

El espacio exterior
una oportunidad infinita para Colombia

EL CIELO NO ES EL LÍMITE: EL FUTURO ESTELAR DE COLOMBIA

Carlos Enrique Álvarez Calderón
Coronel FAC Carlos Giovanni Corredor Gutiérrez
Editores

El espacio exterior
una oportunidad infinita para Colombia

Vol 2.

EL CIELO NO ES EL LÍMITE: EL FUTURO ESTELAR DE COLOMBIA

Carlos Enrique Álvarez Calderón
Coronel FAC Carlos Giovanni Corredor Gutiérrez
Editores



Catalogación en la publicación Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”
El Espacio Exterior: Una oportunidad Infinita para Colombia /Editores Carlos Enrique Álvarez
Calderón y Coronel FAC Carlos Giovanni Corredor Gutiérrez – Bogotá: Escuela Superior de Guerra
“General Rafael Reyes Prieto”, 2020.
Editorial: Editorial Planeta Colombiana S.A.
2 volumen: 250 Páginas, ilustraciones; 15x23cm.
ISBN 10 958-42-8890-3 ISBN 13 978-958-42-8890-5
7. La Fuerza Aérea Colombiana y la evolución del pensamiento estratégico del poder espacial 8. Análisis
de la política espacial colombiana: una perspectiva de defensa y seguridad 9. Colombia y la órbita geoes-
tacionaria: un vínculo geoestratégico inalienable 10. Programa Espacial Colombiano
THEMA: JWCM
DEWEY: 358

Título: Volumen 2. El espacio exterior:
Una oportunidad infinita para Colombia.
El cielo no es el Límite: el futuro estelar de
Colombia

© CR Robert Santiago Quiroga Cruz
© CT Yuber Rico Venegas
© BG Carlos Fernando Silva Rueda

Primera edición, 2019
Segunda edición, 2020

Revisión de textos

Vanessa Motta

Diseño y diagramación

Haidy García Rojas

Editores

© Carlos Enrique Álvarez Calderón
© CR FAC Carlos Giovanni Corredor
Gutiérrez

ISBN 10 958-42-8890-3
ISBN 13 978-958-42-8890-5

Coordinadores editoriales

MY Gerson Ricardo Jaimes Parada
María Camila Villegas Jiménez

© 2020 Editorial Planeta Colombiana S. A.
Calle 73 N.º 7-60, Bogotá D.C., Colombia

LIBRO RESULTADO DE INVESTIGACIÓN

Autores

© Carlos Enrique Álvarez Calderón
© CR Carlos Giovanni Corredor Gutiérrez
© MY Nora Patricia Gutiérrez Rodríguez
© CR (RA) Álvaro Molano Valbuena
© MY Juan Camilo Núñez Cuevas
© TC Guillermo Alberto Poveda Zamora

© 2020 Escuela Superior de Guerra “General Rafael
Reyes Prieto” Maestría en Seguridad y Defensa
Nacionales ESDEG-SIIA
Carrera 11 No. 102-50 Bogotá D.C., Colombia

© 2020 Fuerza Aérea Colombiana
Jefatura de Educación Aeronáutica
Av. Calle 26 No. 52-24 Bogotá D.C., Colombia

Este libro ha sido evaluado con un procedimiento de doble ciego –*blind peer reviewed*.

Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida ni en su totalidad ni en sus partes,
tampoco registrada o transmitida por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún
medio sea mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, electróptico, por fotocopia o cualquier otro, sin el
permiso previo por escrito de la editorial.

El contenido de este libro corresponde exclusivamente al pensamiento de los autores y es de su absoluta responsa-
bilidad.

Las posturas y aseveraciones aquí presentadas son resultado de un ejercicio académico e investigativo que no
representa la posición oficial ni institucional de la Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”, de la
Escuela de Posgrados de la Fuerza Aérea Colombiana, de la Escuela Militar de Aviación, de la Oficina de Asuntos
Espaciales de la Fuerza Aérea Colombiana, de las Fuerzas Militares o del Estado Colombiano.



DIRECTIVOS

Comandante Fuerza Aérea Colombiana
General Ramsés Rueda Rueda

Jefe de Educación Aeronáutica
Coronel Pedro Alberto Vega Torres

Jefe Oficina de Asuntos Espaciales
Teniente Coronel Guillermo Alberto Poveda Zamora



DIRECTIVOS

Director Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”
Mayor General Helder Fernan Giraldo Bonilla

Subdirector Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”
Brigadier General Óscar Zuluaga Castaño

Director Centro de Estudios Estratégicos sobre Seguridad y Defensa Nacionales
Coronel Óscar Mario Ramírez Villegas

Director Maestría en Seguridad y Defensa Nacionales
Coronel (RA) Yesid Eduardo Ramírez Pedraza

La ciencia mi ruta, mi meta el espacio

CONTENIDO

PREFACIO	13
PRÓLOGO	15
PRESENTACIÓN	19

Capítulo VII

LA FUERZA AÉREA COLOMBIANA Y LA EVOLUCIÓN DEL PENSAMIENTO ESTRATÉGICO DEL PODER ESPACIAL	25
1. Introducción	27
2. Antecedentes	28
3. Comité de Uso Pacífico del Espacio Exterior de la ONU	33
4. Comisión Colombiana del Espacio	36
5. Plan Nacional de Desarrollo PND 2018-2022 y el desarrollo espacial	39
6. Política de Defensa y Seguridad PDS y el desarrollo espacial	43
7. Fuerza Aérea Colombiana	44
7.1. Plan Estratégico Institucional FAC 2011-2030 y el desarrollo espacial	48
7.2. Comité de Asuntos Espaciales CAE	49
7.3. Oficina de Asuntos Espaciales OFAES	50
7.4. Política Espacial FAC	51

7.5. Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales CITAE	53
7.6. Programa FACSAT	54
8. Conclusiones	57
 Capítulo VIII	
ANÁLISIS DE LA POLÍTICA ESPACIAL COLOMBIANA: UNA PERSPECTIVA DE DEFENSA Y SEGURIDAD	61
1. Introducción	63
2. Antecedentes de la política espacial colombiana	65
2.1. El sector público	65
2.2. El sector privado: la Academia y la Industria	72
2.3 La Fuerza Aérea Colombiana	73
3. Análisis de la Política Espacial Colombiana	74
3.1. Ausencia de una política pública que oriente los esfuerzos	
3.2. Falta de conocimiento en administración de recursos espaciales	85
3.3. Dar prioridad a la estructura burocrática sobre el desarrollo material de soluciones espaciales	86
3.4. Falta de liderazgo político	86
3.5. Falta de apoyo del Estado a las iniciativas privadas de desarrollo espacial	87
3.6. Carencia de una institucionalidad permanente de asuntos espaciales	87
4. Contexto regional en materia espacial	88
5. Conclusiones	91
 Capítulo IX	
COLOMBIA Y LA ÓRBITA GEOESTACIONARIA: UN VÍNCULO GEOESTRATÉGICO INALIENABLE	95
1. Introducción	97
2. Análisis teórico de una propuesta de órbita para un SGC	105
2.1. Generalidades de mecánica orbital	105
2.2. Métodos y herramientas	127
2.3. Valores obtenidos	129

3. Colombia: una plataforma de lanzamiento para cohetes y vehículos espaciales	172
3.1. La forma de la Tierra	174
3.2. La velocidad de rotación de la Tierra	176
3.3. Cálculos de energía	179
4. Conclusiones	197
 Capítulo X	
PROGRAMA ESPACIAL COLOMBIANO	199
1. Introducción	201
2. El espacio como una oportunidad	204
3. Conciencia, conocimiento y desarrollo nacional a través del espacio	205
4. Elementos para la competitividad de un programa espacial en Colombia	207
4.1. Estrategias nacionales coordinadas	208
4.2. Talento humano competente	211
4.3. Infraestructura organizada y de tamaño efectivo	213
4.4. Inversión prioritaria en tecnología e innovación	216
5. Colombia como potencia espacial regional	220
5.1. Agencia Espacial de Colombia	222
5.2. Industria privada espacial	223
5.3. Cooperación internacional	224
6. Conclusiones	225
 AUTORES	229
REFERENCIAS	233

PREFACIO

Marta Lucía Ramírez de Rincón
Vicepresidente de la República

Durante gran parte del siglo XX, la Carrera Espacial fue elemento de relevancia para los asuntos concernientes a la seguridad y la defensa de los Estados. Y si bien, hasta hace muy pocos años, era innegable el monopolio de los Estados Unidos y Rusia por el control del espacio exterior, esta situación ha comenzado a cambiar a medida que las potencias en ascenso -en un sistema internacional dirigido hacia la multipolaridad se embarcan en la investigación, la exploración y la utilización del espacio ultraterrestre.

La industria espacial mundial experimenta desde hace una década un crecimiento sin precedentes, hasta el punto que actualmente hay más de 4.000 satélites en órbita. Paralelamente, las inversiones privadas comienzan a sobrepasar a las inversiones de los Estados; hecho éste, que demuestra que la competitividad y la innovación, son factores claves en esta revolución denominada “New Space”. Nunca antes ha existido una mayor oportunidad para que nuevos actores como Colombia, puedan beneficiarse del sector espacial.

La evidente urgencia de adoptar una estrategia nacional para el espacio exterior y las demandas conceptuales que ella exige, sumadas a

la necesidad práctica de un consenso político para implementar tales ideas, no siempre se logran articular, debido al desconocimiento de los beneficios que ofrecen los activos basados en el espacio. Los satélites de telecomunicaciones, navegación global y observación de la Tierra, y sus aplicaciones derivadas, proporcionan soluciones operativas, datos e información que permiten implementar una amplia gama de actividades contenidas en los planes de Gobierno.

En un esfuerzo por elevar la conciencia de nuestra sociedad sobre el impacto que el espacio tiene en nuestra vida diaria, pero, sobre todo, en la calidad de ella; la Fuerza Aérea Colombiana y la Escuela Superior de Guerra, se han unido para presentar esta obra de dos volúmenes, que se constituye en la primera de su clase en el país. En buena hora, los autores analizan en ella, temas de interés concernientes al espacio ultraterrestre, y que, a partir de un interesante diagnóstico, se espera, contribuya a trazar la Gran Estrategia de Colombia en este escenario vital para los intereses nacionales.

PRÓLOGO

*General Ramses Rueda Rueda
Comandante Fuerza Aérea Colombiana*

La Fuerza Aérea Colombiana presenta la obra literaria “El Espacio Exterior una Oportunidad Infinita para Colombia” la cual, hace parte de la conmemoración de los 100 años de nuestra Institución al servicio del País.

Este texto de dos volúmenes, tanto digitales como impresos, corresponde a un trabajo académico e investigativo documental producto de la cooperación sostenida de los grupos de investigación de la Fuerza Aérea Colombiana y la Escuela Superior de Guerra, quienes comparten a la opinión pública los resultados de tal esfuerzo bajo los títulos “Mirando Hacia las Estrellas: una Constante Necesidad Humana” y “El Cielo no es el Límite: el Futuro Estelar de Colombia”.

Cada uno de ellos es pertinente y coherente con el empeño institucional por generar cultura en el campo espacial, como también, con la intención de ilustrar el impacto positivo de las actividades espaciales en la vida cotidiana de individuos y sociedades. En este sentido, se destaca la defensa del avance de este sector a pesar de sus altos costos, teniendo en cuenta su retorno exponencial en términos de empleos, conocimientos tecnológicos y científicos, la creación de spin-offs y stratups en tecnologías relacionadas.

Esta investigación rinde tributo al lema que toma con determinación en sus garras nuestra águila de gules, “*sic itur ad astra*”, “así se va a las alturas”, cuya literalidad traza un horizonte más lejano y ambicioso: “así se va a las estrellas”. Estas palabras definen el derrotero de nuestra Fuerza, reto que incorpora el escudo de nuestra Alma Mater, fijando el espacio como meta mientras se recorre el camino de la ciencia, tal como lo hicieron nuestros fundadores, quienes definieron claramente la filosofía que nos guía.

Fue persiguiendo ese sueño que, el 28 de noviembre del 2018, Colombia; a través de su Fuerza Aérea, siguió escribiendo la historia al llegar a ese punto con nuestro primer activo estratégico espacial, el FACSAT I, piedra fundacional sobre la cual estamos construyendo una nueva etapa de crecimiento y desarrollo para la nación. Ahora, nuestros dominios son mayores y, consecuentemente, los estándares deben ser más altos.

Dicha dinámica nos ha llevado a contemplar una nueva perspectiva, transformando nuestra organización y misión institucional, que ahora nos indica: “volar, entrenar y combatir para vencer y dominar el aire, el espacio y el ciberespacio, en defensa de la soberanía, la independencia, la integridad territorial, el orden constitucional y contribuir con los fines del Estado”.

La materialización del sueño de nuestros fundadores, sumado al devenir de los contextos nacionales y globales, ha impulsado un cambio consecuente en nuestra proyección, plasmado en la actualización de la visión compartida por quienes tenemos la responsabilidad de trazar los destinos de esta gran Institución: “para ejercer el dominio en el aire, el espacio y el ciberespacio, la Fuerza Aérea será innovadora, polivalente, interoperable, líder y preferente regional; con alcance global y con capacidades disuasivas reales, permanentes y sostenibles”.

Este proceso, nos lleva a asumir con decisión la generación de conocimiento y doctrina espacial, liderando la exploración del espacio en nombre de la nación, siendo motor y nodo del esfuerzo académico, público y privado, de una industria que jalonará el progreso de Colombia, su sociedad, economía e influencia regional. Todo esto, en coordinación con la Vicepresidencia de la República y la Comisión Colombiana del Espacio.

El esfuerzo que realizamos, responde al crecimiento acelerado del interés mundial en este campo que desarrolla el presente y futuro del poder aeroespacial. Prueba de ello, es el emprendimiento público y privado que ha tenido en el último año: más de 70 Estados miembros de la ONU han establecido programas espaciales liderados enteramente por sus gobiernos; de otro lado, la mitad de los lanzamientos satelitales han sido apropiados por conglomerados comerciales de carácter no gubernamental.

De esta manera, “El Espacio Exterior una Oportunidad Infinita para Colombia”, contribuye al entendimiento de esta realidad que ya estamos viviendo, forjando la conciencia geopolítica que nos permitirá apreciar realmente la medida en que nuestro mundo depende del espacio y, aún más importante, cuán fundamental es que siga siendo un entorno pacífico y seguro, donde podamos invertir nuestros preciados recursos: talento humano, capacidades, tiempo y presupuesto.

PRESENTACIÓN

Mayor General Helder Fernán Giraldo
Director Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto"

Mucho antes de que iniciara la primera era espacial, con la puesta en órbita del primer satélite artificial (el Sputnik 1), la humanidad siempre estuvo fascinada y altamente influenciada por los sucesos ocurridos en el cielo cósmico. Tanto así, que el estudio del Universo fue probablemente la primera ciencia en la historia humana, en el cual la astronomía iba de la mano de los acontecimientos económicos, políticos, religiosos y bélicos.

Sin embargo, el espacio exterior adquirió una importancia global con la carrera espacial del periodo de Guerra Fría, alcanzando su apogeo en 1969, gracias al aterrizaje lunar del Apolo 11. Desde entonces, el mundo se ha vuelto paulatinamente dependiente de las actividades basadas en el espacio, tanto para las comunicaciones, el pronóstico del tiempo, los estudios ambientales, la navegación, y la exploración del Universo; ello explicaría por qué en los últimos veinte años, el número de actores estatales y no estatales con capacidades espaciales haya aumentado de manera significativa en un entramado geográfico, que es al mismo tiempo, un escenario de cooperación y de competencia.

Por lo tanto, esta obra bibliográfica de dos volúmenes se publica en un momento en el cual los temas espaciales parecen cobrar cada vez mayor importancia, no sólo por que la mayoría de los Estados que ya viajan en el espacio ultraterrestre parecen estar de acuerdo de la necesidad de alcanzar el conjunto del sistema solar (con misiones humanas y robóticas), sino porque la competencia por recursos valiosos en el espacio ultraterrestre y la defensa de activos espaciales en la Tierra y en sus órbitas, hace que el acceso y uso del espacio exterior sea un interés nacional vital para la supervivencia y la prosperidad de Estados desarrollados y en vías de desarrollo.

En este orden de ideas, las formas en que los Estados han justificado las actividades espaciales a lo largo de las últimas décadas han variado, generalmente, en dos tipos de “enfoques”: un enfoque “utilitario” que se centra en beneficios cuantitativos como mercados, empleos, tecnologías y aplicaciones; y un enfoque “transutilitario”, orientado a los beneficios cualitativos derivados de una mejor comprensión del Universo y la Tierra, así como del prestigio, la emoción y la fascinación natural que deviene de la exploración humana. Por ende, y tomando en consideración que Colombia ha sido un actor marginal de las actividades espaciales (hasta ahora ha enviado dos nanosatélites al espacio exterior), es crucial convencer a la opinión pública y a la clase política colombiana de que el futuro de la nación estaría en elevar el perfil de Colombia como actor espacial, a partir de argumentaciones cuantitativas y cualitativas necesarias para justificar cualquier forma de participación y gasto público orientado al espacio ultraterrestre.

Para tal fin, la Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto” (ESDEG) y la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), estrecharon sus lazos de colaboración académica en la construcción de la obra: “El Espacio Exterior: una oportunidad infinita para Colombia”, con el propósito de contribuir al entendimiento de la importancia estratégica que reviste las actividades espaciales para Colombia, no solo en la garantía de su seguridad y defensa, sino también en el avance del desarrollo social y la prosperidad económica.

Con este propósito en mente, se confió la edición y coordinación académica de la obra al Doctor Carlos Enrique Álvarez Calderón de la ESDEG y al Coronel Carlos Giovanni Corredor Gutiérrez de la FAC, los cuales en razón a su amplia trayectoria profesional y experiencia académica, lograron hacer de los dos volúmenes de “El Espacio Exterior: una oportunidad infinita para Colombia”, un documento sencillo pero riguroso, que se constituye como referente para la comunidad académica.

La obra está dividida en dos volúmenes, con un total de once capítulos, preparados por diecinueve autores que aportan un valioso conocimiento interdisciplinar al tema.

El primer volumen, titulado “Mirando hacia las estrellas: una constante necesidad humana”, consta de seis capítulos que establecen las bases teóricas y conceptuales necesarias para el estudio del espacio ultraterrestre. Aborda seis temas principales que incluyen: el poder espacial y la seguridad multidimensional; la geopolítica del espacio exterior como dominio estratégico del siglo XXI para la seguridad y defensa; el espacio ultraterrestre y el derecho internacional; el espacio exterior como escenario de competencia o cooperación en América del Sur, analizando los casos de Argentina, Brasil, México y Venezuela; los programas espaciales de Europa, Estados Unidos de América, Federación Rusa y República Popular China; y la nueva economía del siglo XXI, con el papel del sector privado en el espacio.

El segundo volumen, titulado “El cielo no es límite: el futuro estelar de Colombia”, está conformado por cuatro capítulos, que analizan la evolución del papel y los intereses de Colombia en el espacio exterior, así como de posibles futuros desarrollos. De esta forma, se presenta la evolución del pensamiento estratégico del poder espacial desde la Fuerza Aérea Colombiana; se realiza un análisis de la política espacial colombiana desde una perspectiva de defensa y seguridad; se explica el vínculo geoestratégico inalienable entre Colombia y la órbita geoestacionaria y, por último, se reflexiona sobre el programa espacial colombiano.

La obra es el resultado de la colaboración académica entre la Maestría en Seguridad y Defensa Nacionales, adscrita al Grupo de Investigación

“Centro de Gravedad” de la Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”, categorizado en (A1) por COLCIENCIAS, registrado con el código COL0104976 y vinculado al Centro de Estudios Estratégicos sobre Seguridad y Defensa Nacionales (CEESEDEN) y la Jefatura de Educación Aeronáutica de la Fuerza Aérea Colombiana, a través de los grupos de investigación “Ciencia y Poder Aéreo” (CIPAER), categorizado en (B) por COLCIENCIAS, registrado con el código COL0093003; “Gestión Tecnológica e Innovación” (GIGTI), categorizado en (C) por COLCIENCIAS, registrado con el código COL01983319; “Ciencias Biomédicas Espaciales” (VOYAGER), categorizado en (C) por COLCIENCIAS, registrado con el código COL0196332; y “Ciencias Militares Aeronáuticas” (GICMA), categorizado en (C) por COLCIENCIAS, registrado con el código COL0140489.

Los dos volúmenes de la obra fueron validados a través de un procedimiento de evaluación de pares externos tipo doble ciego. Para su desarrollo, se contó con la contribución multidisciplinaria de diversos académicos civiles y militares; del trabajo de los integrantes y alumnos de la Maestría en Seguridad y Defensa Nacionales de la Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”, de la Maestría en Ciencias Militares Aeronáuticas de la Escuela de Posgrados de la Fuerza Aérea Colombiana “Capitán José Edmundo Sandoval”, de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suarez”, así como miembros de la Jefatura de Educación Aeronáutica y de la Oficina de Asuntos Espaciales de la FAC.

En conclusión, la obra “El Espacio Exterior: una oportunidad infinita para Colombia”, vincula diversos enfoques teóricos con casos de estudio que permiten comprender la necesidad de fomentar una presencia permanente de Colombia en el espacio exterior, así como de fortalecer una estrategia espacial en la cual se enlacen los objetivos esenciales del Estado, las buenas prácticas y cursos de acción más recomendables en política pública, así como los medios y recursos disponibles para alcanzar y proteger los imperativos espaciales de nuestro país.



LA FUERZA AÉREA COLOMBIANA Y LA EVOLUCIÓN DEL PENSAMIENTO ESTRATÉGICO DEL PODER ESPACIAL *

CR. Robert Santiago Quiroga Cruz

MY. Nora Patricia Gutiérrez Rodríguez

MY. Juan Camilo Núñez Cuevas

CT. Yuber Rico Venegas

* El presente capítulo hace parte del proyecto de investigación de la Maestría en Ciencias Militares Aeronáuticas de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana “CT. José Edmundo Sandoval”, titulado: Fuerza Aérea Colombiana. De la evolución de las capacidades a la independencia estratégica, adscrito al grupo de investigación en Ciencias Militares Aeronáuticas (GICMA) de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”, categorizado en (C) por COLCIENCIAS, registrado con el código COL0140489.

1. Introducción

El espacio es considerado la nueva frontera del conocimiento, poco es lo que se sabe aún de él, mucho lo que inquieta y más aun lo que falta por descubrir. El medio ambiente espacial desafía el conocimiento humano e impone retos que de manera gradual han sido superados con base en los desarrollos tecnológicos y la persistencia de los seres humanos.

Posterior a la Segunda Guerra Mundial, el escenario espacial obtuvo el mayor interés de las dos potencias de la época, estableciendo una cerrada competencia por conquistarlo a través de innumerables proyectos que se constituyeron en la base de la exploración espacial actual. De esta manera, durante la Guerra Fría, los Estados Unidos de América y la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas, convirtieron el acceso al espacio en uno de los indicadores de la confrontación no bélica. Ambas potencias visionaron la proyección de sus capacidades militares en este nuevo escenario que les permitiría incorporar un nuevo concepto de guerra con alcance global.

Este concepto militar de las operaciones espaciales se ha interiorizado en el mundo moderno a través del uso de diferentes tecnologías satelitales con aplicaciones en Seguridad y Defensa, no siendo una tendencia ajena a Colombia, ya que la Fuerza Aérea Colombiana FAC conduce operaciones espaciales e incorporó desde hace varios años dentro de su misión, visión, plan estratégico institucional y doctrina, el acceso y uso de las tecnologías satelitales como una capacidad inherente y distintiva de la institución. De esta manera estableció un pensamiento estratégico fundamental para liderar el desarrollo espacial del sector defensa y del

país, buscando apoyar el logro de los intereses nacionales, así como el beneficio y bienestar de los colombianos y de la humanidad, a través del uso pacífico del espacio.

La interiorización de este concepto estratégico entorno al poder espacial por parte de la Fuerza Aérea, le permite al Estado colombiano contar con un foco de desarrollo tecnológico y de conocimiento que fortalece el poder nacional. En este mismo sentido, al ser el espacio un área física susceptible de ser controlada y dominada, con infinitas oportunidades de exploración y explotación en materia económica, social, medioambiental, científica, tecnológica y militar, el desarrollo espacial se convierte en un indicador de poder y conflicto a nivel mundial.

