSAT-3 ha establecido colaboraciones clave con partes interesadas principales en el proceso de desarrollo de los satélites, como Empresas Públicas de Medellín (EPM), Ecopetrol, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). Estas entidades, de gran relevancia a nivel nacional, cuentan con la capacidad económica para aportar al proyecto de manera significativa. Mantener una comunicación constante y efectiva con estos aliados, buscando puntos de convergencia en sus intereses y objetivos, es esencial para el éxito del proyecto.

En resumen, la identificación y colaboración con las partes interesadas son aspectos cruciales para el desarrollo y éxito de la misión satelital FACSAT-3. La difusión continua de los objetivos del proyecto es fundamental para involucrar a un mayor número de partes interesadas, y la alineación temprana de sus misionariedades con los objetivos de la misión FACSAT-3 puede maximizar los beneficios para todos los stakeholders. La constelación debe mantener una estrecha colaboración con sus principales aliados, enfocándose en objetivos comunes y estableciendo acuerdos sólidos. Esta estrategia puede maximizar el impacto de la constelación FACSAT-3 y su contribución a la comunidad nacional e internacional.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al equipo CITAE y sus colaboradores que están trabajando para consolidar la misión FACSAT-3. Además, los autores agradecen el apoyo de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, MinCiencias, EPM, Ecopetrol, IDEAM y la ANH por la información provista para el desarrollo de esta investigación.

Financiación

Este artículo es parte de los resultados del programa espacial de la Fuerza Aérea Colombiana.

Contribución de los autores

J. M. Cárdenas-García: Análisis formal, Investigación, Metodología, Recursos, Supervisión, Redacción – revisión y edición. G. Darío Sáenz-Hernández: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Supervisión, Redacción – borrador original. D. A. Díaz-Álvarez: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Redacción – borrador original. K. N. Pirazan Villanueva: Conceptualización, Análisis formal, Investigación,

Metodología, Redacción – borrador original. Sergio F. Barrera-Molano: Análisis formal, Investigación, Metodología, Redacción – borrador original.

Todos los autores han leído y aceptado la versión actual del documento.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] E. S. Rincón, “Capacidades de diseño de misiones espaciales de la Fuerza Aérea Colombiana”, *IV Encuentro de Investigación, Desarrollo e Innovación en el Sector Aeronáutico*, 29-31, 2021.
- [2] E. Kulu, “Nanosatellite Launch Forecasts - Track Record and Latest Prediction,” *35th Annual Small Satellite Conf.*, Paper SSC22-S1-04, 6-11, 2022.
- [3] Brycotech, *Smallsats by the Numbers 2023*. Brycotech, 2023. [en línea]. Disponible: <https://newspaceconomy.ca/2023/02/12/brycotech-smallsats-by-the-numbers-2023/>
- [4] S. Rincón, “MISIÓN FACSAT-2: Avance del programa espacial colombiano”, *ACIEM*, vol. 147, p. 36–40, 2022. [En línea]. Disponible: https://www.capacitacion.aciem.com.co/Especiales_Revista/2022/Oct_05/Revista-ACIEM-147-36-40.pdf
- [5] W. Larson, J. Wertz, *Space Mission Analysis and Design*, 3rd ed, vol. 1. California: Space Technology Library, 2005.
- [6] J. R. Wertz, D. F. Everett, J. J. Puschell, *Space Mission Engineering: The New Smad*. Torrance: Microcosm Press, 2011.

- [7] Cooperación Europea para la Normalización Espacial, “ECSS-M-ST-10C Rev. 1- – Project planning and implementation,” ECSS-M-ST-10C, 06 de marzo de 2009. [En línea]. Disponible: <https://ecss.nl/standard/ecss-m-st-10c-rev-1-project-planning-and-implementation/>
- [8] E. Freeman, “Strategic Management a Stakeholder Approach”, University of Virginia, 2015, doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139192675>
- [9] DNP, “Metodología General Ajustada Para La Formulación de Proyectos de Inversión Pública En Colombia”, vol. 2. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación, 2023.
- [10] S. Rincon, *et. al*, “Development of the Colombian Space Program”, *International Astronautical Federation*, 2022. [En línea]. Disponible: <https://iafaastro.directory/iac/archive/browse/IAC-22/B4/1/73664/>
- [11] S. Rincón, J. M. Cárdenas, K. N. Pirazan, I. Acero, R. Hurtado, E. Cortés, “Diseño Crítico del nanosatélite de la misión FACSAT-2 para la observación y análisis del territorio colombiano”, *Revista UIS Ingenierías*, 2023, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n3-2023006>
- [12] M. A. Viscio, N. Viola, R. Fusaro, V. Basso, “Methodology for requirements definition of complex space missions and systems,” *Acta Astronautica*, vol. 114, pp. 79–92, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.04.018>
- [13] R. Fusaro, N. Viola, F. Fenoglio, F. Santoro, “Conceptual design of a crewed reusable space transportation system aimed at parabolic flights: stakeholder analysis, mission concept selection, and spacecraft architecture definition,” *CEAS Space Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 5–34, 2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s12567-016-0131-7>
- [14] Agência Espacial Brasileira AEB, “Catálogo da Indústria e Empresa Espaciais Brasileira”, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.gov.br/aeb/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/catalogos-aeb>
- [15] C. Cappelletti, D. Robson, “CubeSat missions and applications”, *Cubesat handbook: from mission design to operations*, pp. 53-65, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817884-3.00002-3>
- [16] A. Camps, “Nanosatellites and Applications to Commercial and Scientific Missions,” in *Satellites Missions and Technologies for Geosciences*, IntechOpen, 2020, doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.90039>
- [17] Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 “Colombia Potencia Mundial de La Vida.” Bogotá: Departamento de Planeación Nacional, 2022.
- [18] FAC, Estrategia para el Desarrollo Aéreo y Espacial 2042. Bogotá: Fuerza Aeroespacial Colombiana, 2023.
- [19] Spot Image, “Niveles de Preprocesamiento y Precisión de Localización”, *Airbus Intelligence*, 2006.
- [20] Caracol Radio Medellín, “El Buchón de Agua invade embalse de Hidroituango”, Caracol Radio. [En línea]. Disponible: https://caracol.com.co/emisora/2019/05/05/medellin/1557017312_038251.html
- [21] H. Benavides, “Análisis multitemporal de pérdida de bosque de la región amazónica del municipio de Mapiripán en el departamento del Meta entre los años 2015 a 2022,” monografía, Universidad Antonio Nariño, 2023.
- [22] INCOSE-TP-2010-006-04, “Guide to Writing Requirements”, Rev 3.1, 2022. [En línea]. Disponible: https://www.incose.org/docs/default-source/working-groups/requirements-wg/rwg_products/incose_rwg_gtwr_summary_sheet_2022.pdf