Esta dinámica de poder y el creciente desarrollo de aplicaciones, productos y servicios derivados de la tecnología espacial con uso masivo y cotidiano para los seres humanos, ha impulsado tanto a gobiernos como organizaciones a discutir acerca de la utilización del espacio en los estamentos de poder político y económico del sistema internacional. Por lo anterior, es importante que el lector conozca los esfuerzos que a nivel nacional se han realizado para consolidar el acceso y uso del espacio; en este sentido, este capítulo describirá los antecedentes, actividades, entidades del orden nacional, su evolución e interacción con organizaciones internacionales, visión de país, del sector defensa y de la Fuerza Aérea Colombiana entorno al desarrollo y poder espacial.

2. Antecedentes

Desde las escuelas filosóficas en la Grecia Clásica el ser humano ha manifestado su interés en el espacio ultraterrestre; pero fue hasta el nacimiento de la aviación, y como resultado del vertiginoso desarrollo científico y tecnológico, que se desencadenó después del uso del Poder Aéreo durante la Segunda Guerra Mundial, que la humanidad visionó la exploración del Universo. En este sentido, en la segunda mitad del siglo XX, los Estados Unidos de América USA (siglas en inglés) y la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas URSS, adelantaron una feroz compe-

tencia por liderar la conquista y supremacía del espacio, conocida como la carrera espacial.

Por más de cuatro décadas esta disputa se extendió a escenarios científicos, económicos, tecnológicos, militares y sociales, derivando en adelantos tecnológicos sin precedentes que fueron objeto de interés público. El lanzamiento del Sputnik 1 por parte de los soviéticos, el 04 de octubre de 1957, llamó la atención de Colombia acerca del desarrollo espacial; resultado de ello, dos años después participó en la cumbre sobre Soberanía Ultraterrestre en las Naciones Unidas.

Con la intención de promover el uso pacífico del espacio, la Organización de la Naciones Unidas ONU creó en 1959 la Comisión para el Uso Pacífico del Espacio Ultraterrestre COPUOS (siglas en inglés), a la cual Colombia se vincularía posteriormente. De esta manera el Estado colombiano manifestó interés en un asunto que se creía un tema exclusivo de la academia y del entorno militar aeronáutico. Un seguimiento al diario El Tiempo, entre 1957 y 1964, evidencia que la sociedad colombiana observaba con detenimiento la carrera espacial y los cambios tecnológicos, científicos y sociales que este fenómeno causaba alrededor del mundo, en lo que se preveía como el mayor y más trascendental fenómeno científico y tecnológico de ese siglo. El miércoles 17 de agosto de 1960, en un evento sin precedentes, el periódico El Tiempo reportó que Colombia iniciaba su desarrollo espacial, así “Técnicos colombianos lanzaron al espacio un globo-sonda equipado de instrumentos para estudiar temperatura, presión y humedad de las capas altas de la atmósfera, con lo que Colombia entra en la era del estudio espacial”. En los años subsiguientes Colombia firmaría diferentes documentos en materia espacial.

Al igual que otros países, durante la segunda mitad del siglo XX, el interés del Estado colombiano por explorar el espacio ultraterrestre se centró en potencializar el uso comercial de los satélites, aun cuando el desarrollo tecnológico para alcanzar dicho objetivo era visiblemente limitado. Con el fin de materializar la intención de obtener satélites propios, en 1977, el Gobierno colombiano a través del Consejo Nacional de Política Económica y Social emitió el primer documento con alcance espacial, el CONPES 1421 del 24 de marzo de 1977, el cual tenía como

objetivo central la adquisición de un satélite principal de comunicaciones a partir de 1980. Dicho documento constituye el primer antecedente político que evidencia el interés de Colombia en la explotación comercial del espacio, pues allí se justificaba la necesidad de adquirir un satélite para promover el desarrollo satelital para futuros ensanches en la red de telecomunicaciones del país (Departamento Nacional de Planeación, 1977). En este sentido se abrió una licitación para la contratación del primer satélite colombiano “con el objeto no sólo de integrar al país con todo tipo de telecomunicaciones, sino también para ejercer soberanía sobre la órbita geoestacionaria” (Álvarez, 1994), recibiendo dos propuestas que no cumplieron; una con el requerimiento técnico y la otra con el económico. Una vez declarada desierta la licitación, se determinó abandonar este proyecto espacial, dejando de lado la idea de tener soberanía sobre la órbita geoestacionaria. Esta situación no pasaría desapercibida ante la opinión pública, registrando años después opiniones como “Es justo que el país tenga ya su satélite de comunicaciones y que los recursos de la bonanza de la telefonía celular se inviertan en el mismo sector con un claro beneficio público, antes que se dilapiden” (Álvarez, 1994).

La siguiente iniciativa espacial provino de la academia, el satélite Libertad 1 surgió en el año 2004 en las aulas de la Universidad Sergio Arboleda, producto de la motivación de docentes y estudiantes de las áreas de las ciencias exactas y astronomía (Universidad Sergio Arboleda, s.f.), quienes articularon esfuerzos multidisciplinarios y competencias académicas alrededor de este proyecto. Libertad 1 poseía una estructura de 10 cm cúbicos y 1 kg de peso, constituyéndose en el primer satélite desarrollado en el país y por medio del cual Colombia accedió al espacio (Universidad Sergio Arboleda, s.f.).

El desarrollo investigativo duró casi tres años y alcanzó su objetivo el 17 de abril del 2007, convirtiéndose el Libertad 1 con código internacional 2007-012N, en el primer satélite colombiano en orbitar la tierra, a una altura de 800 km sobre la superficie terrestre. El lanzamiento se realizó desde el Centro Espacial Ruso de Baikonur en Kazajistán, a bordo del cohete Dnepr-2 de la empresa rusa Kosmotras. Los objetivos propuestos por la Universidad Sergio Arboleda fueron alcanzados, puesto

que se transmitieron más de 3000 paquetes de datos, se enviaron desde el espacio señales comprimidas para ser escuchadas por estaciones terrenas en el mundo y se comprobaron los estudios y cálculos realizados. Este satélite operó durante 34 días hasta agotar la energía de sus baterías (Universidad Sergio Arboleda, s.f.).

El año anterior a la puesta en órbita del satélite Libertad 1, en 2006, el Gobierno Nacional materializó su interés por el espacio, mediante la creación de la Comisión Colombiana del Espacio CCE, constituida por medio del Decreto 2442 del 18 de julio de 2006, con la intención de crear un órgano intersectorial de consulta, coordinación, orientación y planificación, que orientara la ejecución de la política nacional para el desarrollo y aplicación de las tecnologías espaciales (Presidencia de la República, 2006).

Fruto del trabajo de los miembros de esta Comisión y casi dos décadas después de la primera iniciativa de adquisición de tecnología espacial, el 25 de marzo de 2009 se emitió el documento CONPES 3579 denominado “Lineamientos para Implementar el Proyecto Satelital de Comunicaciones de Colombia” que tenía como objetivo central “Asegurar la disponibilidad de capacidad satelital para proveer la conectividad de las regiones y zonas apartadas y generar condiciones que favorezcan la soberanía en los territorios.” y definía como parte de la primera línea de acción puntual a desarrollar para conseguir el logro de los objetivos específicos propuestos, la de adquirir un satélite propio de telecomunicaciones fijas, asignando la responsabilidad al Ministerio de Comunicaciones para adelantar el proceso precontractual y contractual para la fabricación, lanzamiento, puesta en órbita y operación de un satélite de comunicaciones, con cobertura de la totalidad del territorio nacional, y que beneficiara los programas de conectividad y las demás labores estratégicas del Estado en temas de educación, seguridad y defensa del territorio. Por otra parte, asignaba al Ministerio de Defensa la responsabilidad de coordinar las acciones y recursos para contar con el terreno, la infraestructura complementaria y la seguridad para la ubicación de la estación de control y su eventual respaldo (Departamento Nacional de Planeación, 2009).

Este documento CONPES también consideraba que el Ministerio de Comunicaciones convocaría a las posibles entidades beneficiarias del proyecto y formularía un plan coordinado de aprovechamiento y uso del segmento satelital, considerando como mínimo la integración de las necesidades del Ministerio de Defensa, de Educación, de la Protección Social y de Cultura. Los recursos para el financiamiento del proyecto provendrían del Fondo de Comunicaciones por un monto de \$507.303 millones, asignados entre el 2009 y el 2012. Meses después, mediante el documento CONPES 3613 del 25 de septiembre de 2009, denominado “Complemento al CONPES 3579 del 25 de marzo de 2009: Lineamientos para Implementar el Proyecto Satelital de Comunicaciones de Colombia” se introducen cambios en cuanto a los antecedentes, marco conceptual y el plan de acción, en los aspectos asociados con el esquema de comunicaciones satelitales y el Recurso Órbita Espectro (ROE) (Departamento Nacional de Planeación, 2009).

El 29 de septiembre de 2009 se abrió la licitación para la adjudicación del contrato del satélite de comunicaciones, al que mostraron interés compañías de China, Estados Unidos, Israel y Rusia; mas para noviembre de 2009, tan solo una empresa rusa se había presentado y una vez evaluada la propuesta, esta fue rechazada por aspectos económicos y técnicos (Webinfomil, 2009). Durante el primer semestre del siguiente año, se emitió el CONPES 3651 denominado “Modificación al Documento CONPES 3579 del 25 de marzo de 2009 – Lineamientos para implementar el Proyecto Satelital de Comunicaciones de Colombia” del 15 de marzo de 2010, por medio del cual se consideró que teniendo en cuenta que el proyecto Satelital de Comunicaciones de Colombia era de importancia estratégica para el país, se adelantaría un nuevo proceso competitivo de selección por medio de una segunda licitación (Departamento Nacional de Planeación, 2010). Este nuevo proceso licitatorio recibió una única propuesta de una empresa china, la cual fue rechazada por el comité evaluador al no satisfacer los aspectos jurídicos, financieros y técnicos requeridos (El País, 2010). De esta manera, el 01 de septiembre de 2010 se declaró desierta la licitación y fue el final de un segundo intento de Colombia por adquirir un satélite de comunicaciones (El Tiempo, 2010).

En este mismo año, otra iniciativa en tecnología espacial surgió. El CONPES 3683 del 03 de agosto de 2010 denominado “Lineamientos para la Formulación del Programa Nacional de Observación de la Tierra que incluyó el diseño de un Programa Satelital Colombiano” fue emitido con el objetivo central de establecer los lineamientos generales para la formulación del Programa Nacional de Observación de la Tierra PNOT que incluyera el diseño de un Programa Satelital Colombiano de Observación de la Tierra (Departamento Nacional de Planeación, 2010). Una vez cerrada la licitación del satélite de comunicaciones, la opción de tecnologías satelitales de observación de la tierra se constituyó en una posibilidad viable y más económica de acceso al espacio; en este sentido y aun cuando no hubo un proceso de licitación formal, extensos esfuerzos y acercamientos se realizaron en cuanto a estas tecnologías. Dada la importancia del tema, el Gobierno Nacional creó mediante el Decreto 2516 del 15 de noviembre de 2013, el Programa Presidencial para el Desarrollo Espacial Colombiano PPDEC a cargo de la Vicepresidencia de la República, con el fin de liderar, coordinar, fortalecer e impulsar el desarrollo espacial colombiano y su integración al escenario internacional, ampliar los beneficios de las tecnologías espaciales y fomentar una nueva área de desarrollo industrial y de conocimiento para Colombia (Presidencia de la República, 2013). Aun a pesar de este programa presidencial, en 2014 la posible inversión de 250 millones de dólares para la compra de un satélite fue desestimada y terminó así el último intento por acceder al espacio (Revelo, 2014).

3. Comité de Uso Pacífico del Espacio Exterior de la ONU

El Comité de Uso Pacífico del Espacio Ultraterrestre COPOUS fue conformado en 1959 mediante Resolución 1472 emitida por la Asamblea General de las Naciones Unidas, con el propósito de guiar la cooperación internacional para el uso del espacio ultraterrestre, estimular la investigación, diseñar programas de cooperación técnica, promover el uso

seguro de la energía nuclear en el espacio ultraterrestre, cooperar con la prevención del cambio climático y motivar por la evolución del derecho y legislación espacial internacional.

En 1963 fue planteada una convención para articular las actividades de los Estados en el espacio ultraterrestre. El objetivo de esta convención fue orientar el uso con fines pacíficos de las tecnologías espaciales con aplicaciones para el desarrollo económico y social de la humanidad. De esta manera fue planteado el Tratado que rige las actividades de los Estados en la exploración y utilización del espacio ultraterrestre, incluso la Luna y otros cuerpos celestes, mediante la Resolución 2222 (XXI) de la Asamblea General, aprobado el 19 de diciembre de 1966, abierto a la firma el 27 de enero de 1967, y entrado en vigor el 10 de octubre de 1967.

Antes de la adhesión de Colombia al COPOUS, el 3 de diciembre de 1976 se desarrolló en Bogotá la primera reunión de los países ecuatoriales, en la cual se discutieron los derechos del recurso natural del espacio exterior para estos países, quienes argumentaban que de manera injusta se les había negado la soberanía sobre la órbita geoestacionaria GEO (siglas en inglés). En la mencionada conferencia, Colombia, Ecuador, Congo, Indonesia, Kenya, Uganda y Zaire, junto a Brasil como observador, proclamaron una declaración para manifestar sus derechos, expresando categóricamente que la órbita GEO era un recurso natural al cual tenían derecho a acceder (Duque y Griffin, 2009).

La primera resolución que Colombia firmó como miembro del COPOUS fue la Resolución 32/196 B de 1977, llamada Cooperación Internacional en el Uso Pacífico del Espacio Exterior. En 1980 firmó la Resolución GA 35/16 con título Ampliación de la Comisión sobre la Utilización del Uso Pacífico del Espacio Exterior, y desde 1994 hasta el 2018 ha firmado catorce resoluciones y decisiones, todas ellas relacionadas con la cooperación internacional en el uso pacífico del espacio exterior (United Nations Office for Outer Space Affairs, 2012). Sobresalen algunas como: el Convenio sobre el Registro de los Objetos Lanzados al Espacio Ultraterrestre, el Convenio sobre la Responsabilidad Internacional por Daños Causados por Objetos Espaciales y el Acuerdo sobre el Salvamento y la Devolución de Astronautas y la Restitución de Objetos Lanzados al Espacio Ultraterrestre.

Así mismo, en el Acta A/AC.105/C.2/2013/CRP.9 a 11 y 20, el COPUOS mencionó documentos presentados por Colombia, junto a Australia, Austria, Kazajstán y Portugal que contenían información de las actividades e iniciativas para fomentar la capacitación en materia de derecho del espacio (Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos, 2013). En este sentido se reconocieron los esfuerzos de las instituciones educativas colombianas que adelantaron eventos académicos como diplomados y seminarios en derecho espacial, así como las actividades lideradas por la Comisión Colombiana del Espacio para la utilización de tecnologías espaciales en diferentes campos como las telecomunicaciones, navegación satelital, gestión del conocimiento y la investigación, entre otros; y el trabajo del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación COLCIENCIAS en lo concerniente a la investigación.

Durante la participación de Colombia en las diferentes sesiones anuales del COPUOS, ha dado a conocer su posición con relación a diversos temas. Por ejemplo, en el Acta A/AC.105/865/Add.13 del 6 de marzo del 2013 conocida como “Legislación Nacional pertinente a la definición y delimitación del espacio ultraterrestre” menciona los apartes de la Constitución Colombiana que en su artículo 101 determina los límites de Colombia como los establecidos en los tratados internacionales adoptados por el Congreso, debidamente ratificados por el Presidente de la República y aquellos definidos por laudos arbitrales de Colombia (Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos, 2012). En virtud de lo expuesto anteriormente, la Cancillería de Colombia ha realizado esfuerzos por mantener en escenarios internacionales sus intereses sobre la órbita geoestacionaria, como lo expresó en su participación en el 54° y 55° período de sesiones del Subcomité Científico y Técnico, en el 56° y 57° período de sesiones del Subcomité Jurídico y en el 60° y 61° período de sesiones del COPUOS (Cancillería de Colombia, s.f.).

De esta manera, en los más de cuarenta años de participación en el COPUOS, Colombia ha manifestado su interés en el fortalecimiento de las capacidades espaciales del país, estableciendo esfuerzos de cooperación con el UNISPACE+50, el Grupo de Observación de la Tierra

GEO (siglas en inglés) y el Sistema Global de Observación de la Tierra GEOSS (siglas en inglés). Así mismo, hace parte del Convenio sobre la Responsabilidad Internacional por daños causados por Objetos Espaciales y del Convenio sobre el Registro de Objetos Lanzados al Espacio Ultraterrestre, aprobados por la Asamblea General de la ONU y ratificados en Colombia mediante la Ley 1591 del 20 de noviembre de 2012 y Ley 1569 del 4 de agosto de 2012, y declarados exequibles por la Corte Constitucional de Colombia en Sentencia C829 del 13 de noviembre de 2013 y C-220 del 17 de abril de 2013, respectivamente.

4. Comisión Colombiana del Espacio

La Comisión Colombiana del Espacio CCE fue creada mediante el Decreto 2442 del 18 de julio de 2006, como un órgano intersectorial de consulta, coordinación, orientación y planificación, con el fin de orientar la ejecución de la política nacional para el desarrollo y aplicación de las tecnologías espaciales, y coordinar la elaboración de planes, programas y proyectos de manera que se optimizaran los recursos, se evitara la dispersión y superposición de esfuerzos, y se generara para el país capacidades propias en este campo (Presidencia de la República, 2006).

El mismo Decreto estableció que estaría integrada por el vicepresidente de la República; los ministros de Relaciones Exteriores, de Defensa Nacional, de Educación Nacional, de Comunicaciones, de Interior y de Justicia, de Agricultura y Desarrollo Rural y de Transporte; el director del Departamento Nacional de Planeación; el comandante de la Fuerza Aérea Colombiana; el director general de la Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil; el director del Instituto Geográfico Agustín Codazzi; el director del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales; el director de Colciencias; y el director General de la Agencia Presidencial para la Acción Social y la Cooperación Internacional (Presidencia de la República, 2006).

La Comisión Colombiana del Espacio tiene como funciones la coordinación de actividades nacionales espaciales; políticas, criterios y linea-

mientos sobre temas espaciales; creación de estímulos para la industria privada, universidades, instituciones de investigación, científicos y expertos involucrados en actividades espaciales; promoción de la cooperación nacional e internacional espacial; ejecución de la política espacial y uso eficiente, productivo y pacífico de las tecnologías espaciales.

Esta Comisión determinó la asignación de una Secretaría Ejecutiva por periodos de dos años, que fue ejercida por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi desde el 2007 hasta el 2012 en tres periodos consecutivos y posteriormente del 2013 al 2014 por la Fuerza Aérea Colombiana. Así mismo, se establecieron siete grandes campos de acción: Telecomunicaciones; Navegación Satelital; Observación de la Tierra; Astronáutica, Astronomía y Medicina Aeroespacial; Gestión del Conocimiento y la Investigación; Asuntos Políticos y Legales; e Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales (ICDE). Los cuatro primeros enfocados en áreas temáticas de aplicación de las ciencias y las tecnologías espaciales, y los tres últimos concentrados en temas de interés transversal (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2007). En concordancia con estos grupos de trabajo, la CCE adelantó la formulación de cinco proyectos que incluyeron el Programa de Investigación en Desarrollo Satelital y Aplicaciones en el Tema de Observación de la Tierra, el Proyecto Satelital de Telecomunicaciones, el Directorio Nacional de Datos Geográficos, el Banco Nacional de Imágenes BNI y los Sistemas de Información Geográfica para el Ordenamiento Territorial SIGONT (Arenas Ceballos, 2011).

En 2008, por medio del Acuerdo 10, se adicionaron nuevos miembros a la CCE, incluyendo al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, el Ministerio de Minas y Energía, la Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH, la Dirección Nacional Marítima DIMAR, la Universidad Sergio Arboleda, el Centro Internacional de Física CIF, el Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS y la Unidad de Planeación Minero-Energética UPME (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2008).

Como parte del trabajo de la CCE, se adelantó un análisis para la creación de una Agencia Espacial para Colombia, denominado “Estudio técnico-jurídico para crear una entidad estatal que se encargue de

fortalecer y desarrollar la Política Espacial Colombiana”, presentado el 18 de junio de 2011 en la Reunión Plenaria de la CCE, en la cual se validó el estudio y además se reactivó el proyecto de adquisición y lanzamiento de un satélite de Observación de la Tierra (Comisión Colombiana del Espacio, 2013).

Paralelo a los avances de la CCE, se creó mediante el Decreto 2516 del 15 de noviembre de 2013, el Programa Presidencial para el Desarrollo Espacial Colombiano PPDEC, bajo la supervisión directa de la Vicepresidencia de la República, con la misión de liderar, coordinar, fortalecer e impulsar el desarrollo espacial colombiano y su integración al escenario internacional, a través de la implementación de planes, proyectos y programas que ampliaran los beneficios que las tecnologías espaciales proveen al país, generando una nueva área de desarrollo industrial y de conocimiento para Colombia (Presidencia de la República, 2013).

La Comisión Colombiana del Espacio a partir del 2014 inició un periodo de cambios constantes en cuanto a su dirección que afectaron notablemente el enfoque de su labor y redujeron su capacidad de gestión. Estos cambios iniciaron el 02 de septiembre de 2014 con el Decreto 1649, por medio del cual se modificó la estructura del Departamento Administrativo de la Presidencia de la República, estableciendo a través del artículo 35, numeral 1, como responsabilidad de la Dirección para Proyectos Especiales, el orientar y promover la formulación del Plan Estratégico de Desarrollo Espacial y la ejecución de planes derivados, programas y proyectos relacionados con el Desarrollo Espacial Colombiano, la coordinación interinstitucional e intersectorial para contribuir al Desarrollo Espacial Colombiano (Presidencia de la República, 2014). La anterior disposición administrativa fue modificada mediante el Decreto 0470 del 17 de marzo de 2015, reasignando la responsabilidad del Desarrollo Espacial Colombiano al Despacho del Director del Departamento Administrativo de la Presidencia de la República (Presidencia de la República, 2015); y un año después, nuevamente se reasignó esta responsabilidad, en este caso al Alto Consejero Presidencial para el Postconflicto, Derechos Humanos y Seguridad, mediante el Decreto 724 del 02 de mayo de 2016 que modificó la estructura del Departamento

Administrativo de la Presidencia de la República DAPRE (Presidencia de la República, 2016).

En 2017 se modificó nuevamente la estructura del Departamento Administrativo de la Presidencia de la República mediante el Decreto 672 del 26 de abril de 2017, asignando al Consejero Presidencial de Seguridad, mediante el Artículo 45, numeral 7, la función de Ejercer la Secretaría Ejecutiva de la Comisión Colombiana del Espacio; y por medio del numeral 9, la función de orientar y promover la formulación de la Política y el Plan Estratégico de Desarrollo Espacial y la ejecución de planes derivados, programas y proyectos relacionados con el Desarrollo Espacial Colombiano, la coordinación interinstitucional e intersectorial que contribuya al Desarrollo Espacial Colombiano (Presidencia de la República, 2017).

Finalmente, en el 2018 mediante el artículo 8 del Decreto Presidencial 1714 del 05 de septiembre, se asignó a la Vicepresidencia de la República la misión de ejercer la Presidencia de la Comisión Colombiana del Espacio, retornando el control de esta Comisión a la segunda autoridad del Estado, después de cuatro años en su dirección (Presidencia de la República, 2018).

5. Plan Nacional de Desarrollo PND 2018-2022 y el desarrollo espacial

El Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 “Pacto por Colombia, pacto por la equidad” definió con claridad los factores y restricciones que impiden el avance de Colombia, mencionando entre otros, las economías ilegales, los grupos criminales, la injusticia, la corrupción, el estancamiento de la productividad y el gasto público ineficiente. El baluarte principal del PND 2018-2022 es la Equidad, considerando que en ella se encuentra parte de la solución de las problemáticas sociales que han sido el común denominador en la historia de nuestro país, dicho esto, al alcanzar la equidad, el PND 2018-2022 proyecta que se removerían las barreras de acceso a la educación, a la salud, y a los servicios sociales

esenciales, manteniendo simultáneamente una seguridad efectiva y una justicia transparente para vivir en libertad, democracia y paz (Departamento Nacional de Planeación, 2019).

En este sentido, el desarrollo espacial se constituye en un imán que atrae grandes beneficios para las sociedades; beneficios directos e indirectos que las naciones día a día disfrutan mientras lo usan como un instrumento de poder que va más allá del concepto de seguridad, soberanía, sostenibilidad, preservación y desarrollo de capacidades. Colombia, a pesar de no poseer mayores activos en el espacio, se ha beneficiado del desarrollo espacial gracias a los servicios contratados, los cuales han permitido visualizar la integración de las tecnologías espaciales al plan de desarrollo colombiano.

El Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 plantea la formulación de doce pactos, de los cuales, el pacto por la ciencia, la tecnología y la innovación; el pacto por el transporte y la logística para la competitividad y la integración regional; el pacto por la transformación digital; y el pacto por una gestión pública eficiente y de servicio al ciudadano, pueden ser beneficiarios de los productos y servicios derivados de las tecnologías espaciales. Este concepto se puede apreciar en la investigación “Space development and space science together, an historic opportunity” (Metzger, 2016), en la cual se menciona la relación directa que existe entre la ciencia y el desarrollo económico, y el resultado inequívoco que históricamente el espacio exterior ha brindado a las economías mundiales, así como a las naciones que deciden usarlo como un medio para desarrollar sus capacidades y alcanzar sus objetivos.

Siguiendo esta idea, se vislumbra para Colombia como ejemplo, la oportunidad de construir una estrecha relación entre la prestación de servicios de salud y el desarrollo espacial; lo anterior teniendo en cuenta la geografía nacional y las características demográficas de nuestro país, que permiten identificar poblaciones lejanas, pobres y con limitaciones de acceso, no solo a la salud sino también al transporte. Ante esta problemática, un desarrollo espacial maduro proveería soluciones en materia de salud convenientes para esta situación. Para este caso, la ONU en el documento “Space Science for Global Development” (Committee on the

Peaceful Uses of Outer Space, 2017) brinda claras recomendaciones para el uso de las tecnologías espaciales en beneficio de la salud global, que permitiría que naciones con estas capacidades o con acceso a ellas, puedan compartir información temprana para prevenir epidemias y afecciones sanitarias masivas, durante desastres naturales de gran envergadura.

Unido a lo anterior, es importante mencionar que además de la equidad, el PND 2018-2022 especifica dos grandes propósitos. El primero, el emprendimiento e innovación como pieza fundamental para conducir al país hacia una economía dinámica, incluyente y sostenible que permita disfrutar de libertad económica. El segundo, la unión de múltiples esfuerzos en torno al desarrollo productivo para la creación de empleo que incremente los niveles de bienestar y protección social de la población.

De esta manera, el emprendimiento y la innovación van muy ligados al desarrollo espacial, de hecho, éste surgió de los mismos. En agosto del 2009, el Center for Strategic & International Studies CSIS (nombre y siglas en inglés), orientó la investigación “Toward the Heavens Latin America’s Emerging Space Programs” (Center for Strategic and International Studies, 2009) en la relación entre la innovación, el crecimiento económico y la protección de recursos que son de importancia para los países latinoamericanos. Uno de los enfoques fue traer como ejemplo al programa espacial de Brasil, cuyo objetivo, además de mejorar la cobertura de comunicaciones, era usar la tecnología satelital para monitorear la selva amazónica, en su lucha contra el cambio climático. Colombia, quien comparte también gran porción amazónica, tendría en las tecnologías espaciales una herramienta de grandes proporciones si de manera autónoma accediera a las capacidades satelitales para observar su territorio.

En otro sentido, el PND 2018-2022 observa con lupa la educación en Colombia, considerándola como el puente que acortará las brechas entre el desconocimiento y el aprendizaje y de la ignorancia a la educación. Desde este ángulo, Colombia podría considerar el integrarse a la Agencia Espacial Regional y junto con Brasil y México participar en el Centro Regional de Enseñanza en Ciencia y Tecnología Espacial para América Latina y el Caribe CRECTEAL, y de esta manera permitir que

el conocimiento se adquiriera de la mano del acceso a capacidades espaciales de mayor complejidad. Esto se puede apreciar en el documento investigativo “Benefits Stemming from Space Exploration” (International Space Exploration Coordination Group, 2013), en el cual se describen los beneficios que otorga el desarrollo espacial a la educación de una nación, jugando un rol vital en las organizaciones académicas y educativas como paso fundamental para la innovación, la cultura y la curiosidad de las personas.

En virtud de lo anterior y teniendo en cuenta la importancia del sector espacial, el PND 2018-2022 consideró como estrategia el Implementar una Política Nacional para Desarrollar el Sector Espacial, como parte del objetivo Impulsar la Transformación Digital Sectorial, del Pacto Transversal VII. Pacto por la Transformación Digital de Colombia: Gobierno, empresas y hogares conectados con la era del conocimiento. Esta estrategia determinó que las tecnologías espaciales, y en particular las tecnologías satelitales, son un componente clave del ecosistema digital que amplía la gama de aplicaciones tanto civiles como militares, lo cual redundará en una mayor competitividad para los países (Departamento Nacional de Planeación, 2019). Así, Colombia incorporó el desarrollo espacial dentro de la hoja de ruta del desarrollo nacional.

Dicho todo esto, puede concluirse que el avance en temática espacial siempre tendrá cabida e impacto positivo en un país, independiente de su nivel de desarrollo; es decir, las tecnologías espaciales pueden ser aprovechadas por cualquier nación, ya sea una potencia mundial, regional o una economía emergente. Sus beneficios intangibles son los de mayor valor porque generan cambios en la sociedad que podrían perdurar por décadas y de los cuales aún no se conocen todos los resultados. Con relación a Colombia y específicamente al Plan Nacional de Desarrollo PND 2018-2022, las tecnologías espaciales proveen la posibilidad de apalancar mucho más que la estrategia, objetivo y pacto específico que las contempla, apoyando de manera general el logro de los pactos y objetivos que este contiene.

6. Política de Defensa y Seguridad PDS y el desarrollo espacial

Las Fuerzas Militares de Colombia han estado en constante transformación y han sido dinámicas frente al surgimiento de nuevos fenómenos que amenazan la seguridad nacional. Sobre este particular, la Política de Defensa y Seguridad PDS 2019 para la Legalidad, el Emprendimiento y la Equidad, integra un enfoque multidimensional que permite comprender estos fenómenos para diseñar estrategias que fortalezcan la legitimidad estatal y el régimen democrático, el respeto por los derechos humanos y la construcción de la legalidad. Así mismo, la actual PDS 2019 resalta el compromiso del Estado por mantener la capacidad militar para disuadir eventuales agresiones y proteger lo que este documento determina como elementos de interés nacional, a saber: el agua, la biodiversidad y el medio ambiente (Ministerio de Defensa Nacional, 2019).

La Política de Defensa y Seguridad PDS 2019 no hace mención específica al desarrollo espacial, ya que considera el espacio como un ambiente propicio para el progreso pacífico de la humanidad, en el cual y por ahora no se visualizan amenazas que se consideren un riesgo para la seguridad nacional. No obstante, teniendo en cuenta el impacto que las tecnologías espaciales proveen a la estrategia militar, se asignó a la Fuerza Aérea Colombiana la responsabilidad de desarrollar las capacidades espaciales del sector defensa y la aplicación de las tecnologías derivadas como soporte a la conducción de operaciones militares. De esta manera la Fuerza Aérea Colombiana asumió la responsabilidad de liderar el poder aéreo y espacial de la Nación para el cumplimiento de los objetivos establecidos en la Política de Defensa y Seguridad PDS 2019.

Los productos, servicios y aplicaciones derivados del poder espacial aportan directamente y de manera transversal a contener y solucionar los desafíos y retos que enfrenta el Ministerio de Defensa. A través de este, es posible proveer respuestas a desafíos como, los espacios vacíos de institucionalidad en regiones estratégicas del país, el déficit de control institucional, la multiplicación de los grupos de crimen organizado, las amenazas a los recursos naturales estratégicos y las actividades económicas

ilícitas, entre otros (Ministerio de Defensa Nacional, 2019). De esta manera, las tecnologías espaciales se convierten en una prioridad y capacidad transversal que permiten proveer soluciones y apoyar estrategias no solo para el sector defensa, sino también para otros sectores productivos o de interés, en beneficio de la sociedad, la Nación y la humanidad.

7. Fuerza Aérea Colombiana

La Fuerza Aérea Colombiana FAC demostró su interés en temas con afinidad al ámbito espacial en la década de los años 70, realizando una exploración de las ventajas que ofrecía la información meteorológica para la planeación y el desarrollo de las operaciones militares, la generación de pronósticos de alta precisión y en general para fines misionales de la Fuerza Pública. A partir de entonces, la FAC propició el desarrollo de la meteorología aeronáutica nacional y fortaleció canales de cooperación interinstitucional con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, la Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil UAEAC, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC y la Universidad Nacional de Colombia (Sánchez y Cárdenas, 2010).

Teniendo en cuenta que la Fuerza Aérea durante varias décadas estuvo inmersa en el conflicto armado, el desarrollo espacial institucional presentó una pausa prolongada; hasta que, a finales de los años 90, la necesidad misma del conflicto generó la introducción de tecnologías y aplicaciones espaciales en las operaciones que conducía. De esta manera se introdujeron y desarrollaron modernas capacidades basadas en tecnología espacial, como: comando y control satelital, navegación aérea y espacial, utilización de armamento de precisión por medio de guía satelital, geoposicionamiento global, pronósticos meteorológicos basados en información proveniente del espacio, comunicaciones satelitales, inteligencia, medicina aeroespacial, vigilancia del espacio aéreo, administración de estaciones satelitales terrenas, control de activos satelitales, y descargue, almacenamiento y procesamiento de imágenes y datos. Un ejemplo del uso efectivo de esta capacidad espacial militar se evidenció

en la catástrofe natural en la zona norte del país, derivada de las inundaciones en enero de 2011; adquiriendo, procesando y socializando análisis detallados basados en imágenes satelitales, que permitieron adelantar una adecuada administración de la crisis.

Reconocidos los beneficios que el poder espacial aportaba a la seguridad, defensa y el progreso del país, la FAC lo incorporó como una capacidad propia, adelantando paralelamente actividades y acciones relacionadas con el fomento del sector espacial nacional, tales como: la participación en la organización de la IV Conferencia Espacial de las Américas en el 2003; la integración al grupo de trabajo del proyecto Libertad 1 de la Universidad Sergio Arboleda, de un oficial con experiencia técnica durante los años 2005 y 2006 (Universidad Sergio Arboleda); la participación como miembro fundador de la Comisión Colombiana del Espacio en el 2006; la creación del Comité de Asuntos Espaciales al interior de su organización en el 2007; la emisión del Plan Estratégico Institucional PEI 2011-2030 que estableció en su visión el desarrollo del poder espacial; la creación del Departamento de Asuntos Espaciales en 2013; la emisión del Manual de Doctrina Básica Aérea y Espacial, cuarta edición en 2013; la emisión de la Política Espacial en 2018; el inicio del Programa FACSAT en 2018; el nombramiento a la Fuerza Aérea Colombiana como Entidad de Registro en Colombia de los Objetos Lanzados al Espacio ante el COPUOS de la Naciones Unidas en 2018 (Ministerio de Defensa Nacional, 2018); y la actualización de la misión y la visión institucional con enfoque espacial en 2019, entre otros.

Dentro de las capacidades estratégicas que proyecta la Fuerza Aérea Colombiana se encuentran las tecnologías satelitales militares y sus productos, aplicaciones y servicios derivados, que se evidencian día tras día como herramientas tecnológicas fundamentales para el sostenimiento de la Seguridad y Defensa de las naciones y el logro de sus intereses. Por lo anterior y entendiendo que el escenario espacial no se encuentra sometido a regulaciones de soberanía de los Estados, estas tecnologías permiten alcanzar cualquier punto de la superficie de la tierra, restringiéndose tan solo por las limitaciones inherentes al ambiente espacial y por las organizaciones supranacionales que normatizan el acceso a

determinadas órbitas en el espacio. Esta característica de alcance global de las tecnologías espaciales le permite a la Fuerza Aérea y al país aumentar su capacidad estratégica, mientras brinda acceso a una nueva área de conocimiento y lo ubica al mismo nivel tecnológico de quienes ya han adelantado camino en el espacio exterior.

En virtud de lo anterior, resulta fundamental para la Fuerza Aérea Colombiana garantizar el acceso, uso, exploración y explotación autónoma del espacio, proveyendo independencia en la ejecución de operaciones espaciales, estableciendo canales de cooperación internacional y enfocando el desarrollo de tecnologías espaciales de uso pacífico en beneficio de los intereses de Colombia y la humanidad. De esta manera se consolida una capacidad estratégica que le aporta tanto al sector defensa como a los demás e impulsa una nueva área productiva basada en innovación y tecnología.

Por medio de la capacidad espacial, la Fuerza Aérea Colombiana fortalece las estrategias de seguridad y defensa para contrarrestar las actividades ilegales y los nuevos comportamientos ilícitos; controlar las fronteras; vigilar los activos nacionales estratégicos; monitorear los intereses nacionales fuera del propio territorio; y cumplir con los requerimientos de inteligencia militar, así como de organizaciones y entidades ajenas al sector defensa, brindando información útil para conducir la estrategia política, diplomática, económica, social y científica del Estado colombiano.

Las operaciones basadas en tecnologías espaciales hacen parte de una sincronizada integración de activos en el espacio que adquieren y transmiten datos e información fundamental para el planeamiento y ejecución de la estrategia militar en la tierra (Joint Chiefs of Staff (CJCS) of the Armed Forces of the United States, 2018). En este mismo sentido, las tecnologías espaciales, minimizan el desgaste de la guerra, bajo el argumento de que “conociendo que los objetivos estratégicos pueden ser logrados a través de operaciones aeroespaciales, la victoria puede ser alcanzada sin la ocupación de territorio por fuerzas de superficie” (Aerospace Education Foundation, 2001). Para el caso colombiano, la FAC contempla en su Manual de Doctrina Básica Aérea y Espacial

MADBA, cuarta edición, el desarrollo de Operaciones Espaciales, como una Misión Típica y Operación Tipo, dentro de la Función de Controlar el Aire, el Espacio y el Ciberespacio (Fuerza Aérea Colombiana, 2013); operaciones que han sido vitales para cumplir con la responsabilidad que le asigna la Constitución Nacional.

De esta manera, la FAC a través de su estrategia y dependencias especializadas en temática espacial, administra e integra su visión y proyección espacial, desarrollando acuerdos, políticas, regulaciones, proyectos, programas y actividades de cooperación nacional e internacional tanto a nivel institucional como del sector defensa; y al mismo tiempo participa activamente en los proyectos interinstitucionales que desarrolla la Comisión Colombiana del Espacio en los siete grupos de trabajo, siendo la única entidad que es miembro de todos ellos.

Dada la importancia del poder espacial, un objetivo claro de la Fuerza Aérea Colombiana es el alcanzar la independencia en el acceso a las tecnologías satelitales y los productos y servicios que de ellas se derivan, evitando caer en un sometimiento tecnológico que limite la posibilidad de contar con capacidades satelitales militares propias que satisfagan las necesidades de la estrategia de Seguridad y Defensa. Así mismo, y a pesar de los grandes esfuerzos y logros alcanzados con relación a la administración de las capacidades espaciales, aún hay mucho por hacer; por lo anterior, la FAC proyecta adelantar reformas organizacionales que permitan dar celeridad a los procesos de desarrollo espacial y fomenten el uso y aplicación de las tecnologías espaciales. De esta manera se pretende lograr un nivel administrativo, operativo y de integración de capacidades espaciales tanto militares como de país, similar al de naciones como Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, México, Perú y Venezuela; países que incorporaron las tecnologías espaciales como parte de sus capacidades estratégicas brindando soporte a su desarrollo económico y social (Space Security, 2012).

En este sentido la Fuerza Aérea Colombiana, apoyada en conceptos de innovación y tecnología, determinó estructurar la capacidad espacial como uno de los ejes que aportan al logro de los objetivos estratégicos planteados en la Política de Defensa y Seguridad PDS 2019 y en soporte

directo a los intereses del Gobierno Nacional estipulados en el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022, convirtiéndose en una herramienta fundamental para el desarrollo del país.

7.1. Plan Estratégico Institucional FAC 2011-2030 y el desarrollo espacial

El artículo 217 de la Constitución Política de Colombia define como el fin principal de las Fuerzas Militares de Colombia “la defensa de la soberanía, la independencia, la integridad del territorio nacional y del orden constitucional” (Constitución Política de Colombia, 1991). Teniendo como base este mandato constitucional, la Fuerza Aérea Colombiana FAC plasmó su estrategia de largo plazo en el Plan Estratégico Institucional PEI 2011-2030, considerando la proyección de aire y el espacio sobre el territorio colombiano como el núcleo central de su desarrollo, como lo contempla el PEI en uno de sus apartes “El espacio aéreo es la esencia de la Fuerza Aérea, es su razón de ser, no sólo como Fuerza de defensa activa y pasiva al servicio de la Nación, sino como Fuerza decisiva para el futuro de paz y cordialidad que construye el pueblo colombiano” (Fuerza Aérea Colombiana, 2011).

En concordancia con la tarea asignada por la constitución, el PEI 2011-2030 determinó como objetivo de su estrategia general, el consolidar una Fuerza Aérea decisiva y efectiva, estableciendo como uno de sus cuatro objetivos estratégicos, el de Fortalecer la Capacidad Operacional (Fuerza Aérea Colombiana, 2011), integrando en este objetivo estratégico la conducción de las operaciones espaciales, definidas y establecidas como una capacidad institucional distintiva en el Manual de Doctrina Básica Aérea y Espacial MADBA, cuarta edición, aprobado mediante la Disposición 001 del 10 de enero del 2013 (Fuerza Aérea Colombiana, 2013).

De igual manera, la Disposición 026 del 22 de julio de 2019, actualizó y definió la misión institucional como “Volar, entrenar y combatir para vencer y dominar en el aire, el espacio y el ciberespacio, en defensa de la soberanía, la independencia, la integridad territorial, el orden constitucional y contribuir a los fines del Estado”; así mismo determinó como

su visión “Para ejercer el dominio en el aire, el espacio y el ciberespacio, la Fuerza Aérea será innovadora, polivalente, interoperable, líder y preferente regional, con alcance global y con capacidades disuasivas reales, permanentes y sostenibles” (Fuerza Aérea Colombiana, 2019).

En este sentido, para la FAC, liderar el poder aéreo y espacial es una misión que conlleva un reto institucional en temas de generación de doctrina y conducción de operaciones; siendo inherente al dominio del aire y el espacio, la protección de los intereses nacionales, el conocimiento de asuntos doctrinales, sociales, económicos y políticos relacionados con el ámbito operacional de la Fuerza y todos aquellos aspectos ligados con el acceso, uso, exploración y explotación del aire y el espacio ultraterrestre, que son posibles gracias al desarrollo tecnológico, el cual permite avanzar en el conocimiento de la tierra y del espacio exterior.

Especial atención mereció en el PEI de la Fuerza Aérea Colombiana, el establecer una estrategia integral cuyo pilar se fundamentará en la gestión humana, específicamente, en la gestión educativa, demostrando el interés de la institución por apalancar procesos de formación, capacitación, investigación, innovación y desarrollo tecnológico acordes a las expectativas de la Nación, preparando su talento humano para los retos impuestos en diferentes escenarios espaciales nacionales e internacionales. De esta manera, la FAC articuló el desarrollo espacial a sus objetivos estratégicos institucionales, proveyendo al sector defensa y al país con capacidades estratégicas al servicio de la Nación y la sociedad.

7.2. Comité de Asuntos Espaciales CAE

La Fuerza Aérea Colombiana dando respuesta a los compromisos adquiridos con la Comisión Colombiana del Espacio en 2006, creó el Comité de Asuntos Espaciales CAE mediante Resolución 126 del 07 de marzo de 2007, como órgano de consulta, coordinación, orientación, y planificación, responsable de conducir la ejecución de la política institucional para el desarrollo y aplicación de las tecnologías espaciales y coordinar la elaboración, planes, programas, proyectos y propuestas de decisión en este campo ante la Comisión Colombiana del Espacio (Fuerza Aérea Colombiana, 2007).

Dada la importancia de la temática espacial para la Fuerza Aérea, el 04 de mayo de 2016 mediante la Resolución 279 se incluyeron nuevos miembros al Comité y se actualizó el documento en varios de sus artículos (Fuerza Aérea Colombiana, 2016). Dos años después y posterior a un proceso de transformación organizacional sucedido en la FAC, se actualizó nuevamente, en esta ocasión mediante la Resolución 633 del 15 de agosto de 2018 (Fuerza Aérea Colombiana, 2018). Finalmente, el último cambio a este Comité se realizó el 13 de septiembre de 2019, mediante la Resolución 725, por medio de la cual se incluyeron nuevos miembros con capacidades en materia espacial (Fuerza Aérea Colombiana, 2019).

7.3. Oficina de Asuntos Espaciales OFAES

La Fuerza Aérea Colombiana adicional a la creación del Comité de Asuntos Espaciales, asignó en el 2007 a la Sección Gestión de la Estrategia del Departamento de Planeación Estratégica y a la Dirección de Ciencia y Tecnología de la Jefatura de Educación Aeronáutica, la responsabilidad de proyectar el plan de trabajo espacial institucional y desarrollar funciones de integración entre el Comité Técnico de la Comisión Colombiana del Espacio y el Comité de Asuntos Espaciales de la Fuerza Aérea.

Pasados los años y con diferentes proyectos espaciales en desarrollo, la FAC determinó mediante la Disposición 603 del 04 septiembre de 2013, la creación del Departamento de Asuntos Espaciales EMAES, liderado por el Segundo Comandante y Jefe de Estado Mayor de la Fuerza Aérea Colombiana, asignándole como responsabilidad el conducir las actividades de desarrollo espacial de la institución (Fuerza Aérea Colombiana, 2013). En el 2017 y posterior a un proceso de transformación organizacional, se creó la Oficina de Asuntos Espaciales OFAES, mediante la Disposición 030 del 10 de agosto de 2017, subordinada directamente del Comando de la Fuerza Aérea, demostrando de esta manera la enorme importancia que el tema espacial representa para la institución (Fuerza Aérea Colombiana, 2017).

La Oficina de Asuntos Espaciales tiene como responsabilidad dirigir y coordinar las actividades, programas y políticas del desarrollo espacial institucional y sectorial, para promover el desarrollo científico y tecnológico espacial del país; generar el plan de acción espacial de la institución y asesorar al Comandante de la FAC, con el fin de conducir las acciones que permitan alcanzar una capacidad espacial estratégica del sector defensa; asesorar la formulación y actualización de la política y lineamientos institucionales y nacionales en temática espacial aplicados al Estado colombiano, para coadyuvar en el desarrollo social y económico del país, y garantizar la soberanía e integridad territorial; establecer, conducir y evaluar los programas, proyectos y actividades de desarrollo espacial institucional y nacional en coordinación con las áreas de la institución relacionadas con la actividad espacial, con el objeto de lograr el desarrollo de capacidades científicas, tecnológicas, educativas, industriales y de servicios, que posicionen la institución como un actor de desarrollo espacial nacional e internacional; participar y representar a la institución ante los organismos y entes nacionales e internacionales de temática espacial, así como en los eventos y actividades relacionados con asuntos espaciales; optimizar el uso de los recursos e infraestructura espacial de la institución, para unificar el esfuerzo en la obtención de objetivos estratégicos; e impulsar la formación de alto nivel en temáticas espaciales y sus disciplinas afines, con el fin de permitir el desarrollo de capacidades espaciales autónomas del país.

7.4. Política Espacial FAC

Derivada de la estrategia y concepto espacial, la Fuerza Aérea Colombiana estableció en el 2018 su Política Espacial, por medio de la cual dio a conocer los lineamientos y directrices para todos los miembros de la institución en cuanto al desarrollo y temática espacial, estableciendo que:

El espacio exterior es reconocido como un escenario estratégico, con identidad y características propias, a través del cual se proyecta el poder nacional.

El dominio del espacio, así como el del aire, son una capacidad distintiva de la institución, por lo tanto, es una responsabilidad inherente a la Fuerza Aérea Colombiana el liderar el desarrollo espacial del sector defensa y del país, así mismo impulsar la industria nacional espacial, de manera que se provean soluciones a las principales necesidades que demanda la Nación mediante la aplicación de la tecnología espacial.

Los sistemas espaciales maximizan las características del poder aéreo tales como precisión, perspectiva, velocidad, alcance, maniobrabilidad, respuesta, autonomía y sensibilidad a condiciones ambientales, fortaleciendo la conducción de la estrategia militar en cualquier teatro de operaciones.

Se requiere adquirir, aprender, desarrollar, construir y emplear capacidades espaciales propias que garanticen la autonomía nacional, reduzcan la dependencia tecnológica, minimicen la brecha de conocimiento frente a naciones desarrolladas y optimicen el uso de los recursos disponibles.

Se identifican cinco líneas estratégicas sobre las cuales se proyecta el desarrollo espacial de la Fuerza Aérea, como son: operaciones espaciales, gobernanza en temática espacial, cooperación internacional, proyectos e infraestructura espacial y formación del talento humano.

Las iniciativas y actividades que se realicen dentro de las cinco líneas estratégicas de desarrollo espacial deben garantizar la autonomía de la Fuerza Aérea en cuanto al acceso, explotación y control del espacio; liderando la conducción de la estrategia espacial del sector defensa; operando activos espaciales; proveyendo soluciones y aplicaciones espaciales duales (militar y civil); y convirtiéndose en autoridad y referente nacional en materia espacial.

Para cumplir los lineamientos establecidos en su Política Espacial, la Fuerza Aérea asignó tareas específicas a tres dependencias: a la Oficina de Asuntos Espaciales, la responsabilidad de formular y evaluar los planes, programas, proyectos e iniciativas que permitan su implementación, así como representar a la Fuerza Aérea en cualquier escenario en temática espacial; al Comité de Asuntos Espaciales, la integración y articulación del esfuerzo institucional en materia espacial; y a la Subjefatura de Estado Mayor de Estrategia y Planeación, la responsabilidad

de garantizar los recursos e integrar los proyectos e iniciativas espaciales dentro de la organización.

7.5. Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales CITAE

El Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales CITAE tiene como objetivo el fomento de la investigación aplicada, la innovación, el desarrollo y la transferencia tecnológica bajo un enfoque interdisciplinario, materializando proyectos de investigación, desarrollo e innovación orientados a la solución de necesidades específicas relacionadas con el Programa Espacial de la FAC. El CITAE busca posicionarse como referente y líder de las operaciones satelitales colombianas, integrando en este programa la triada del desarrollo: Estado, academia y empresa privada; brindando a la comunidad académica la oportunidad de acceder e interactuar con activos espaciales y adelantando un esfuerzo de socialización de los beneficios del uso y aplicación de las tecnologías espaciales en diferentes sectores productivos y sociales del país (Rincón, 2019).

El CITAE busca constituirse en un centro de investigación de excelencia referente a nivel local, nacional e internacional, con identidad innovadora, integrador de capacidades y con personal altamente calificado en todas las líneas de investigación del ámbito espacial en beneficio del desarrollo espacial del país. A través del CITAE la Fuerza Aérea se proyecta como una institución de alto nivel tecnológico que desarrolla iniciativas de investigación en el Programa Espacial de la FAC y posee capacidades como: comando, control y monitoreo satelital; procesamiento de imágenes; diseño de sistemas satelitales; integración de sistemas de lanzamiento; infraestructura; y metodología de investigación.

En cuanto al comando, control y monitoreo satelital, posee la capacidad de operar, monitorear y controlar el nanosatélite FACSAT-1 desde la estación terrena ubicada en la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”, adelantando la captura de imágenes de áreas de interés tanto del territorio colombiano, como del mundo, que se constituyen en materia prima para la generación de cartografía, vigilancia forestal, medio ambiente, recursos hídricos y minería ilegal, entre otros.

Con relación al procesamiento de imágenes, realiza análisis de grandes infraestructuras, de vegetación en áreas de gran extensión que permiten la cuantificación y estadística de cambios en la cobertura terrestre, de áreas oceánicas y de recursos hídricos; así mismo adelanta estudios de comparación de resolución espacial entre las imágenes del FACSAT-1 e imágenes SENTINEL-2 y LANDSAT-8 y desarrolla una Red Neuronal Artificial para la detección de patrones de minería ilegal.

En referencia al diseño de sistemas satelitales, contribuye a la apropiación del conocimiento y ejecución de misiones satelitales, generando doctrina, divulgación científica e impulsando desde la academia el desarrollo de la industria espacial colombiana.

La capacidad de integración de sistemas de lanzamiento contempla el desarrollo experimental de sistemas de propulsión, componentes de cohetes y estructuras que permitan en el largo plazo, el lanzamiento de cohetes equipados con cargas útiles a la órbita baja de la tierra.

En cuanto a las capacidades relacionadas con infraestructura, el CITAE administra laboratorios de diseño mecánico, de electrónica, de análisis estructural, de vuelo virtual, de materiales, de geomática y de telemática; así mismo cuenta con un hangar para desarrollar investigaciones, túnel de viento, área de pruebas de motores, cuarto limpio y estación satelital terrena.

Con relación a la metodología de investigación, posee la capacidad para estructurar y ejecutar proyectos de investigación, desarrollo e innovación en alianza con entidades académicas y empresas nacionales e internacionales, desarrollando elementos electrónicos integrados, software y cargas útiles, entre otros. Así mismo cuenta con un programa de transferencia tecnológica y de conocimientos en el ámbito espacial, en el cual oficiales, suboficiales, docentes y cadetes de la FAC, se entrenan en la operación de activos espaciales y la investigación aplicada.

7.6. Programa FACSAT

El Programa FACSAT es una iniciativa de la Fuerza Aérea Colombiana que a través de una serie de satélites busca alcanzar un elevado

grado de conocimiento de las tecnologías espaciales, siendo el nanosatélite FACSAT-1 el primero en órbita. Los futuros satélites contemplan versiones mejoradas de éste, de manera que exista continuidad en cuanto a tecnología espacial, fomentando la generación de conocimiento y el surgimiento de un nuevo sector productivo en el país.

Con este enfoque de desarrollo tecnológico y en cumplimiento a la visión de la FAC, a las 04:28 horas UTC del 29 de noviembre de 2018, 23:28 hora local de Colombia del 28 de noviembre de 2018, se realizó el lanzamiento al espacio y puesta en órbita del FACSAT-1, primer nanosatélite de la Fuerza Aérea Colombiana, con la misión de obtener imágenes de la tierra desde el espacio, el cual es controlado desde la estación satelital terrena en la Escuela Militar de Aviación, en Cali, Valle del Cauca. El lanzamiento fue realizado desde el Centro Espacial Satish Dhawan SDSC, ubicado en Sriharikota, India, a bordo del cohete PSLV-C43 de la Indian Space Research Organization ISRO (nombre y siglas en inglés) (Infoespacial, 2018); en su camino al espacio estuvo acompañado de un satélite, un microsatélite y 28 nanosatélites más (Corredor, 2019). Desde su órbita está en capacidad de completar una vuelta alrededor del planeta en aproximadamente 90 minutos. El lanzamiento del FACSAT-1 materializó la intención de la FAC de adelantar la explotación del espacio ultraterrestre para garantizar no sólo el desarrollo sostenible del país, sino para contribuir en la Defensa y Seguridad de la Nación (Fuerza Aérea Colombiana, 2013).

El Satélite de Observación de la Tierra FACSAT-1 es el primer satélite del gobierno colombiano en el espacio. Este satélite tipo cubesat de tres unidades (Cubesat 3U) fue fabricado por la compañía danesa GOMspace, posee un peso aproximado de 4 kilogramos, cuenta con una vida útil de 3 a 5 años y está dotado con una cámara óptica que le permite adquirir imágenes de cualquier punto del planeta desde su órbita ubicada a 505 kilómetros sobre la superficie terrestre. El FACSAT-1, es el primero de una serie de satelitales que desarrollará la Fuerza Aérea para Colombia, visualizando que en los futuros proyectos satelitales FACSAT-2 y FACSAT-3, el Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales CITAE participe en la construcción de los satélites, diseño

de la misión, ingeniería de sistemas, desarrollo de una carga útil propia y fabricación de partes en el país (Corredor, 2019).

El FACSAT-1, tiene como propósito cumplir labores de observación de la superficie terrestre con dos objetivos principales. El primero de ellos, adelantar la gestión del conocimiento e interacción de los profesionales colombianos con las tecnologías satelitales, esto quiere decir, reducir la brecha de acceso a estas tecnologías, brindando herramientas para integrar equipos de trabajo multidisciplinarios en torno al medio ambiente espacial, como lo es la operación de la estación satelital terrena, del satélite y el procesamiento de la información adquirida. Capacidad que hasta el momento era limitada para los nacionales colombianos, y que hoy en día está al alcance de la academia a través del proyecto FACSAT-1.

El segundo objetivo es completamente operacional y está relacionado con las capacidades del satélite en órbita y su alcance, que supera los límites impuestos por las fronteras terrestres dada su característica de visión superior desde el espacio. Por lo anterior, al ser un satélite de observación de la tierra equipado con un sensor óptico, le permite el cubrimiento de la totalidad del territorio nacional y del planeta mismo, así como la adquisición autónoma de imágenes de la superficie terrestre que son la materia prima para adelantar los procesos de procesamiento y almacenamiento de imágenes y datos, que permiten generar productos, servicios y aplicaciones en beneficio de áreas y sectores como el de medio ambiente, gestión y prevención del riesgo, agricultura y la administración de recursos no renovables, entre otros.

Como se menciona en la edición 293 de la Revista Aeronáutica, El FACSAT-1 es un punto de partida y no de llegada. Es el primer paso de un programa del mismo nombre que espera contar con varias iteraciones, que permitan a la FAC adquirir mayor capacidad, además servirán de plataformas de validación de nuevas tecnologías para dar solución a problemas del país. La puesta en funcionamiento permite el entrenamiento y desarrollo de capacidades en ciencia y tecnología a través de la transferencia de conocimientos, oportunidades de investigación académica, ahorro financiero y cooperación internacional (Corredor, 2019).

8. Conclusiones

El espacio exterior es un recurso natural y polo de desarrollo tecnológico y comercial disponible para el uso pacífico de las naciones, que brinda oportunidades de posicionamiento, visibilidad y reconocimiento internacional. Por lo anterior, la presencia en el espacio es reconocida a nivel mundial como uno de los indicadores de capacidad tecnológica y de desarrollo de un país, razón por la cual la Fuerza Aérea Colombiana concibe el fortalecimiento de su poder espacial como un objetivo de primer orden y una prioridad en su estrategia institucional, con la cual visualiza el cumplimiento de su misión constitucional, mientras funge como integrador de las capacidades del Estado, la academia y la empresa privada en torno al desarrollo espacial del país.

En este sentido, las capacidades, experiencia y doctrina espacial de la FAC y en especial el Programa FACSAT con su primer nanosatélite en órbita, se constituyen en un potencial punto de partida para estructurar una estrategia nacional espacial que contenga los conceptos de innovación, emprendimiento y desarrollo tecnológico contenidos en el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022.

De igual manera y entendiendo como el poder espacial se ha convertido en un componente fundamental de la Estrategia de Seguridad y Defensa de los países que lo poseen, soportando el planeamiento, conducción y sostenimiento de las operaciones militares en todo nivel, la Fuerza Aérea Colombiana ha incorporado tecnologías espaciales que permiten soportar a través del uso del poder espacial la conducción de la estrategia de seguridad y defensa de la Nación.

Como idea final de este capítulo; Colombia, después de tres intentos de adquisición de sistemas satelitales, de numerosos esfuerzos por desarrollar el espacio a través de diferentes instituciones, de dos proyectos de pequeños satélites, incluyendo el FACSAT-1 en órbita; posee un pensamiento estratégico y crítico con relación al poder espacial, que le permite proyectar una estrategia sólida de acceso, uso,

exploración y explotación del espacio para satisfacer las necesidades e intereses del pueblo colombiano, cumpliendo con el compromiso adquirido de hacer uso del espacio de manera pacífica y en bien de la humanidad, y anticipando soluciones tecnológicas a los desafíos que impone la rápida y constante evolución de nuestro mundo.



ANÁLISIS DE LA POLÍTICA ESPACIAL COLOMBIANA: UNA PERSPECTIVA DE DEFENSA Y SEGURIDAD*

BG. Carlos Fernando Silva Rueda

CR. Carlos Giovanni Corredor Gutiérrez

Carlos Enrique Álvarez Calderón

* Este capítulo hace parte del proyecto de investigación de la Maestría en Seguridad y Defensa Nacionales, Desafíos y Nuevos Escenarios de la Seguridad Multidimensional en el Contexto Nacional, Regional y Hemisférico en el Decenio 2015-2025, el cual hace parte del grupo de investigación Centro de Gravedad de la Escuela Superior de Guerra General Rafael Reyes Prieto, reconocido y categorizado en (A1) por COLCIENCIAS, con el código COL0104976.

1. Introducción

De acuerdo con Von Clausewitz, Howard, Paret y Brodie (1989), la complejidad de la guerra se fundamenta en la niebla, la incertidumbre y la fricción. “Mediante la explotación del espacio, la incidencia de estos tres conceptos se reduce en virtud de la capacidad de ver el entorno de la batalla y la preparación del adversario en tiempo real, incluyendo sus comunicaciones y movimientos” (Issler, 2000, p. v). De otro lado, el concepto de que “el espacio carece de fronteras y representa el apogeo con que todo líder soñó por siglos, el terreno más alto” (Schmitt, 2006, p. 94), revela la superioridad que un Estado puede obtener en el ámbito civil. Que el espacio exterior sea la última frontera física, no significa que es inalcanzable para un país en desarrollo y mucho menos cuando las posibilidades que ofrece su uso apoyarían de manera directa y eficiente las estrategias de seguridad y defensa.

Este concepto ha sido claramente entendido por Estados cuyos intereses pueden poner en riesgo la soberanía del territorio colombiano. Imagínese el siguiente escenario de un futuro hipotético: la crisis que vive un Estado limítrofe sigue generando violencia por parte de la población afectada por sus derechos insatisfechos de salud, alimentación y libertad. Lo único que continúa siendo afecto al gobierno decadente son sus fuerzas militares, que se han mantenido fortalecidas como único medio para preservar el poder del mandatario. El vecino gobierno, en un acto desesperado por desviar la atención del pueblo, busca revivir su nacionalismo, mediante incidentes fronterizos para provocar una reacción, aprovechando su conocimiento de la posición exacta de las autoridades

militares colombianas en frontera, debido a su capacidad de vigilancia desde un satélite de observación de la Tierra que toma imágenes sobre territorio colombiano, actualizadas en alguno de sus nueve sobrevuelos diarios en órbita polar. Este satélite, gracias a sus cámaras, registra imágenes precisas y en tiempo real con una resolución sub-métrica¹ de las capacidades de defensa colombianas: vehículos, aeronaves, embarcaciones, tropas, infraestructura, vías, ríos, instalaciones militares, etc.

Entretanto, Colombia ha solicitado a sus proveedores de servicios satelitales la toma de imágenes para rastrear el movimiento del potencial adversario. Dadas las circunstancias políticas y la presión de terceros, el costo de estos servicios aumenta, al tiempo que es restringido por potencias extranjeras cuyos intereses en la región están en juego; de modo que no está disponible en tiempo real. Lo mismo sucede con las comunicaciones satelitales de las unidades militares que se desplazan hacia los sitios críticos, que además se encuentran en lugares demasiado remotos para ser atendidos por las repetidoras de las montañas andinas; el resultado es una comunicación intermitente con las tropas. Tampoco las aeronaves remotamente tripuladas pueden enlazarse para cubrir todas las horas de vuelo que exige la situación operacional. No obstante, ese no es el caso del país vecino; su segundo satélite, de comunicaciones, provee desde su órbita geoestacionaria una cobertura de todo el teatro estratégico durante las 24 horas del día, garantizando la transmisión de órdenes y datos desde su capital.

Pues bien, el anterior supuesto estaría basado en las realidades de hoy y, aunque solo refleja un breve instante de lo que significa la carencia de una autonomía colombiana de capacidades espaciales, representa una debilidad inmensa en materia de seguridad y defensa nacional. Por ende, el propósito de este capítulo es poner al descubierto la efectividad de las políticas públicas colombianas referentes al uso del espacio ultraterrestre, para plantear la tesis de que lo que el Estado requiere es una política de Estado que conlleve a la creación de una capacidad autónoma de recursos espaciales, y no políticas de gobierno para soluciones funcionales sin una base estructural real y eficiente.

1 Nitidez de objetos que miden menos de 1 metro.

Para ello se examinan los antecedentes de la carrera espacial colombiana, sometiéndola a un análisis de política pública basado en la metodología de Velásquez (2017), contrastándola con los esfuerzos de países similares, para finalmente plantear recomendaciones a fin de encausar una política espacial que le permita a Colombia proyectarse estratégicamente, dada la importancia que esto representa para el desarrollo, la seguridad y la defensa del Estado.

2. Antecedentes de la política espacial colombiana

Aunque en capítulos anteriores se han expuesto aspectos relativos a los infructuosos esfuerzos por desarrollar y/o adquirir capacidades espaciales, este apartado los aborda desde una perspectiva diferente, buscando evidenciar a partir de los hechos, cómo la voluntad política ha moldeado el devenir del desarrollo espacial en Colombia.

2.1. El sector público

La historia entre Colombia y el espacio ultraterrestre no es nueva, ya que se remonta a un propósito gubernamental descrito en el documento del Consejo Nacional de Política Económica y Social² (CONPES) No. 1421, del 25 de marzo de 1977³, cuyo título fue “Proyecto de un Satélite Colombiano para Comunicaciones Domésticas”. El problema planteado en este documento consistía en la “falta de capacidad de conmutación y los indicios de una fuerte demanda represada, pero desafortunadamente se carece de modelos teóricos adecuados que permitan cuantificarla”

2 El CONPES aprueba o niega el otorgamiento de garantías por parte del Estado para la contratación de créditos externos, hace seguimiento a los planes sectoriales, regionales y urbanos, señala los criterios para la inversión extranjera, giro de utilidades al exterior por parte de las compañías multinacionales y recomienda cómo se deben redistribuir las utilidades de las empresas industriales y comerciales del Estado.

3 Para 1977 ya habían aterrizado en Marte el vehículo explorador ruso Mars y el norteamericano Viking. Y orbitaban alrededor de la Tierra las estaciones espaciales MIR y Skylab; además, Reino Unido, Francia, Canadá, Italia, Australia, Alemania, Japón, China, Holanda, España, India e Indonesia habían logrado colocar sus satélites en diferentes órbitas. Sin embargo, tan solo los Estados Unidos, la Unión Soviética, Francia, China y Japón tenían la capacidad lanzadora de cohetes.

(Centro de Investigación de las Telecomunicaciones -CINTEL-, 2009, p. 54). La estrategia del proyecto planteaba dos satélites, de los cuales el más urgente debía estar en órbita en 1980. Para ir un poco más lejos, se definieron además tres alternativas:

1. La adquisición por US\$107 millones de un satélite propio;
2. El alquiler de circuitos INTELSAT⁴ entre US\$144 y 307 millones o
3. La ampliación de la red de microondas y alquiler de INTELSAT para los Territorios Nacionales por US\$75 millones.

De acuerdo con el Dr. Alfredo Rey (quien en aquella época fue designado director del proyecto), la razón real para adelantarle era soportar la tesis defendida para entonces por parte de Colombia y otros países ecuatoriales, en cuanto a que la órbita geoestacionaria era un recurso natural escaso que les pertenecía a los países con territorio sobre el ecuador terrestre. Además, el proyecto tenía visto bueno para que Telecom⁵ contratara créditos hasta por US\$120 millones, de los cuales US\$44 millones serían para la adquisición del SATCOL-1, US\$18 millones para el lanzamiento y el resto para la infraestructura de tierra asociada. El proyecto alcanzó a ser licitado en 1982, pero ninguna de las dos ofertas cumplió con las exigencias, suspendiéndose definitivamente por conveniencia política puesto que el periodo de gobierno de Turbay Ayala (1978-1982) estaba por culminar, y éste no consideró oportuno dejarle la responsabilidad de la firma del proyecto a la siguiente administración gubernamental.

4 Entre 1961 y 2001, INTELSAT fue una organización de carácter intergubernamental que había tenido por objeto establecer una red mundial del sistema de comunicaciones por satélite, incorporando los principios establecidos en la Resolución 1721 de la XVI Asamblea General de las Naciones Unidas, que propicia que los medios de comunicación por satélite se encuentren a disposición de las naciones del mundo en forma universal y no discriminatoria. Actualmente, INTELSAT es una empresa privada y es considerada el mayor operador de satélites de comunicaciones del mundo.

5 Fue una empresa estatal colombiana de telecomunicaciones creada en 1947, como consecuencia de la nacionalización de las telecomunicaciones. Con el nombre de Empresa Nacional de Telecomunicaciones (TELECOM), ésta sería finalmente liquidada el 12 de junio de 2003, debido a pérdidas económicas; eventualmente reemplazada por Colombia Telecomunicaciones, empresa que más tarde fue adquirida por Telefónica de España y renombrada como Telefónica Colombia (actualmente, la filial colombiana de Movistar).

Es importante anotar que el propósito central del proyecto era conectar en materia de comunicaciones a las regiones apartadas de Colombia⁶. Sin embargo, habría que esperar hasta finales del siglo XX, cuando ante la creciente necesidad de conectividad, el Ministerio de las Telecomunicaciones de entonces (hoy Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC)), creó en el año 1999 los programas Compartel y Vive Digital, con el objetivo de implementar la estrategia de llevar servicios a zonas sin ninguna alternativa de comunicación, basada fundamentalmente en la adquisición de servicios satelitales a terceros.

Un amplio vacío se presenta entre este último esfuerzo y la creación, el 18 de julio de 2006, de la Comisión Colombiana del Espacio (CCE), mediante el Decreto 2442 del mismo año. Esta norma invoca las bondades de la utilización pacífica de las tecnologías espaciales, destacando la importancia de ellas en el desarrollo económico, social y cultural para la satisfacción de necesidades en diversos campos, incluyendo la seguridad. En ella, se le otorga la responsabilidad a la Vicepresidencia de la República de liderar una comisión intersectorial para orientar y coordinar la ejecución de una política nacional para el desarrollo y utilización de esas tecnologías. La Comisión se compone de una diversidad de entidades de varios ministerios que de una u otra forma están involucrados en el tema (Ministerio de Relaciones Exteriores, 2006). La Secretaría Ejecutiva de la CCE fue ejercida desde el año 2007 hasta el 2012 por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), en cabeza de su director, quien mostró mucho interés por fortalecer la producción de información geoespacial en las diferentes entidades del Estado y promover su intercambio, acceso y uso. Posteriormente, ejerció la Secretaría Ejecutiva la Fuerza Aérea Colombiana hasta 2016, buscando entre otros programas, la promoción para el desarrollo, diseño y lanzamiento de un nanosatélite⁷.

6 No obstante, se seguiría sin una solución autónoma 38 años después, provocando aún millonarias inversiones anuales en alquiler de servicios satelitales.

7 Clasificación de satélites por su peso: grandes satélites (cuyo peso sea mayor a 1.000 kilogramos); satélites medianos (cuyo peso sea entre 500 y 1000 kilogramos); minisatélites (cuyo peso sea entre 100 y 500 kilogramos); microsatélites (cuyo peso sea entre 10 y 100 kilogramos); nanosatélites (cuyo peso sea entre 1 y 10 kilogramos); picosatélite (cuyo peso sea entre 0,1 y 1 kilogramos); y femtosatélite (cuyo peso sea menor a 100 gramos).

Con su creación en 2006, la CCE se estructuró, y sus participantes construyeron iniciativas que se afianzaron dentro de cada uno de los siete grupos de trabajo: Navegación Satelital; Observación de la Tierra; Astronáutica, Astronomía y Medicina Aeroespacial; Gestión del Conocimiento e Investigación; Telecomunicaciones; Asuntos Políticos y Legales e Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales. Los primeros acuerdos se centraron en la organización de la Comisión, Lineamientos de la Política Espacial, Plan de Acción, y el “respaldo de alto nivel para impulsar el desarrollo de proyectos satelitales”, dando con este último un nuevo nacimiento al Programa Satelital Colombiano (PSC). Es importante destacar el trabajo de los siete grupos; ellos han venido desarrollando la teoría de la aplicación de tecnologías espaciales a la realidad nacional, construyendo un pilar de conocimiento que es fundamental para soportar el sistema. Pero, por falta de un presupuesto autónomo, estos esfuerzos se han quedado solo en documentos, sin muchas probabilidades de ser materializados.

En el año 2007, el IGAC firmó un convenio con Colciencias y el Centro Internacional de Física (CIF), con el fin de asociar esfuerzos para promover un “Programa de Investigación en Desarrollo Satelital y Aplicaciones en el Tema de Observación de la Tierra.” Dos años más tarde, presentó el Programa Nacional de Observación de la Tierra (PNOT), como un proyecto financieramente apalancado por el CONPES 3683⁸, con recursos del orden de \$350 millones de pesos. (CONPES 3683, 2010). Así las cosas, combinar el PNOT con el PSC, permitiría primero, estructurar el proyecto y estudiar su viabilidad; segundo, diseñar, construir y poner en órbita un satélite; y tercero, desarrollar investigaciones con base en el prototipo. El impulso de esta iniciativa duró poco más de un año, al producirse el cambio en la Vicepresidencia de la República.

Pese a que el MinTIC también hacía parte de la CCE, esa cartera presentó una iniciativa diferente con el ánimo de cumplir los objetivos de conectividad de las regiones apartadas. El fracaso del SATCOL-1 a principios de la década de 1980 limitó en gran medida el desarrollo de

8 En este documento, el IGAC hace alusión a las debilidades de la CCE, y a la falta de una formulación clara de la política nacional para el uso de las tecnologías espaciales.

las regiones más apartadas del país, puesto que obligó a desarrollar redes de comunicación terrestres, que, debido a la geografía nacional y a la situación de orden público del siglo pasado, no podían ofrecer la cobertura requerida.

Es así como el Gobierno nacional expidió en marzo de 2009 el Documento CONPES 3579, Lineamientos para Implementar el Proyecto Satelital de Comunicaciones de Colombia. Como en 1977, planteó que las comunicaciones satelitales eran la única alternativa para facilitar el acceso a éstas desde los sitios remotos de la geografía nacional y fijó la meta de garantizar la disponibilidad de tal recurso en el año 2019. Hizo énfasis en el mandato constitucional y las leyes que definen el deber de promover la cobertura de servicios de telecomunicaciones. Se soportó en el Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010, que preveía el aprovechamiento de las tecnologías del espacio. Su objetivo era asegurar la disponibilidad de capacidad satelital mediante la adquisición de un satélite propio o la alternativa de un arrendamiento de largo plazo; los recursos ascendían a cerca de US\$235 millones. Este documento se complementó con el CONPES 3613 de septiembre del mismo año, en el que se daban instrucciones específicas al MinTIC de adelantar un proceso contractual para la adquisición del satélite de comunicaciones. En él, se hacía mención particular a un estudio hecho por el ministerio que determinó la viabilidad del proyecto, toda vez que, en un horizonte de 15 años, la construcción, lanzamiento y operación del satélite en 2012 representaría un ahorro de alrededor de US\$165 millones (CONPES, 2009). El cronograma del satélite colombiano de telecomunicaciones, proyectado para una vida útil de 15 a 18 años, fue el siguiente (CINTEL, 2009, p. 55):

- Contratación de asesoría especializada para acompañar el proceso: julio de 2009.
- Apertura de la licitación: agosto de 2009.
- Cierre, evaluación y selección: octubre de 2009.
- Firma del contrato: noviembre de 2009.
- Lanzamiento: primer semestre de 2012.

En diciembre de 2009, el MinTIC declaró desierta la licitación del Satélite Colombiano (SATCOL), proyecto valorado en más de \$500 mil millones de pesos, debido a que las propuestas no cumplieron con los requisitos técnicos y jurídicos. Una nueva licitación en 2010 fue también declarada desierta por las mismas razones, y el proyecto finalmente se hundió con la decisión del MinTIC de desarrollar la conectividad del país a través de fibra óptica (eltiempo.com, 2010). A partir de entonces, el Proyecto Nacional de Fibra Óptica se erigió como la bandera del sector TIC para proveer con conectividad y cerrar la brecha digital en las regiones del país. Este proyecto terminaría beneficiando a la fecha a 1.073 municipios de Colombia y 1.808 instituciones públicas; los municipios no incluidos en el proyecto, según el MinTIC, serán beneficiados con el Proyecto Nacional Conectividad de Alta Velocidad, enfocado principalmente en las regiones de la Orinoquía, la Amazonía y el Pacífico.

El reemplazo del programa Compartel se daría por cuenta de los Kioscos Vive Digital (KVD) y los Puntos Digitales (PD), implementados en el primer periodo del gobierno de Juan Manuel Santos (2010-2014). En el pasado, el programa Compartel operaba más de 17 mil puntos y actualmente los KVD y los PD operan 3.346 conectados satelitalmente. Sin embargo, el problema con este tipo de programas radica principalmente en su sostenibilidad, como indicó el MinTIC respecto a la situación del programa al inicio del actual gobierno de Iván Duque (2018-2022): “se requerían aproximadamente \$100 mil millones de pesos para conectar los kioscos hasta diciembre de 2018, y solo encontramos \$14 mil millones en las cuentas del ministerio para sostenerlos” (Arango, 2019)⁹.

Regresando a la línea de tiempo, el cambio de gobierno en agosto de 2010 trajo consigo la ralentización de los programas satelitales; no obstante, el vicepresidente Angelino Garzón mantendría un especial interés por el tema, proponiendo la creación de una Agencia Espacial

9 En este punto es importante aclarar que la posición de los autores no es defender el satélite de comunicaciones como la única forma de conectar las regiones del país, sino evidenciar que ha existido la concepción errónea de que el Estado debe elegir entre invertir en redes terrestres o en satélites, dejando las dos alternativas como mutuamente excluyentes. La realidad es muy distinta, puesto que se trata de tecnologías complementarias, que deberían ser articuladas adecuadamente por los Estados con el fin de proveer los servicios públicos esenciales que requiere la población.

Colombiana, a fin de generar, con una autonomía presupuestal, el polo de desarrollo de la astronáutica y la industria satelital que requería el país. Sin embargo, esta propuesta fue desestimada por la Alta Consejera Presidencial de la época, recomendando, por razones de estructuración legal, la creación de un Programa Espacial a cambio de la Agencia. En consecuencia, el Decreto 2516 de 2013 crearía el Programa Presidencial para el Desarrollo Espacial Colombiano (PPDEC), con el fin, entre otras cosas, de proponer la política nacional espacial y las acciones y estrategias que fomentasen ese desarrollo. Al año siguiente, el Decreto 1649 de 2014 eliminaría el PPDEC y crearía la Dirección para Proyectos Especiales, como apoyo a las funciones del vicepresidente, asignándole la orientación y promoción del Plan Estratégico de Desarrollo Espacial. En agosto de 2014, se inició el segundo periodo presidencial de Juan Manuel Santos (2014-2018), con un nuevo vicepresidente, Germán Vargas Lleras. En septiembre, el Ejecutivo toma la decisión de detener la compra del satélite de observación de la Tierra colombiano bajo la lógica de que constituía una inversión innecesaria para el país, toda vez que el gasto en imágenes satelitales ascendía anualmente a US\$11.5 millones, mientras el costo de la adquisición de un sistema satelital de siete años de vida útil era de US\$250 millones, lo cual habría sido una inversión excesiva comparada con la tradicional compra de información (el tiempo.com, 2014). Esta decisión obligaría a repensar el panorama y, con las nuevas tecnologías, surgió la idea de buscar la posibilidad de contar no con un satélite de alto costo, sino con una constelación de pequeños satélites que en conjunto cumpliesen con las necesidades de Colombia. Pero estas necesidades, cuyo inventario se solicita a todas las entidades del Estado, son difíciles de definir, principalmente por la falta de interés de estas mismas entidades.

En 2015 habría más cambios: el Decreto 0470 modificaba la normatividad, asignando al director del Departamento Administrativo de la Presidencia las funciones de orientación y promoción del Plan Estratégico de Desarrollo Espacial, quitándole esa responsabilidad a la Vicepresidencia. Sin embargo, este director no asumió la presidencia de la CCE, quedando acéfala por espacio de un año; solo hasta el 2 de mayo de 2016, mediante Decreto 724, se trasladó la responsabilidad de “orientar

y promover la formulación del Plan Estratégico de Desarrollo Espacial y la ejecución de planes derivados, programas y proyectos relacionados con el Desarrollo Espacial Colombiano, la coordinación interinstitucional e intersectorial que contribuya al Desarrollo Espacial Colombiano” (Presidencia de la República, 2016, p. 6), al Alto Consejero Presidencial para el Posconflicto, Derechos Humanos y Seguridad, quedando por tanto facultado como presidente de la CCE, y el Director de Seguridad de dicha oficina, fungiendo como Secretario Ejecutivo.

Afortunadamente, en la actualidad, la CCE está sesionando nuevamente, gracias al liderazgo de la vicepresidenta Marta Lucía Ramírez; se está adelantando un documento de política pública en forma de un CONPES que busca aprovechar las ventajas de la tecnología espacial para mejorar la productividad, así como la diversificación y sofisticación del aparato productivo nacional.

2.2. El sector privado: la Academia y la Industria

De manera paralela, el sector privado colombiano ha adelantado esfuerzos por alcanzar el espacio ultraterrestre. La Universidad de Los Andes, desde su facultad de Ingeniería, viene trabajando desde el año 2002 en modelos experimentales en el campo de la propulsión de cohetes con combustible líquido y sólido. Esta iniciativa, conocida como Proyecto Uniandino Aeroespacial (PUA), incluye la construcción de plataformas experimentales, vehículos experimentales, un centro de control y comando, y los sistemas complementarios para la misión (Universidad de Los Andes, 2016). En algunas ocasiones se ha asociado con la Universidad San Buenaventura y su programa de Ingeniería Aeroespacial.

La CCE y la Fuerza Aérea Colombiana han apoyado varias de estas misiones, las cuales no dejan de ser más que la materialización de trabajos de grado de estudiantes para afianzar sus conocimientos, sin que representen parte de un proyecto nacional robusto. Sus mayores logros han consistido en el lanzamiento de pequeños cohetes y, recolección y transmisión de datos balísticos de los eventos experimentales con fines académicos.

En el año 2004, profesores y estudiantes de la Universidad Sergio Arboleda, con su Escuela de Ciencias Exactas e Ingeniería y el Obser-

vatorio Astronómico, iniciaron un proyecto satelital. Diseñaron, construyeron y ensamblaron un picosatélite bautizado Libertad I, que fue lanzado desde el cosmódromo de Baikonur el 17 de abril de 2007. El satélite, de tipo experimental, envió exitosamente datos relacionados con su estado e integridad. La Universidad persigue el objetivo de construir el Libertad II, que, cofinanciado por Colciencias, busca la apropiación de conocimiento en sistemas de energía y orientación para pequeños satélites. Este satélite, de mayor tamaño al Libertad I, podrá capturar imágenes de la Tierra que logren ser utilizadas con fines científico-ambientales, y estará orientado al Sol para recargar sus baterías y tener una vida útil superior. No se ha fijado una fecha de lanzamiento todavía.

Dos de los participantes en el proyecto Libertad, vieron la oportunidad de desarrollar una industria satelital y fundaron Sequoia Space en 2008. Entendieron que el mercado no demandaba satélites sino misiones espaciales completas, de manera que en la actualidad diseña picosatélites y sus sistemas de control, gestiona su lanzamiento, y capacita al personal que utiliza estos equipos. Los principales clientes de Sequoia Space son las áreas de gestión del clima, de agricultura y de desastre, de gobiernos y fuerzas armadas latinoamericanas (iNNpulsa Colombia, 2017). El 8 de enero de 2014 esta empresa lanzó, utilizando un cohete de la NASA, el satélite peruano UAPSAT, diseñado y construido en asocio con la Universidad Alas Peruanas (Colombiainn, 2013).

2.3 La Fuerza Aérea Colombiana

Con la misión específica de definir, orientar y articular el programa y una política espacial institucional, la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) creó desde el año 2012, el Departamento de Asuntos Espaciales. Paralelamente a su participación en la CCE, la FAC llevó a cabo el lanzamiento de un nanosatélite de observación de la Tierra en el año 2018, y está preparando su segundo nanosatélite para 2021. Con este sistema, adquirido en su totalidad con recursos propios, busca dar inicio al desarrollo de capacidades y uso de tecnologías espaciales con fines de seguridad y defensa. La FAC es un usuario continuo de servicios satelitales de terceros, bajo la modalidad de contratación de servicios para fines de inteligencia

y georeferencia, que se viene utilizando en el marco del conflicto interno y constituye un inmenso valor para proporcionar ventajas estratégicas y tácticas ante un potencial adversario.

3. Análisis de la Política Espacial Colombiana

A continuación, se presenta un análisis de la política pública sobre el desarrollo espacial colombiano, bajo la metodología propuesta por Velásquez (2017); en él se abordan cinco partes significativas:

1. El reconocimiento de los elementos que componen la definición de una política pública, lo cual permite determinar qué tan eficiente fue la narrativa mediante la cual se formuló.
2. La aplicación de tipologías, que busca entender los propósitos explícitos e implícitos, transparentes y ocultos de la política pública.
3. La aplicación del modelo “Bote de Basura”, en cuya matriz se observan y valoran las diversas decisiones tomadas en torno de la política con el fin de agregarlas a la agenda.
4. Las racionalidades de la política, que definen los conceptos de optimización que se utilizaron para satisfacer el cumplimiento de los objetivos.
5. El análisis sistémico de sensibilidad, que categoriza las causas de un problema particular, definiendo la dependencia e influencia mutua de estos factores, y permitiendo identificar la criticidad y así formular soluciones aplicables.

Esta metodología, permite entender no solo el alcance de su formulación, sino también efectuar una evaluación del impacto que ha tenido su aplicación, con el ánimo de proyectar cambios o mejoras, de manera que los objetivos de la política lleguen a alcanzarse con mayor eficiencia.

Es importante aclarar que, si bien no existen documentos que transcriban la Política Espacial Colombiana de manera literal, sí se han constituido esfuerzos concretos tendientes a apoyar la tácita “Política Nacional para el Desarrollo y Aplicación de Tecnologías Espaciales”

(Ministerio de Relaciones Exteriores, 2006). Extractando de los documentos oficiales, decretos, actas, CONPES, acuerdos, presentaciones, decisiones y acciones a lo largo de 40 años, hoy podría afirmarse que la política pública espacial de Colombia consiste en alcanzar la disponibilidad de una capacidad satelital propia para facilitar el cumplimiento de planes y programas de telecomunicaciones y observación de la Tierra con fines económicos, sociales, de seguridad y defensa.

Para desarrollar la primera parte, conviene aclarar la definición de política pública: Proceso integrador de decisiones, acciones, inacciones, acuerdos e instrumentos adelantado por autoridades públicas, con la eventual y a veces obligatoria participación de los particulares, y encaminado a intervenir situaciones definidas como problemáticas o a materializar las deseables. La política pública hace parte de un ambiente determinado del cual se nutre y al cual pretende modificar o mantener. (Velásquez, 2017)

Con esta base, se identifican los elementos constitutivos de la política pública así:

Tabla 1. Reconocimiento de los elementos de la definición de la política espacial colombiana

Primera parte Reconocimiento de los elementos de la definición de Política Espacial Colombiana	
Elemento	Aplicación
Actores	Autoridad pública: Vicepresidencia de la República, Dirección Administrativa de la Presidencia, Oficina del Alto Comisionado para el Posconflicto, Comisión Colombiana del Espacio (CCE), Ministerios de Relaciones Exteriores, Defensa, Educación, TIC, Interior, Agricultura, Transporte, Ambiente, Minas y Energía, Dpto. Nacional de Planeación, Fuerza Aérea Colombiana, Aerocivil, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Entidades privadas: Universidad Sergio Arboleda, Centro Internacional de Física.

Situación definida como problemática que se pretende prevenir, solucionar, mitigar.	Los sitios remotos del territorio colombiano no tienen redes de interconexión de TIC, siendo las tecnologías satelitales la única opción. El comportamiento actual y futuro del mercado de tecnologías espaciales no permite garantizar la disponibilidad de la capacidad satelital que requiere el Estado en los volúmenes y tiempos necesarios. Se requiere un segmento satelital de 54,5 transpondedores para el año 2019 (CONPES, 2009).
Situación definida como deseable que se pretende alcanzar.	La utilización de un satélite colombiano como alternativa para futuros ensanches en la red de telecomunicaciones del país (CONPES, 1977).
Principales objetivos Objetivos ocultos	Asegurar la capacidad de disponibilidad satelital para proveer la conectividad de las regiones y zonas apartadas y generar condiciones que favorezcan la soberanía en los territorios (CONPES, 2009). Promover la investigación científica y el desarrollo tecnológico nacional.
Principales instrumentos con los que se busca cumplir los resultados.	Creación de una entidad que coordine los esfuerzos requeridos. Adquisición de un satélite de comunicaciones fijas propio (segmento satelital), y/o alquiler a largo plazo, mediante contratación de créditos externos, en 2009 correspondientes a \$507.303 millones de pesos. Adquisición de una estación terrena (segmento terrestre), principal y alternativa para control y recepción de datos. Consecución del Recurso Orbita Espectro (ROE) ¹⁰
Ambiente de la política, elementos sociales, políticos, económicos que la afectan	El impulso que se da a la CCE depende del interés que le dé la Vicepresidencia. La primera administración le dio vida, la segunda intentó infructuosamente elevarla a Agencia, la tercera le restó toda importancia para favorecer otros intereses políticos. En la actualidad, es un órgano burocrático carente de liderazgo y presupuesto que subsiste únicamente por los intereses particulares de cada una de las organizaciones miembros. Los recursos que eventualmente podrían destinarse continúan siendo empleados para la contratación de servicios a terceros, y los de desarrollo científico son mínimos.

Fuente: Elaboración propia.

10 El Recurso Orbita Espectro (ROE), es el recurso natural constituido por la órbita de los satélites geoestacionarios u otras órbitas de satélites, y el espectro de frecuencias radioeléctricas atribuido o adjudicado a los servicios de radiocomunicaciones por satélite por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).

En la segunda parte del análisis, se confronta la naturaleza práctica de la política con la teoría existente, permitiendo evaluar la coherencia entre su formulación y la realidad, así como el impacto generado hasta el momento.

Tabla 2. Aplicación de las tipologías a la Política Espacial Colombiana

Segunda parte Aplicación de las tipologías a la Política Espacial Colombiana	
Tipo	Aplicación
Según la relación con otras políticas o nivel de agregación	Es una política <u>micro</u> . Pues hace parte de políticas mayores del Estado, tales como la de conectividad del territorio y uso de tecnologías.
Según permanencia en el tiempo	Pese a que ha subsistido por dos administraciones, ha sido política de Gobierno, debiendo ser de Estado por el alcance estratégico que puede generar.
Según el interés que busque materializar y la manera de hacerlo	No puede catalogarse como virtuosa, porque sus soluciones no demuestran ser sostenibles. Es una política vergonzosa, porque a pesar de que busca la satisfacción de intereses colectivos, los diagnósticos y soluciones han sido inapropiados a la luz del conocimiento y prácticas vigentes. Ha fallado en la estrategia de comunicación para movilizar actores y a la sociedad.
Según su grado de configuración	Es una política difusa, pues requiere un gran esfuerzo de investigación para definirla y establecer las relaciones entre sus componentes y el ambiente.
Según su complejidad	Es una política compleja, donde no se pueden calcular soluciones apelando al pasado, pero además enredada, pues su diseño institucional dificulta su funcionamiento.
Según la jurisdicción	Es una política nacional con impacto internacional.
Según los resultados	Es una política inacabada, ya que, por las deficiencias presentadas durante su formulación o implementación, ha fracasado en el cumplimiento de sus objetivos.

Segunda parte Aplicación de las tipologías a la Política Espacial Colombiana	
Tipo	Aplicación
Según el tipo de acuerdo societal	Es una política básica, que refleja los intereses del proyecto político dominante del momento.
Según el impacto en la sociedad y el nivel de conflictividad generada	Es una política redistributiva de los recursos existentes, razón por la cual ofrece conflicto su aprobación.
Según su contenido	Es una política material, por su naturaleza fáctica. Los resultados se verán tangiblemente en comunicaciones, imágenes, sistemas y desarrollos científicos.
Según el sector de la administración tradicional	Es una política de apoyo a la organización social. Atiende al sector de tecnologías y comunicaciones, pero en el largo plazo se beneficia la educación, la salud, la ciencia, la seguridad y la defensa.
Según el grupo poblacional que se atiende	En el mediano plazo atiende a la población rural y alejada del centro, en el largo plazo a toda la sociedad, mediante el impacto indirecto de sus beneficios.

Fuente: Elaboración propia.

Toda política pública es dinámica; por tanto, la tercera parte del análisis busca evaluar los cambios que ha sufrido ésta en tres niveles de incrementalismo que suelen traducirse en inestabilidad, lo cual beneficia o perjudica el alcance de objetivos. En esa misma medida, su problemática evolutiva se inserta a la agenda (como prioridad), o no, de un gobierno.

Tabla 3. Aplicación del modelo del Bote de Basura a la Política Espacial Colombiana

Tercera parte				
Aplicación del modelo del Bote de Basura a la Política Espacial Colombiana				
Tipo de cambio	Corriente problemas	Corriente soluciones	Corriente personas	Corriente oportunidades
Tipo I Ajustes en diagnóstico	Elevados costos para un satélite propio de comunicaciones.	Alternativas: Satélite propio, alquiler de un satélite, o alquiler de servicios de comunicaciones.	Liderazgo conducido personalmente por la Vicepresidencia.	Posición privilegiada de Colombia para la Órbita Geosíncrona ¹¹ .
Tipo II Supresión, inserción de objetivos	Necesidades en otros sectores: agro, desastres, catastro, ambiente, ciencia, minería.	Diseño, desarrollo y lanzamiento de un satélite de observación de la Tierra.	Sucesión en Vicepresidencia. Liderazgo de IGAC orientado hacia la consecución de sus objetivos institucionales.	Presidencia de Colombia en el Comité de Uso Pacífico del Espacio Exterior (COPUOS) ¹²
Tipo III Cambio profundo. Nuevo paradigma.	Costos de inversión en capacidad autónoma exceden los de tercerización. Carencia de conocimiento científico y administrativo en la materia.	Conectividad por fibra óptica. Compra de información y servicios satelitales. Desarrollo de nanosatélites de bajo costo. Capacitación profesional.	Con la sucesión de gobierno, se traslada la responsabilidad de la CCE de la Vicepresidencia a la Dirección Administrativa de la Presidencia y luego a la Oficina del Alto Comisionado para el Posconflicto.	Desarrollo de capacidades de fibra óptica, genera una alternativa a las tecnologías satelitales.

Fuente: Elaboración propia.

11 Una órbita geosíncrona es aquella cuyo periodo orbital es el mismo que el periodo de rotación de la Tierra; por tanto, un satélite en ella tiene una aparente posición constante sobre un punto fijo de la Tierra, vertical a la línea del ecuador. La posición de Colombia es ideal para este tipo de órbitas, pero pese a que la Constitución Nacional de 1991 define una soberanía sobre ella, no existe una norma internacional que la soporte. Internacionalmente el espacio no tiene propietarios, y su uso depende de la capacidad de los Estados de acceder a él.

12 COPUOS, por sus siglas en inglés es el Comité para el Uso Pacífico del Espacio Exterior, creado por la ONU en 1959 para go-bernar la exploración y el uso del espacio para el beneficio de toda la humanidad.

La racionalidad de la política, que a continuación se analiza, evalúa cuáles principios de optimización y consistencia se han utilizado para satisfacer los objetivos de esta:

Tabla 4. Tipos de racionalidades de la Política Espacial Colombiana

Cuarta parte Tipos de racionalidades de la Política Espacial Colombiana	
Tipo	Aplicación
Según grado de perfección (absoluta o limitada)	El modelo ideal es el absoluto. Pero éste solo aplica si su alcance es comprehensivo y holístico. De manera que esta política debe evaluarse como limitada, con base en que sus costos han evitado su desarrollo; la información ha sido fragmentada en virtud de la falta de capacitación en el conocimiento del decisor.
Según su finalidad (instrumental o comprensiva)	Es una política instrumental, ya que busca los objetivos sin importar el contenido, que en este caso encierra circunstancias de orden técnico que son muy complejas, pero no se abordan.
Según su estructura lógico-mecánica (política, técnica o comunicativa)	Debiendo ser una política técnica (científica) que se hace o se estudia a través de la aplicación de conocimiento por parte de expertos, se le ha dado erróneamente una racionalidad política conforme las diferentes administraciones fueron transformando la importancia de unos objetivos nacionales, debido a que dichos objetivos no se identificaban con el gobierno de turno. Además, el problema político se centró en determinar una forma organizacional en lugar de un fondo o contenido. De otro lado, también se considera una política comunicativa, ya que su formulación y desarrollo, aunque precarios, se hacen a través del diálogo entre los técnicos, políticos y los ciudadanos, facilitando aprendizaje mutuo, aunque por esto su aplicación puede resultar costosa.
Racionalidad política (positiva o negativa)	Es positiva, ya que busca el interés general, siendo políticamente posible y desarrollable mediante un procedimiento legítimo. Sin embargo, esto poco importa si no se logra que su racionalidad se reoriente hacia lo técnico.

Fuente: Elaboración propia.

Tiene actualmente 84 miembros (Organización de las Naciones Unidas -ONU-, 2017). El colombiano Ciro Arévalo Yepes ocupó la presidencia de 2008 a 2010.

Los antecedentes evidenciados y el análisis de las páginas precedentes permiten diagnosticar que la Política Pública Espacial en Colombia, de manera tácita (porque nunca se ha escrito), se ha concentrado en la creación de una estructura organizacional con el convencimiento de que así se llega al espacio exterior. Los objetivos de esa política son en realidad las metas de otras políticas de gobierno, como alcanzar la conectividad del territorio, o constituir una herramienta para dar solución a las necesidades de consecución de imágenes y datos que faciliten la satisfacción de otras necesidades del desarrollo nacional, y pocas veces se tiene en cuenta su potencial valor militar.

Para la quinta parte del análisis se plantea entonces la siguiente pregunta, que permitirá formular soluciones para enfocar la política espacial actual: ¿cuáles son los factores que inciden en la ineficiencia colombiana de alcanzar una capacidad mínima, pero real, de utilización autónoma de tecnologías espaciales? Para responder, se listan los siguientes factores:

Tabla 5. Factores que influyen en la autonomía espacial colombiana

	Factor
A	Ausencia de una política pública explícita que oriente los esfuerzos
B	Falta de conocimiento técnico en materia espacial
C	Falta de conocimiento en administración de recursos espaciales
D	Prioridad a la estructura burocrática sobre el desarrollo material de soluciones espaciales
E	Estructura satelital incompatible con el tema espacial
F	Falta de autonomía de la CCE
G	Falta liderazgo político
H	Falta de liderazgo técnico
I	Falta de apoyo del Estado a las iniciativas privadas de desarrollo espacial
J	Desinterés del sector educativo público y privado
K	Intereses políticos
L	Baja inversión estatal en ciencia y tecnología
M	Escaso recurso humano especializado en materia espacial
N	Carencia de una institucionalidad permanente de asuntos espaciales

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se aplica la Metodología de Análisis Sistémico de Sensibilidad MASS¹³, del profesor Friedrich Vester, con el fin de detectar la influencia y dependencia de cada uno de los factores sobre los demás, y así categorizarlos en cuatro grupos de variables: críticas, activas, pasivas y amortiguadoras. Según esta clasificación se toman las medidas para formular soluciones priorizadas.

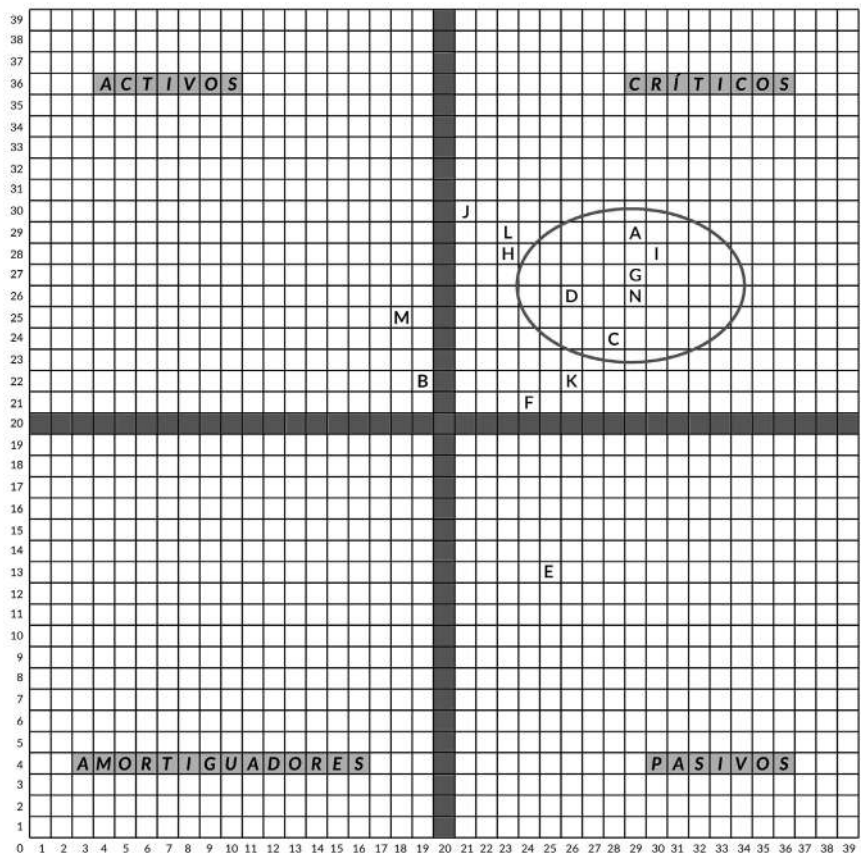
Tabla 6. Matriz de Vester resultante

	A. Ausencia política	B. Falta conoc. tec.	C. Falta conoc. admin.	D. Prioridad burocracia	E. Estruct. incompat.	F. Falta autonom. CCE	G. Falta líder. polit.	H. Falta líder. tec	I. Falta apoyo estatal	J. Desint. sector. educat.	K. Inter. políticos	L. Baja inversión	M. Escaso rec. humano	N. Carencia instituc. permanente	DEPENDENCIA
A. Ausencia política		2	2	1	3	2	3	1	3	3	1	3	2	3	29
B. Falta conoc. tec.	2		1	3	0	0	2	3	1	2	0	2	2	1	19
C. Falta conoc. admin.	2	3		3	0	2	3	3	2	1	2	2	2	3	28
D. Prioridad burocracia	3	2	2		0	1	1	2	3	3	3	2	3	1	26
E. Estruct. incompat.	2	0	1	2		3	2	2	3	1	3	3	0	3	25
F. Falta autonom. CCE	3	1	2	3	0		3	2	1	2	3	1	2	1	24
G. Falta líder. polit.	3	1	2	3	2	2		1	3	2	3	2	2	3	29
H. Falta líder. tec	2	3	2	2	0	1	2		2	3	2	2	2	0	23
I. Falta apoyo estatal	3	1	2	1	2	3	2	2		3	3	3	2	3	30
J. Desint. sector. educat.	1	3	3	3	1	0	1	2	1		1	2	3	0	21
K. Inter. políticos	3	0	1	3	3	2	2	2	2	2		2	1	3	26
L. Baja inversión	1	2	1	0	0	2	3	3	3	3	0		2	3	23
M. Escaso rec. humano	1	3	3	1	0	0	1	2	1	2	0	2		2	18
N. Carencia instituc. permanente	3	1	2	1	2	3	2	3	3	3	1	3	2		29
INFLUENCIA	29	22	24	26	13	21	27	28	28	30	22	29	25	26	

Fuente: Elaboración propia.

13 Instrumento sistémico que permite explicar y comprender las interrelaciones entre variables que están determinando un problema y, por tanto, encontrar las mejores medidas a tomar. Es una matriz de doble entrada donde figuran las variables esenciales de la problemática en discusión (Velásquez, 2017).

Figura 1. Categorización de los factores



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la metodología, el grupo de variables críticas influye fuertemente sobre las demás y es influido por ellas. Para este análisis, se toman los factores críticos más sobresalientes, que se destacan en la elipse roja, sobre los cuales se formula una solución que mejore la eficiencia colombiana para alcanzar una capacidad mínima, pero real, de utilización autónoma de tecnologías espaciales. Dichos factores son:

3.1. Ausencia de una política pública que oriente los esfuerzos

Este factor es el de mayor influencia sobre los demás. La actual y táctica política pública espacial colombiana está orientada hacia el alcance de objetivos ubicados al final de la cadena sistémica del uso del espacio. El Plan Nacional de Desarrollo (PND) para 2010-2014, así como el del periodo 2014-2018, tangencialmente establecen estrategias de “promoción de aplicaciones satelitales” (Departamento Nacional de Planeación -DPN-, 2010).

Lejos de proyectar el desarrollo de una capacidad autónoma de su uso, más bien sugieren la continua dependencia de la contratación de servicios a terceros. Evidencian, además, una desbordada ambición y falta de conocimiento cuando enuncian “emprender acciones para un componente de navegación satelital” (DNP, 2014) en el sector aéreo, donde el único sistema exitoso a nivel global ha sido el GPS de los Estados Unidos, seguido de lejos por GLONASS de Rusia y GALILEO de la Unión Europea, aún en desarrollo desde el año 2000. Cada sistema se compone de una constelación de más de 20 satélites.

De la misma, forma el PND (2014-2018) asegura que “impulsará un mayor desarrollo de la capacidad científica-técnica [...] con la creación de la Agencia Nacional del Espacio” (DPN, 2014, p. 150), iniciativa que fracasó desde su concepción por razones de estructuración institucional.

Una política que proyecte la autonomía del uso del espacio debe centrarse en estrategias claras de desarrollo con metas específicas, enunciando primero la consecución de una capacidad para luego alcanzar objetivos como consecuencia de ello. Robert Quiroga, Jefe de Desarrollo de Capacidades Espaciales de la Fuerza Aérea Colombiana afirma:

No es el acceso a los productos derivados de tecnologías espaciales lo que se debe garantizar, sino el acceso a la autonomía de administrar estas capacidades, lo cual no puede tener limitaciones; al contrario, se requiere de manera constante, según como lo demande el Estado. (Quiroga, 2014)

Incluso la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA por sus siglas en inglés) reconoce que muchos de sus grandes

fracasos se debieron a la falla en alcanzar sus objetivos originales (McKie, 2008).

La consecución de una capacidad implica necesariamente la concentración de esfuerzos de inversión económica de orden educativo, científico, militar, técnico y de infraestructura, tanto públicos como privados, propuestos en un horizonte de largo plazo, razón por la cual la política a establecer debe necesariamente ser de Estado y no de Gobierno. Este solo concepto protegería de ambiciones partidistas cualquier proyecto que se emprenda. Para este fin, la política debe estructurarse por parte de la comunidad científica y técnica y, ajustarse financieramente por el Gobierno bajo la visión de largo plazo, para que pueda ser aprobada por el Legislativo.

3.2. Falta de conocimiento en administración de recursos espaciales¹⁴

La formulación visionaria de un programa de capacidad espacial debe, indefectiblemente, tener un mérito estratégico. Éste se construye sobre las bases del conocimiento científico, pero sobre todo del conocimiento administrativo basado en la experiencia en proyectos de estas magnitudes. Cuando un Estado carece de experiencia, debe adquirirla, protegerla, multiplicarla y eventualmente producirla. Por esta razón, dentro de los siete grandes retos asociados a la ejecución y administración de estas operaciones, Quiroga (2014) identifica dos de particular importancia:

- 1) La capacitación de capital humano en temáticas satelitales [...] identificar los perfiles adecuados de las personas que se capacitan y se vinculan en actividades que tengan relación con la administración y operación de un Programa Satelital Militar y sus áreas complementarias y
- 2) políticas claras de tiempos de permanencia en los cargos deben ser emitidas e implementadas [...] un continuo proceso de reclutamiento y retención de personal debe ser desarrollado, especialmente cuando se

14 “Si he visto más allá, es por pararme sobre los hombros de gigantes” (Sir Isaac Newton, 1720).

trata de personal con experiencia en ingeniería aeroespacial, eléctrica, software y diseño de sistemas.

3.3. Dar prioridad a la estructura burocrática sobre el desarrollo material de soluciones espaciales

Erróneamente se buscó dar mayor categoría a la gerencia de los asuntos espaciales, haciéndola depender de la Vicepresidencia de la República. La naturaleza política de esta posición, sumada a la ausencia de poder presupuestal y al natural desconocimiento técnico y administrativo de la materia, hicieron caer a la CCE en un círculo vicioso donde la discusión se volcó en buscarle un espacio idóneo a la organización dentro de la estructura burocrática de un Estado carente de experiencia.

La estructura funcional del Estado demostró durante los últimos 40 años, ser incompatible con los propósitos de desarrollar una capacidad espacial. Una CCE sin margen de maniobra por carecer de autonomía, personal propio y presupuesto; un Programa Espacial que bajo la normativa legal solo podía existir de manera temporal; una Agencia Espacial que jamás existió; una Dirección para Proyectos Especiales como apoyo a las funciones del Vicepresidente, quien por razones políticas dio prioridad a otras situaciones, para finalmente quedar atada al Alto Consejero Presidencial para el Posconflicto, en cabeza de un Director de Seguridad; todos ellos claros ejemplos de cómo la burocracia terminó minando los esfuerzos para el desarrollo de un programa espacial colombiano.

3.4. Falta de liderazgo político

No se pretende en este documento desconocer la autoridad Vicepresidencial para liderar proyectos, pero sí se critica la ausencia de empuje y voluntad para promover, en los más altos niveles políticos del Estado, el interés de una comunidad altamente influyente que genere un círculo virtuoso entre la inversión en ciencia y tecnología, la capacitación, el desarrollo experimental y el alcance de metas progresivas orientadas a la

satisfacción de la demanda. Preocupa que en las instancias más altas del Estado no se le dé importancia al desarrollo espacial y su utilidad para el mismo en el ámbito civil, mucho menos en el militar, desconociendo de esta manera que constituye una vulnerabilidad estratégica para la seguridad y la defensa, dadas las capacidades alcanzadas no solo de países vecinos, sino de otros actores estatales y no estatales que puedan tener intereses en nuestro territorio.

3.5. Falta de apoyo del Estado a las iniciativas privadas de desarrollo espacial

Los únicos resultados que materialmente puede presentar Colombia en los últimos 40 años son la puesta en órbita de un picosatélite por parte de una universidad privada, y la existencia de una industria satelital privada que no tiene otra alternativa que apoyar las ambiciones espaciales de otros países.

El desarrollo espacial, para un aprovechamiento eficaz, requiere de grandes inversiones cuyo retorno depende de su explotación comercial. Es definitivo establecer, dentro de una organización sui generis, la posibilidad de una asociación público-privada que genere la sinergia que la capacidad de inversión estatal no puede darle; pero esto no se logra sin la transformación de la normatividad, y sin la transformación de la mentalidad de los líderes nacionales.

3.6. Carencia de una institucionalidad permanente de asuntos espaciales

De la mano de las razones expuestas en materia burocrática y de liderazgo político, se desprende la ineficiencia como institución de la CCE, pese a que su labor fue descrita de la siguiente manera en el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014:

Las políticas nacionales de investigación, desarrollo tecnológico e innovación en el campo de las ciencias y las tecnologías espaciales serán formuladas por miembros de la Comisión Colombiana del Espacio (CCE) con su

participación en la formulación de los planes de mediano y largo plazo de las áreas estratégicas en el marco del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SNCTeI), con lo cual se promoverá la toma de decisiones en la gestión ambiental, el cambio climático y la gestión del riesgo en materia de desastres (DPN, 2010, p. 81).

La cita anterior refuerza nuevamente que los objetivos primordiales de la política no son los de alcanzar una capacidad para el uso del espacio exterior, sino los de lograr beneficios ambientales, climáticos y de prevención de desastres, dejando a la CCE sin una directriz que apalanque su propio funcionamiento como institución.

4. Contexto regional en materia espacial

A manera de comparación del desarrollo espacial en la región latinoamericana, a continuación se presenta una breve síntesis de los avances de países similares a Colombia, destacando sus logros y rescatando la naturaleza de sus políticas sobre la materia:

Argentina ha puesto en órbita 15 satélites y viene desarrollando un nuevo Plan Espacial Nacional, que incluye dentro de sus objetivos la fabricación de satélites de observación de la Tierra con impacto sobre la agricultura y la salud, en un proyecto en colaboración con la Agencia Espacial Italiana. Dentro de su arquitectura se prevé también el desarrollo de una línea de lanzadores.

Por su parte, Brasil tiene una larga experiencia en su carrera espacial; con 13 satélites en órbita y dos centros de lanzamiento de cohetes, es líder en la región desde 1961. Pese a que hoy centra su atención en el desarrollo científico, posee satélites de reconocimiento y vigilancia de uso militar. Su política espacial fue revisada en el año 2008 bajo un nuevo modelo que estimula la producción nacional de satélites. Incluyó la creación de un Consejo Nacional de la Política Espacial vinculado a la Presidencia de la República. Además, busca agilizar los procesos mediante la vinculación de la industria, específicamente de la empresa Embraer.

Bolivia tiene desde 2013 un satélite de comunicaciones para el desarrollo de proyectos de educación y telemedicina. En 2010 creó la Agencia Boliviana Espacial (ABE) como una empresa pública nacional del Estado, adscrita al Ministerio de Obras Públicas y Vivienda. No tiene publicada una política espacial concreta, salvo el objetivo estratégico de la ABE que consiste en gestionar, implementar y administrar los proyectos del Estado para brindar servicios en beneficio de los bolivianos.

En cuanto a Chile, éste ha lanzado dos satélites de observación de la Tierra. El primero fracasó en su separación de un satélite mayor ucraniano quedando inservible. Con el seguro del satélite accidentado, pudo desarrollar el segundo, que se encuentra en órbita y proporciona imágenes de alta definición para uso cartográfico, agrícola y de análisis geográfico (Harding, 2013). Publicó su Política Nacional Espacial 2014-2020 bajo el contexto de promover la actividad espacial entendiendo la dimensión estratégica de generar beneficios. Esta política busca establecer los cambios e incentivos que sean necesarios para impulsar el progreso del campo espacial y se enfoca en tres ejes estratégicos: 1) crear un entorno de condiciones propicias; 2) incentivar el desarrollo científico y tecnológico y, 3) promover la formación de especialistas. Recientemente, el gobierno chileno anunció su plan para reemplazar el satélite FASat Charlie, debido a la proximidad de finalización de su vida útil. Según lo que se ha revelado, este proyecto involucra además de la adquisición de un satélite sub-métrico, el desarrollo de la capacidad de construir localmente una constelación de micros y nanosatélites (Pérez, 2019).

Con relación a Ecuador, tiene un desarrollo espacial muy similar al de Colombia. La diferencia en este caso radica en la ausencia de un liderazgo estatal para explotar los beneficios espaciales; esta situación motivó que una iniciativa privada estableciera una Agencia Espacial Civil Ecuatoriana (EXA), que desarrolla múltiples proyectos de investigación espacial con fines científicos; por ejemplo, puso en órbita su satélite Pegaso en 2013, pero quedó inactivo casi de inmediato (Díaz, 2016).

En contraste, México inicia su carrera espacial en los años 60 con el desarrollo experimental de cohetes. A mediados de los 80 lanza, con apoyo de los Estados Unidos, sus dos primeros satélites; el tercero fue

un microsatélite construido por la Universidad Nacional Autónoma. En los años 90 lanzó dos satélites más para reemplazar los primeros. Creó en 2010 la Agencia Espacial Mexicana, y en 2011 el gobierno expidió un Acuerdo del Ejecutivo en el que dio a conocer la Política Espacial de México. Se define como una política de Estado, que trasciende coyunturas políticas o económicas; su finalidad es traducir el desarrollo científico, tecnológico e industrial aeroespacial del país en nuevos nichos de oportunidad.

En el caso de Nicaragua, previó lanzar bajo contrato con una agencia china, dos satélites en 2017. El hermetismo con relación a este proyecto ha sido alto, tanto como el de la enigmática estación de recepción satelital rusa que fue instalada recientemente en su territorio. No obstante, no tiene definida una política espacial.

Por su parte, Perú puso en órbita su primer satélite, el Perú SAT-1, en 2016; es operado por la agencia espacial CONIDA, adscrita al Ministerio de Defensa. Por su capacidad de vigilancia y la naturaleza de la agencia, claramente tiene un potencial militar. Sin ser una política expresa, la creación de CONIDA proporciona una misión y visión, que son las de promover, investigar, desarrollar y difundir ciencia y tecnología espacial.

Con respecto a Venezuela, su avance tecnológico satelital aventaja a Colombia grandemente, ya que son tres los satélites que el vecino país posee. El Venesat-1 o Simón Bolívar, de comunicaciones, construido y lanzado por China en 2008 como resultado de la frustrada iniciativa conocida como Proyecto Cóndor para un satélite andino, “cuyo registro ante la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) se gestionó en consenso de los países de la Comunidad Andina de Naciones (CAN), a nombre de Venezuela en 1996” (Ramírez y Cárdenas, 2006, p. 134), y que al fracasar permitió la órbita geoestacionaria del satélite Anik-E2¹⁵. También cuenta con el VRSS-1 o Miranda, de observación terrestre, lanzado en 2012 en órbita heliosincrónica¹⁶. El tercero, el Sucre, también de observación, fue puesto en órbita en octubre de 2017; una innovación con relación a este satélite es que fue parcialmente construido en

15 Satélite temporal adquirido por Venezuela en 2005 para ocupar la órbita andina.

16 Órbita cuyo periodo de rotación alrededor de la Tierra esta sincronizado con el Sol.

Venezuela gracias a la transferencia de tecnología lograda con los dos primeros.

El contraste de la situación política, social y económica que hoy vive Venezuela versus su desarrollo en tecnología espacial realmente no sorprende, si se analiza que el país se rige por un régimen totalitario, cuyos intereses claramente se orientan hacia la defensa de su propia prolongación.

Por tanto, el empleo de estos activos tecnológicos puede fácilmente interpretarse como militar. Y aunque no publica su política espacial, el 1 de enero de 2008 se promulgó la ley que creó a la Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE), encargada de ejecutar esa política, como un instituto autónomo y patrimonio propio, distinto e independiente al tesoro nacional, con potestad financiera, administrativa y de gestión de recursos.

5. Conclusiones

Como ya se ha mencionado, la historia de la carrera espacial colombiana no es nueva, y, sin embargo, su desarrollo presenta deficiencias importantes que manifiestan un retraso significativo en comparación con países similares. Esto constituye una significativa desventaja regional en el ámbito tecnológico y particularmente en el de defensa y seguridad nacional.

La política pública colombiana para desarrollar una capacidad espacial ha sido tímida e implícita, pese a las diversas iniciativas desplegadas y a la creación de entidades encargadas de implementarla. El análisis efectuado en este documento a la política tácita espacial revela grandes dificultades en su parte estructural; un manejo más burocrático que técnico, y la fijación de objetivos que se encuentran más allá de sus verdaderas potencialidades que, si bien son necesarios e importantes, corresponden al final de la cadena sistémica del desarrollo espacial que se requiere.

Pese a su interés reciente y a la creación de dependencias en su institución, la Fuerza Aérea Colombiana se encuentra rezagada en el desarrollo espacial y continúa dependiendo de servicios contratados a terceros, factor que genera desventaja estratégica para la defensa y seguridad nacional.

Por ende, las siguientes son las recomendaciones para permitir una reorientación de la política pública espacial de Colombia:

1. Elaboración y publicación de la Política Espacial Colombiana, bajo un contexto estratégico de Estado y no de gobierno, cuyos objetivos se concentren en el desarrollo de una capacidad autónoma de administración de recursos espaciales, que sean aplicables en el futuro a mediano y largo plazo, a las necesidades nacionales.
2. Establecer como prioridad un programa ambicioso de capacitación del talento humano en las áreas administrativa y científica, proyectando y escalonando perfiles que hagan sostenible en el tiempo un sistema de conocimiento sobre el cual se construya el programa espacial.
3. Adaptar la estructura del Estado a las necesidades de la política espacial y no al revés, de manera que permita a la institución encargada su autonomía administrativa, financiera y operativa.
4. Elevar la política al máximo nivel de liderazgo del Estado para que la conozca, la proteja y la promueva, no para que la administre. Esta última es una tarea técnica.
5. Vincular al sector privado con todo su potencial para hacer del programa un proyecto nacional financieramente viable.



COLOMBIA Y LA ÓRBITA GEOESTACIONARIA: UN VÍNCULO GEOESTRATÉGICO INALIENABLE*

TC. Guillermo Alberto Poveda Zamora

Carlos Enrique Álvarez Calderón

* Este capítulo hace parte del proyecto de investigación de la Maestría en Seguridad y Defensa Nacionales, Desafíos y Nuevos Escenarios de la Seguridad Multidimensional en el Contexto Nacional, Regional y Hemisférico en el Decenio 2015-2025, el cual hace parte del grupo de investigación Centro de Gravedad de la Escuela Superior de Guerra General Rafael Reyes Prieto, reconocido y categorizado en (A1) por COLCIENCIAS, con el código COL0104976. Y del proyecto de investigación de la Maestría en Ciencias Militares Aeronáuticas de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana “CT. José Edmundo Sandoval”, titulado: Fuerza Aérea Colombiana. De la evolución de las capacidades a la independencia estratégica, adscrito al grupo de investigación en Ciencias Militares Aeronáuticas (GICMA) de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”, categorizado en (C) por COLCIENCIAS, registrado con el código COL0140489.

1. Introducción

Hoy en día, es innegable el aporte tecnológico de los sistemas satelitales a la capacidad de los Estados para garantizar la seguridad multidimensional de sus sociedades; si bien dichos sistemas satelitales proporcionan ventajas en diversas áreas de interés nacional, es imprescindible su tenencia en lo que respecta al desarrollo de las operaciones militares. En efecto, existe una estrecha relación entre los satélites y la seguridad multidimensional de un Estado, ya que la realización de operaciones militares, la eficiente ejecución de los planes de desarrollo de una administración gubernamental, y la atención de desastres naturales en el que puedan llegar a participar diversas instituciones, entre ellas las Fuerzas Militares de Colombia (FFMM), demandan unas extraordinarias comunicaciones, anchos de banda suficientes, y sobre todo, la disponibilidad del máximo tiempo posible del servicio satelital.

Es por esto que en las últimas cinco décadas, ha habido una marcada y acelerada tendencia de instituciones del Estado colombiano como las FFMM por el desarrollo, la ciencia y la tecnología, exigiendo una forma más simple de las coordinaciones para el desarrollo de sus operaciones; en consecuencia, en la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) se investiga, analiza y aprende permanentemente sobre las tecnologías satelitales, la forma de administrarlas y, sobre todo, cómo ejercer control en las órbitas de los satélites para explotarlas de la mejor manera posible (Pinilla, 2013).

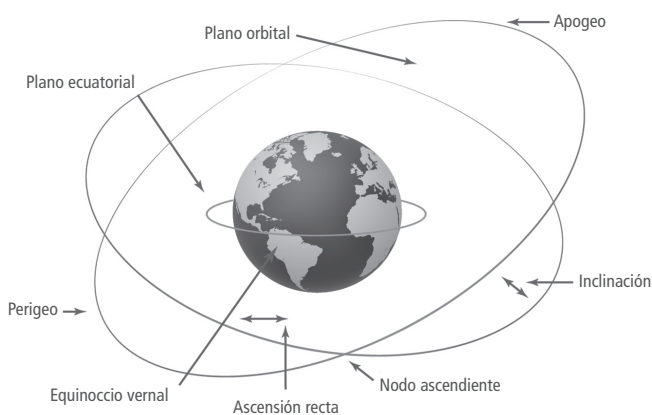
Sin una comprensión completa del movimiento de los cuerpos en el espacio exterior, en esencia, un trasfondo en la “mecánica” de las órbitas,

es difícil dar sentido a la importancia geoestratégica que significaría para Colombia, poseer satélites artificiales propios en las diferentes órbitas terrestres. Más aún, el conocimiento de las órbitas y la mecánica orbital cobra mayor importancia cuando se toma en consideración lo siguiente: al ser una órbita el camino de una nave espacial o satélite atrapado en la gravedad de un cuerpo celeste (sea éste una estrella, un planeta, una luna o cualquier otro cuerpo con significativa masa), las naves espaciales en órbitas estables no gastarían combustible; por tanto, la ruta de vuelo preferida para satélites artificiales y naturales¹⁷ sería una órbita estable, específicamente limitada a una trayectoria operativa precisa. Una órbita se describe primero en términos de altitud y excentricidad, o variación de altitud (Dolman, 1999). Los puntos más altos y bajos en una órbita se llaman “apogeo” y “perigeo”¹⁸, respectivamente (figura 1). Las órbitas generalmente se especifican como circulares (o de altitud constante sin diferenciación de apogeo y perigeo), y elípticas (que son de altitud y excentricidad variables). Una vez que se establecen estos parámetros, la órbita de la nave espacial se puede visualizar como parte de un plano que pasa por el centro de la masa en órbita; el tiempo que tarda una nave espacial en completar una órbita se llama periodo orbital¹⁹.

-
- 17 Satélite se llama a todo objeto secundario que gravita en una órbita cerrada alrededor de un cuerpo celeste más grande. Los satélites naturales (como la Luna terrestre), son cuerpos celestes que orbitan alrededor de un planeta; generalmente, el satélite es más pequeño y acompaña al planeta en su órbita alrededor de su estrella madre. El movimiento de la mayor parte de los satélites naturales conocidos del Sistema Solar alrededor de sus planetas es directo, es decir, de oeste a este y en la misma dirección que giran sus planetas; solamente ciertos satélites de grandes planetas exteriores giran en sentido inverso, es decir, de este a oeste y en dirección contraria a la de sus planetas; probablemente fueron capturados por los campos gravitatorios de los planetas algún tiempo después de la formación del Sistema Solar. Por su parte, se entiende por satélite artificial a cualquiera de los objetos no tripulados puestos en órbita alrededor de la Tierra, quedando por fuera de esta definición los cohetes lanzadores como las cápsulas tripuladas o de carga, los transbordadores espaciales y las estaciones orbitales; tampoco son consideradas satélites artificiales, las sondas espaciales enviadas a cualquier otro destino del Sistema Solar.
- 18 Apogeo es el punto en una órbita elíptica alrededor de la Tierra en el que un cuerpo se encuentra más alejado del centro de ésta, mientras que el punto orbital opuesto, es decir el más cercano, se llama perigeo.
- 19 Hay diferentes periodos relacionados con las órbitas de los objetos: el periodo sideral es la cantidad de tiempo que toma un objeto para hacer una órbita completa; el periodo sinódico es la cantidad de tiempo que tarda un objeto en reaparecer en el mismo punto en relación con dos o más objetos. El periodo draconiano o dracónico, es el tiempo que transcurre entre dos pasajes del objeto a través de su nodo ascendente, el punto de su órbita donde cruza la eclíptica desde el hemisferio sur hasta el hemisferio norte; en cambio, el periodo anomalístico es el tiempo que transcurre entre dos pasajes de un objeto en su periapsis (en el caso de los planetas del Sistema Solar, llamado perihelio), el punto de su aproximación más cercana al cuerpo atrayente. Por último, el periodo tropical de la Tierra (o su “año”), es el tiempo

Se pueden encontrar detalles útiles adicionales determinando la inclinación del satélite, el ángulo medido como la diferencia entre el plano orbital²⁰ del satélite y el plano ecuatorial del cuerpo en órbita, ya que la inclinación da indicaciones de los límites de latitud norte y sur de la órbita. También es útil conocer la posición del plano orbital en relación con un punto fijo en el cuerpo giratorio de la masa en órbita. Para la Tierra, este punto es el equinoccio vernal, y la distancia desde él hasta el paso ascendente o ascendente de la nave espacial sobre el ecuador se llama ascensión recta. Como regla general, cuanto mayor es la altitud, más estable es la órbita, y también más lentamente viaja la nave espacial en relación con el cuerpo que orbita (la velocidad orbital parece aumentar a medida que la nave espacial desciende en espiral por el pozo de gravedad de la masa en órbita).

Figura 1. Características orbitales



Fuente: Elaboración propia.

que transcurre entre dos alineaciones de su eje de rotación con el Sol, también vistas como dos pasajes del objeto en la ascensión recta cero; un año terrestre tiene un intervalo ligeramente más corto que la órbita solar (periodo sideral), debido a que el eje inclinado y el plano ecuatorial avanzan lentamente (giran con respecto a las estrellas), realineándose con el Sol antes de que la órbita se complete.

- 20 El plano orbital de un objeto orbitando alrededor de otro es el plano geométrico en el cual está contenida la órbita. Para ello, se toman en cuenta tres puntos en el espacio para definirlo: el centro del objeto más pesado, el centro del segundo objeto (objeto que orbita), y el centro de este último objeto transcurrido un tiempo.

Las órbitas más bajas son necesarias si se desea una vista cercana o detallada de la Tierra, o si se necesita un enlace concentrado de comunicaciones; en cambio, las órbitas más altas proporcionan un campo de visión muy amplio, sacrificando detalles para la comprensión de imágenes, pero ofreciendo mayor accesibilidad electrónica. Las órbitas de altitud circular o constante se usan, generalmente, para naves espaciales que realizan sus misiones de forma continua a lo largo de todo el curso de la órbita, mientras que, en las órbitas excéntricas, las misiones se llevan a cabo en puntos críticos de la órbita, usualmente en perigeo o apogeo.

La órbita de mayor ascensión vertical tiene una inclinación de 90° , perpendicular al plano ecuatorial; esta órbita también se llama órbita polar, lo que significa que la nave espacial pasa sobre los polos Norte y Sur en cada órbita completa. Por su parte, la inclinación más baja es 0° , lo que quiere decir que la órbita coincide con el plano ecuatorial; en este sentido, las inclinaciones por debajo de 90° son posígradas, es decir, que tienden a desplazarse hacia el este en cada paso orbital, mientras que las inclinaciones por encima de 90° son retrógradas y tienden a desplazarse hacia el oeste. Si la altitud de la nave espacial es constante a 36.000 kilómetros sobre la superficie terrestre, la nave espacial aparecerá fija en relación con un punto sobre la Tierra. A ésta se le llama órbita geoestacionaria, y es la única que tiene esta capacidad de punto fijo; de allí su enorme importancia geoestratégica.

Las órbitas que se ven afectadas por fuerzas distintas de la constante masa gravitacional del cuerpo en órbita, tienen fluctuaciones en su movimiento natural, por lo que la órbita de un satélite artificial nunca es perfectamente circular debido a estas fluctuaciones, llamadas perturbaciones (Vallado, 2006). Por ende, cuanto más baja es la altitud de una nave espacial, más significativa es la fricción causada por una atmósfera invasiva, y en este sentido, las órbitas por debajo de unos 160 kilómetros de altitud (o un periodo orbital de 87.5 minutos), son teóricamente posibles, pero prácticamente alcanzables debido a la acumulación de resistencia atmosférica. En contraste, los efectos del arrastre atmosférico se reducen significativamente a medida que aumentan los periodos (altitudes), razón por la cual aquellos satélites una órbita circular con

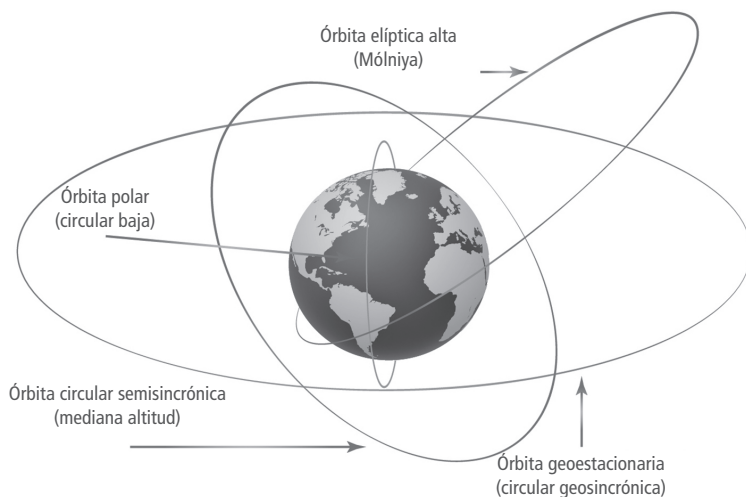
un periodo de menos de 93 minutos, requieren grandes cantidades de combustible para realizar correcciones orbitales (debido al arrastre atmosférico y otras perturbaciones), mientras que los satélites artificiales en órbitas circulares con un periodo superior a 101 minutos, no se ven esencialmente afectados por la atmósfera, por lo que requieren relativamente pocos ajustes.

Las perturbaciones también provienen de la protuberancia en el ecuador de la Tierra, causada por la fuerza centrífuga de su rotación de más de 1.609 kilómetros por hora, lo que significa que la atracción gravitacional del planeta no es constante (Vallado, 2006). Como la Tierra está aplanada ligeramente en los polos y distendida en el ecuador, también crea pequeñas desviaciones en la trayectoria de vuelo de un cohete o un misil balístico; otras perturbaciones a medida que un artefacto se aleja de la Tierra son los campos gravitacionales del Sol, la Luna y otros cuerpos celestes, los efectos de la radiación y las erupciones solares, así como los impactos de meteoritos y la basura espacial, que pueden llegar a golpear un satélite a hipervelocidad. Por tanto, ninguna órbita es del todo perfecta, por lo que todas las naves espaciales deberían tener algo de combustible para hacer correcciones ocasionalmente; en otras palabras, la vida útil de un satélite artificial u otra nave espacial sería en su mayor parte, una función de su capacidad de combustible y su estabilidad orbital.

Ahora bien, las órbitas terrestres vienen en cuatro categorías, basadas en la altitud y su utilidad (figura 2). La primera abarca órbitas de baja altitud, entre 150 y 800 km sobre la superficie de la Tierra, que son particularmente útiles para el reconocimiento de la Tierra (observación militar y gestión de recursos), así como misiones de vuelo tripulado²¹. Estas altitudes permiten de 14 a 16 órbitas completas por día y tienen la ventaja adicional de que los satélites se pueden colocar en ellas con cohetes de dos etapas (más baratos y menos sofisticados)²².

21 Los vuelos tripulados generalmente tienen bajas inclinaciones para maximizar la nave espacial y controlar el contacto del centro, mientras que los vuelos de reconocimiento generalmente tienen altas inclinaciones para maximizar la cobertura de la superficie de la Tierra.

22 Las órbitas con un periodo superior a 225 minutos (por encima de 800 kilómetros), requieren al menos un impulso de la tercera etapa para alcanzar la órbita final.

Figura 2. Órbitas terrestres

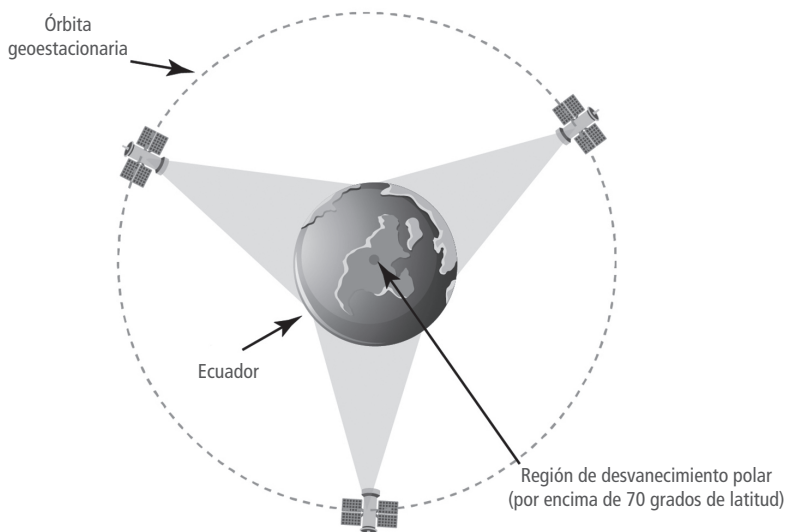
Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, las órbitas de altitud media permiten de 2 a 14 órbitas por día, y varían de 800 a 35.000 kilómetros de altitud. Son generalmente órbitas circulares o de baja excentricidad que admiten redes de satélite vinculadas, por lo que actualmente son los satélites de navegación, que fijan las posiciones terrestres a través de la triangulación de al menos dos o más satélites a la vista, los que dominan esta órbita. En cambio, las órbitas de gran altitud, de al menos 35.000 kilómetros, proporcionan una cobertura de comunicaciones continua con la Tierra con un mínimo de satélites en órbita. Los satélites a gran altitud orbitan la Tierra no más de una vez al día, por lo que cuando el periodo orbital es idéntico a una rotación completa de la Tierra, se logra una órbita geosincrónica; y en este tipo de órbita, con una inclinación de 0° (colocada directamente sobre el ecuador), un satélite aparece fijo en el cielo desde cualquier punto de la Tierra.

Esta es la valiosa órbita geoestacionaria (figura 3), no solo por su importancia para la economía espacial de los Estados, sino por su relevancia estratégica para la seguridad nacional en el desarrollo de operaciones militares que dependen de las comunicaciones y de la información

meteorológica que pueden llegar a reducir la “niebla de la guerra” (Álvarez, Corredor y Vanegas, 2018).

Figura 3. Campos de visión geoestacionarios



Fuente: Elaboración propia.

En efecto, solo tres satélites en órbita geoestacionaria, cuidadosamente colocados equidistantes entre sí, pueden ver todo el planeta hasta aproximadamente 70° de latitud norte o sur, ya que un satélite en órbita geoestacionaria tiene un campo de visión del 28% de la superficie terrestre. Como los satélites no parecen moverse, las antenas fijas en Tierra pueden acceder a ellos de manera fácil y continua, razón por la cual las comunicaciones globales y los satélites meteorológicos generalmente se colocan en esta órbita.

Para aquellas latitudes superiores a 70° , la ventaja de permanencia geoestacionaria de tiempo prolongado se desvanece. Por tanto, una técnica para superar esta deficiencia es utilizar la cuarta categoría orbital, es decir, la órbita altamente elíptica; que se describe como altamente excéntrica con un perigeo tan bajo como 250 kilómetros y un apogeo de

hasta 700.000 kilómetros²³, lo cual implica que, colocado en una órbita altamente inclinada con apogeo a 36.000 a 40.000 kilómetros, un satélite parece habitar en las latitudes superiores durante varias horas, lo que la convierte en una órbita particularmente útil para satélites de comunicaciones que prestan servicios en regiones árticas; esta pausa aparente ocurre porque la velocidad del satélite en apogeo es de solo 4.828 kilómetros por hora, mientras que en perigeo es de más de 32.186 kilómetros por hora. Cuando se conectan en red en la misma órbita, uno detrás del otro con ascensiones rectas igualmente espaciadas, un mínimo de tres satélites puede acceder continuamente a una sola estación terrestre de alta latitud. Finalmente, una órbita altamente elíptica con apogeo a más de 700.000 kilómetros puede tener un periodo de más de un mes, y es especialmente útil para misiones científicas.

Con base en lo anterior, y como aporte a la imperiosa necesidad de situar satélites de gran envergadura para Colombia en diferentes órbitas terrestres, especialmente en la órbita geoestacionaria, este capítulo hace uso de la astrodinámica y la mecánica orbital en la realización de todos los cálculos matemáticos que definen una órbita geoestacionaria para un Satélite Geoestacionario Colombiano (SGC), que garantice el máximo tiempo de cobertura posible sobre el país. Se generan los elementos que describen dicha órbita, para simularla y así representar al satélite, la trayectoria que describe y observar su comportamiento. La importancia de este ejercicio está centrada en el aporte que hace a la ingeniería aeroespacial colombiana, por cuanto los estudios de órbitas en Colombia son escasos, tanto en su cálculo como en su administración. Definir esta órbita es necesario, porque a partir de este concepto, se desglosa toda la planeación del vuelo del satélite, tanto en tiempo de vida útil, como esfuerzos de control, tiempo de exposición o cobertura sobre Colombia y los costos de poner el satélite en dicha órbita.

Para los cálculos a desarrollar más adelante, se asumen las siguientes características técnicas básicas del SGC:

23 Cabe resaltar que, en teoría, la atracción gravitacional de la Tierra se extiende alrededor de 900.000 kilómetros (una 166va parte de la distancia entre la Tierra y el Sol, y aproximadamente el doble de la distancia entre la Tierra y la Luna). Más allá de esta distancia, las órbitas terrestres no son posibles, ya que una nave espacial será atraída hacia el campo gravitacional de otro cuerpo celeste.

- Satélite geoestacionario
- Alto: 1,5 metros
- Ancho: 1,5 metros
- Largo: 1,5 metros
- Volumen total: 3.375 metros cúbicos
- Masa: 1.000 Kg.
- Distancia del centro de la Tierra; 42.164 kilómetros desde la línea del ecuador

2. Análisis teórico de una propuesta de órbita para un SGC

2.1. Generalidades de mecánica orbital

A continuación, se definen algunos términos de la dinámica clásica, con apoyo en la teoría de la conservación del movimiento lineal y movimiento relativo, la ley de las áreas y las leyes de Kepler, para el análisis de las variables utilizadas en el cálculo de los elementos orbitales en el planteamiento y solución del problema.

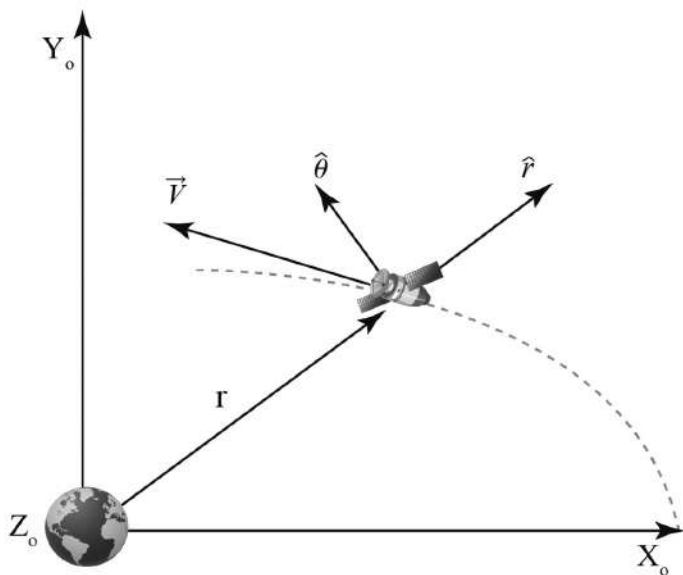
2.1.1. *El problema de los dos cuerpos*

Analiza fundamentalmente la dinámica que incorpora el movimiento de dos masas como un sistema, que se mueven gracias a la atracción gravitacional que se ejercen mutuamente; es el caso de la Tierra y el satélite. Se establece el análisis matemático de cada uno de los elementos orbitales, desde el movimiento elíptico, hasta el análisis de anomalías (Alvarado, 2013), el planteamiento de la integral de energía y la dependencia física que existe entre el movimiento y el tiempo, lo que conduce al cálculo de diferentes velocidades dentro de las órbitas de un futuro satélite colombiano (Poveda, 2016).

2.1.1.1. Ecuación del movimiento. La ecuación del movimiento entre la Tierra de masa M y un satélite con masa m , se establece admitiendo

que solo se encuentran estos dos cuerpos interactuando en el espacio (De Orús, Català y Núñez, 2007). El sistema de coordenadas usado para plantear la órbita del satélite puede observarse en la figura 4.

Figura 4. Sistema de coordenadas para describir la órbita del satélite



Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la figura 4, el origen es el centro de la Tierra, y para describir el movimiento del satélite se han empleado las coordenadas polares r , θ y el eje $Z=0$. (Gómez, 2010). Al establecer el movimiento del satélite en torno a la Tierra, se genera un equilibrio entre las fuerzas que interactúan entre las dos masas; éstas son la fuerza de atracción y la fuerza centrífuga que describe el movimiento del satélite por cuenta de su velocidad angular y movimiento en la órbita. De acuerdo con la ley universal de la Gravitación (Cohen, 1987), los cuerpos se atraen entre sí (Battin, 1987), respecto a la recta que los une bajo una fuerza F .

$$\vec{F}_g = G \frac{M * m}{r^2} (-\hat{r}) \quad (1.1)$$

Donde m es la masa del satélite, M es la masa de la Tierra, y r es la distancia entre los dos centros de masa, $-r \hat{r}$ el vector unitario de m respecto a M , y G es la constante universal de la gravitación (Universidad Politécnica de Madrid, 2013; De Orús, et al., 2007):

$$G = 6,6710 \times 10^{-11} \left[\frac{m^2}{(Kg \cdot Seg^2)} \right] \quad (1.2)$$

La fuerza de gravedad de la expresión (1.1) se representa a continuación, ya que al reemplazar se obtiene la ecuación diferencial así:

$$\vec{F}_g = m \vec{a} \quad (1.3)$$

$$\vec{F}_g = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \quad (1.4)$$

$$\vec{F}_g = m \frac{d^2 (r \vec{r})}{dt^2} \quad (1.5)$$

Conociendo que las fuerzas son iguales, es decir están en equilibrio para que la órbita del satélite describa un movimiento continuo sobre ésta, se igualan las expresiones (1.1) y (1.3) y se establece la ecuación fundamental del movimiento.

$$\vec{F}_g = \vec{F}_c \quad (1.6)$$

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} + \vec{r} \frac{k}{r^2} = 0 \quad (1.7)$$

En la expresión (1.7) aparece una nueva constante k , llamada la constante de Kepler, la cual se calcula con la expresión (1.2). Para todos los cálculos se utiliza un valor de 5.979×10^{24} Kg que es la masa aproximada de la Tierra (Neff, 1995) y un radio de la Tierra R_t definido como $R_t = \text{radio ecuatorial} = 6.378,140 \text{ km}$ (The International Astronomical Union, 1964), con estos valores se obtiene:

$$k = GM$$

$$k = 6,6710 \times 10^{-11} \left[\frac{m^2}{(Kg \text{ Seg}^2)} \right] 5,979 \times 10^{24} \text{ Kg} \quad (1.8)$$

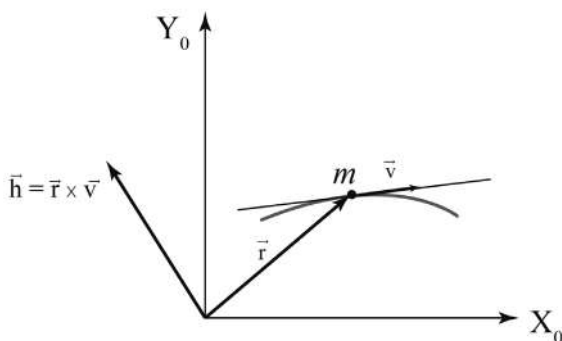
$$k = 3,986 \times 10^{14} \left[m^3 / \text{seg}^2 \right] \quad (1.9)$$

Ahora se multiplica vectorialmente el vector posición $\vec{r}$ por la expresión (1.7) y se obtiene:

$$\vec{r} \times \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{r} \times \vec{V} = \vec{h} \text{ Constante} \quad (1.10)$$

El término $\vec{h}$ es el momento angular orbital del satélite por unidad de masa, el cual es constante por ser perpendicular al plano de los vectores $\vec{r}$ y $\vec{V}$. La relación entre el momento angular y la velocidad y posición del satélite puede observarse en la figura 5, así:

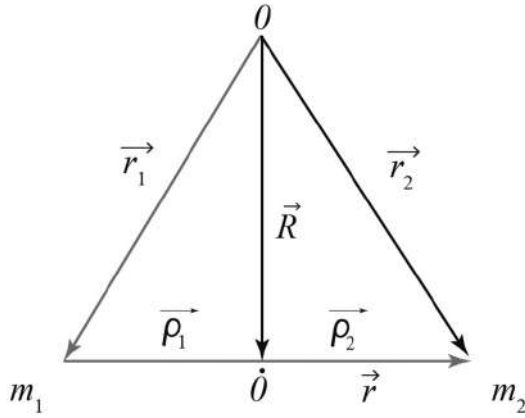
Figura 5. Relación, posición, velocidad y momento angular



Fuente: Martínez y Calvo (2010)

2.1.2. Conservación del momento lineal

Analizando la conservación del momento lineal, observado desde un punto 0, de las dos masas respecto m_1 y m_2 como se observa en la figura 6 se plantea que:

Figura 6. Conservación del momento lineal

Fuente: Elaboración propia.

m_1 = masa de la tierra y m_2 = masa del satélite

$$\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 \quad (1.11)$$

Donde en consideración de la expresión (2.1) y la Figura 4 se puede deducir:

$$\begin{cases} m_2 \ddot{\vec{r}}_2 = -G \frac{m_1 m_2}{r^3} \vec{r} \\ m_1 \ddot{\vec{r}}_1 = G \frac{m_1 m_2}{r^3} \vec{r} \end{cases} \quad (1.12)$$

Considerando el centro de masa del sistema con los dos cuerpos descritos, se plantea que:

$$m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 = (m_1 + m_2) \vec{R} \quad (1.13)$$

Añadiendo la ecuación (1.12) y diferenciando en la ecuación (1.13) respecto al tiempo se obtiene:

$$m_1 \ddot{\vec{r}}_1 + m_2 \ddot{\vec{r}}_2 = (m_1 + m_2) \ddot{\vec{R}} = 0 \quad (1.14)$$

De la expresión (1.14) se puede inferir que el centro de masa de los dos cuerpos no tiene aceleración, en virtud del análisis basado solo en dos cuerpos, sin existencia de ninguna otra fuerza externa que afecte el sistema. Simplificando el sistema, se divide (1.12) por m_1 y m_2 respectivamente, obteniendo:

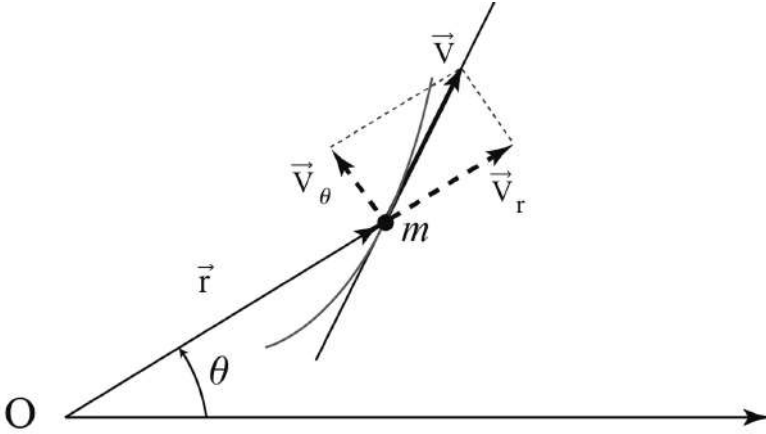
$$\ddot{\vec{r}}_2 - \ddot{\vec{r}}_1 = \ddot{\vec{r}} = -G \frac{m_1}{r^3} \vec{r} - G \frac{m_2}{r^3} \vec{r} = -G \frac{(m_1+m_2)}{r^3} \vec{r} \quad (1.15)$$

Simplificando (1.15), remplazamos $G(m_2+m_1)$ por μ obteniendo la siguiente ecuación diferencial así:

$$\ddot{\vec{r}} + \frac{\mu}{r^3} \vec{r} = 0 \quad (1.16)$$

Ésta finalmente es la ecuación del movimiento relativo de la m_2 respecto a la m_1 , ecuación (1.16), también llamada kepleriano. Esta ecuación permite deducir que mientras las dos masas sean constantes, el movimiento por atracción gravitacional de las dos será también constante en un radio específico; como resultado, se puede esperar que el movimiento de las dos masas sea constante, lo que facilita el cálculo de las velocidades y los tiempos en las órbitas del satélite alrededor de la Tierra (Baruh, 1999).

Para expresar la posición del satélite en términos de $\vec{r}$ se debe usar el sistema de coordenadas polares, y como el vector velocidad es tangente a la trayectoria, se pueden descomponer sus dos elementos tanto radial V_r y transversal V_θ como se puede observar en la figura 7 así:

Figura 7. Vectores que Componen la Velocidad

Fuente: Martínez y Calvo (2010)

Las componentes se expresan en términos de r y θ

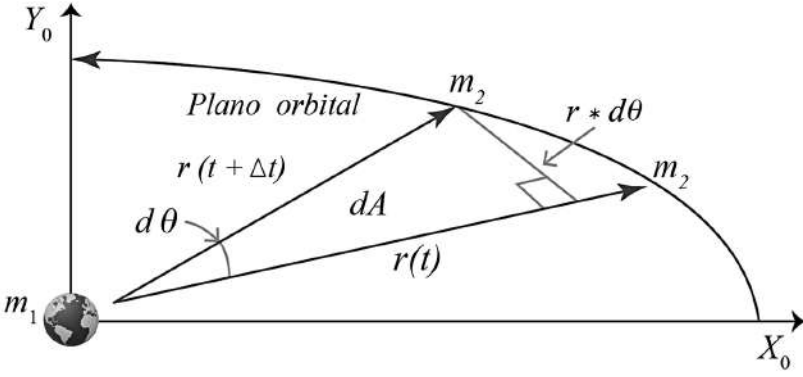
$$\vec{V} = v_r \hat{r} + v_\theta \hat{\theta} \quad (1.17)$$

Usando como referencia la figura 4, la dirección del momento angular $\vec{h}$, y teniendo en cuenta que $\hat{r} \times \hat{\theta} = \hat{z} = \hat{z}_0$, según lo expuesto por Baruh (1999), se puede inferir que la magnitud de la ecuación es:

$$r^2 \dot{\theta} = r^2 \frac{d\theta}{dt} = h = \text{constante} \quad (1.18)$$

En la figura 8 puede observarse el diferencial de área barrida por el radio vector de posición del satélite dA .

Figura 8. La Ley de las Áreas



Fuente: Montenbruck y Gill (2012)

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} r r d\theta = \frac{1}{2} r^2 d\theta$$

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} r^2 \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2} h = \text{constante} \quad (1.19)$$

Analizando la figura 8 en contraposición con la expresión (1.19), puede deducirse que las áreas barridas por el radio vector en tiempos iguales son iguales. Esta es la segunda ley de Kepler, también conocida como Ley de las Áreas, y que permitirá efectuar los cálculos de tiempos y los periodos en las órbitas (Baruh, 1999). De la misma manera, de la figura 8 se pueden plantear unas componentes de la aceleración, transversal y radial así:

Componente radial

$$m_2(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) = -F_g = -\frac{Gm_1m_2}{r^2} \quad (1.20)$$

Componente trasversal

$$m_2(r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta}) = 0 \quad (1.21)$$

Haciendo cambio de variable por $\frac{1}{r} = u$, la ecuación (1.20) que describe el movimiento del satélite en términos de u acorde a lo descrito por Baruh (1999), está definida por:

$$\frac{d^2u}{d\theta^2} + u = \frac{Gm_1}{h^2} \quad (1.22)$$

La expresión (1.22), siendo una ecuación diferencial de segundo orden, se puede resolver obteniendo la suma de su solución particular $u = \frac{Gm_1}{h^2}$, y la solución de la homogénea $u = c \cdot \cos(\theta - \theta_0)$ donde c es una constante. Haciendo $\theta - \theta_0 = 0$, es decir en el perigeo de la órbita, se tiene la expresión de la trayectoria del satélite en el plano orbital:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} = u &= \frac{Gm_1}{h^2} + c \cos(\theta - \theta_0) \\ \frac{1}{r} &= \frac{Gm_1}{h^2} + c \cos(\theta) \end{aligned} \quad (1.23)$$

2.1.2. Movimiento elíptico

El estudio del movimiento elíptico del satélite alrededor de la Tierra, se simplifica analizando los ángulos o anomalías que describen su movimiento, de donde aparecen el periodo de revolución o parámetro p y excentricidad e (Montenbruck y Gill, 2012). La expresión (1.23) es la de una sección cónica en coordenadas polares (r, θ) , estando el origen en el foco de la elipse, describiendo una ecuación general para esta familia de curvas así:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{p} [1 + e \cos(\theta)] \quad (1.24)$$

El parámetro e es denominado excentricidad, y su valor determina el tipo de curva que describe el satélite alrededor del planeta (Baruh, 1999). Los parámetros p y e están dados por:

$$p = \frac{h^2}{Gm_1} \quad (1.25)$$

$$e = \frac{c \cdot h^2}{Gm_1} = c p \quad (1.26)$$

Los valores de c y e que describen diferentes tipos de curvas según Montenbruck y Gill (2012), son:

Si $e=c=0$ la forma es una circunferencia

Si $e = 1$ o $c = \frac{Gm_1}{h^2}$ la forma es una parábola

Si $e > 1$ o $c > \frac{Gm_1}{h^2}$ la forma es una hipérbola

Si $0 < e < 1$ o $c < \frac{Gm_1}{h^2}$ la forma es una elipse

Para el presente proyecto, el valor de interés de que se utilizó es $0 < e < 1$ o $c < \frac{Gm_1}{h^2}$, debido a que es el único que corresponde a una trayectoria cerrada del satélite alrededor de la Tierra. Teniendo en cuenta la expresión (1.19), y la segunda ley de Kepler, respecto a la variación del área respecto al tiempo, se plantea que:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{h}{2} = \textit{Constante} \quad (1.27)$$

Entonces, el periodo para una órbita elíptica de acuerdo con lo expuesto por Baruh (1999), se deduce de:

$$T = \frac{A}{dA} = \frac{\pi ab}{h/2} \quad (1.28)$$

Donde πab es el área de la elipse, b que es el semieje menor, está dado por $b = \sqrt{1 - e^2}$ y la expresión $h = \sqrt{Gm_1 a(1 - e^2)}$ y haciendo la operación se obtiene (Baruh, 1999):

$$T = \frac{2\pi a^2 \sqrt{1-e^2}}{\sqrt{Gm_1 a(1-e^2)}} = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{Gm_1}} \quad (1.29)$$

El periodo de la órbita:

$$T = \frac{2\pi}{n} = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{Gm_1}} \quad (1.30)$$

De la expresión (1.30) se puede despejar el movimiento medio n , así:

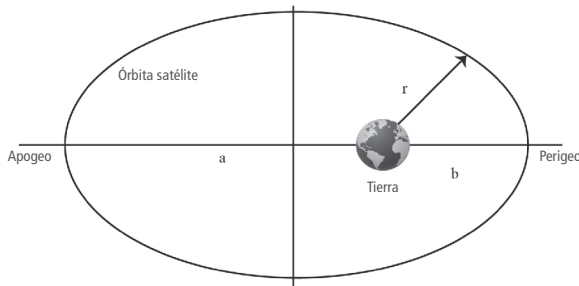
$$n = \sqrt{\frac{Gm_1}{a^3}} \quad (1.31)$$

La expresión (1.30) se conoce como la tercera ley de Kepler; para toda elipse, los cuadrados de los periodos son proporcionales a los cubos de los semiejes mayores (Curtis, 2005) Los valores máximos del radio posición del satélite serán máximo en el apogeo y mínimo en el perigeo (Martínez, 2009), y en función de la figura 9 se pueden describir como:

$$r_{perigeo} = \frac{P}{1+e} \quad (1.32)$$

$$r_{apogeo} = \begin{cases} \frac{P}{1+e^2} & \text{hasta } 0 \leq e < 1 \\ \infty & \text{hasta } 1 \leq e \end{cases} \quad (1.33)$$

Figura 9. Órbita elíptica



Fuente: Elaboración propia.

Estos mínimos y máximos son el perigeo y el apogeo respectivamente; el valor medio de las distancias mínima y máxima se conoce como el semieje mayor a

$$a = \frac{1}{2}(r_{\text{perigeo}} + r_{\text{apogeo}}) = \frac{P}{1+e^2} \quad (1.34)$$

2.2.1. Anomalías excéntrica y verdadera

Una vez definido el movimiento elíptico y las expresiones que describen su trayectoria, es necesario determinar la posición del satélite en función del tiempo $\frac{dr}{dt}$, para lo cual se recupera la expresión (1.18), llevándola a la expresión (1.22):

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{h}{r^2} = \frac{r \cdot v}{r^2} = \frac{\sqrt{p \cdot k}}{r^2} \quad (1.35)$$

Y considerando la expresión (1.31), se plantea:

$$r = \frac{P}{1+e^2 \cdot \cos\theta} = \cos\theta = \frac{p-r}{r \cdot e} \quad (1.36)$$

Al derivar la expresión (1.36):

$$-\sin\theta \frac{d\theta}{dt} = \frac{-p}{e \cdot r^2} \cdot \frac{dr}{dt} \Rightarrow \sqrt{1 - \left(\frac{p-r}{e \cdot r}\right)^2} \cdot \frac{\sqrt{p \cdot k}}{r^2} = \frac{p}{e \cdot r^2} \cdot \frac{dr}{dt}$$

Al resolver se obtiene:

$$\frac{dr}{dt} = \sqrt{\frac{k}{p \cdot r^2} [-(1 - e^2)r^2 - p^2 - 2pr]} \quad (1.37)$$

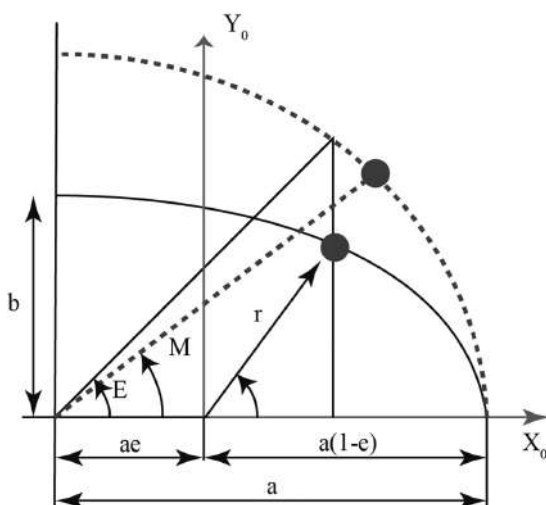
En la expresión (1.37) sustituimos la expresión (1.34) para calcular $\frac{dr}{dt}$ así:

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= \sqrt{\frac{k}{pr^2} \left[-\frac{p}{a}r^2 - (p-r)^2 \right]} = \sqrt{\frac{k}{ar^2} [-r^2 - ap + 2ar]} \\ &= \sqrt{\frac{k}{ar^2} [-r^2 - a^2(1 - e^2) + 2ar]} = \sqrt{\frac{k}{ar^2} [a^2e^2 - r^2 - a^2 + 2ar]} \end{aligned}$$

$$\frac{dr}{dt} = \sqrt{\frac{k}{ar^2} [a^2 e^2 - (a - r)^2]} \quad (1.38)$$

En la figura 10 puede observarse las tres anomalías que describen el movimiento del satélite, E anomalía excéntrica, M anomalía media o principal, y θ anomalía verdadera.

Figura 10. Anomalías en la órbita



Fuente: Martínez y Calvo (2010)

De acuerdo con lo expuesto por Curtis (2005) y Martínez y Calvo (2010), la anomalía es un ángulo formado por el vector r y la posición del satélite. Éste es tomado en sentido anti-horario: si la referencia del satélite es en el foco de la elipse y en la dirección del perigeo en X_0 , es llamada anomalía verdadera; pero si el ángulo es tomado desde el centro de la elipse, entre la dirección del perigeo y la intersección con el círculo principal de la elipse, es llamada anomalía excéntrica E . Finalmente, el ángulo tomado desde el centro de la elipse entre la dirección del perigeo X_0 y la posición en el círculo principal de la elipse, donde un satélite ficticio con velocidad constante, tendría el mismo periodo orbital que

el propio satélite en la órbita elíptica, esta anomalía se llama anomalía media M . (Poveda, 2016). En concordancia con lo expuesto, de la figura 10, inicialmente puede deducirse que:

$$a \cdot \cos E = ae + r \cdot \cos \theta = c + r \cos \theta \quad (1.39)$$

Considerando las expresiones (1.26) y (1.34), se calcula la anomalía excéntrica E , la cual, de acuerdo con lo expuesto por Martínez y Calvo (2010), se define como:

$$\cos E = \frac{e + \cos \theta}{1 + e \cdot \cos \theta} \quad (1.40)$$

De manera similar, se puede calcular la anomalía verdadera θ , a partir del vector r y la anomalía excéntrica E , así:

$$\cos \theta = \frac{\cos E - e}{1 - \cos E} \quad (1.41)$$

$$a \cdot \cos \theta = ae + r \frac{\cos E - e}{1 - \cos E}$$

$$r = a(1 - e \cdot \cos E) \quad (1.42)$$

2.1.2.1. Anomalía media. Introduciendo la expresión (1.42) en la ecuación diferencial deducida en la expresión (1.38) para obtener una expresión en términos de $\frac{dE}{dt}$, se obtiene:

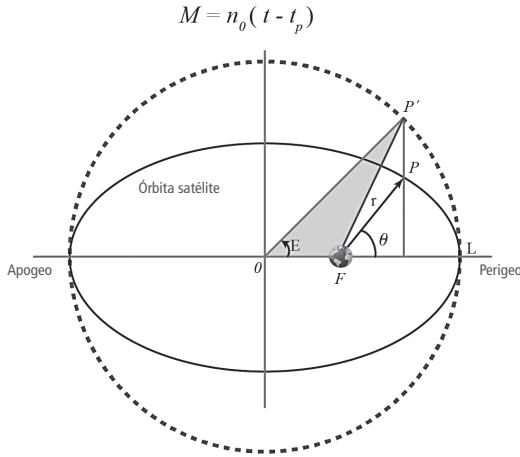
$$E - e \cdot \sin E = \sqrt{\frac{k}{a^3}} \cdot (t - t_p) \quad (1.43)$$

t_p es el parámetro que indica el momento de paso por el perigeo, en donde la anomalía excéntrica E es cero. Al existir dos raíces posibles, el valor negativo será un satélite girando en sentido contrario. La anomalía media M , como se observa en la figura 10, puede expresarse como el ángulo conformado por el semieje del perigeo de un satélite ficticio girando a velocidad constante sobre una circunferencia de radio a , en la que se

describe la órbita elíptica; de esta manera, el valor de M puede obtenerse de una velocidad angular media n_0 de la siguiente forma:

$$M = n_0(t - t_p) \quad (1.44)$$

Figura 11. Geometría de la anomalía media



Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la figura 11, se plantea una geometría que permita, a partir de la anomalía excéntrica E , calcular la anomalía media M . Como fue descrito en la expresión (1.19) de la segunda ley de Kepler, el área recorrida por el radio vector de posición del satélite, r , gira a velocidad constante, de acuerdo con la figura 11, y según lo expuesto por Martínez y Calvo (2010), el área compuesta por los vértices F , P' y L en el perigeo (A_{FPL}), es una sección de toda el área de la elipse (A_{elipse}), determinada de la siguiente manera:

$$A_{FPL} = \frac{(t-t_p)}{T} * A_{elipse} = \frac{(t-t_p)}{T} \pi ab \quad (1.45)$$

El área recorrida, descrita por el área $FP'L$ (A_{FPL}), en el mismo intervalo de tiempo $(t - t_p)$ se puede expresar por:

$$A_{FP'L} = \frac{(t-t_p)}{T} * A_{Circulo} = \frac{(t-t_p)}{T} \pi a^2 \quad (1.46)$$

Para hallar el área descrita por los vértices F, P' y L, basta con plantear la siguiente resta:

$$\begin{aligned} A_{FP'L} &= A_{OP'L} - A_{OP'F} \\ \frac{(t-t_p)}{T} \pi a^2 &= \frac{E}{2\pi} \cdot \pi a^2 - \frac{1}{2} a e \cdot \sin E = \frac{1}{2} E a^2 - \frac{1}{2} a^2 \cdot e \cdot \sin E \\ \frac{(t-t_p)}{T} \pi a^2 &= \frac{1}{2} E a^2 - \frac{1}{2} a^2 \cdot e \cdot \sin E \end{aligned} \quad (1.47)$$

Multiplicando la expresión (1.47) por $\frac{2}{a^2}$ para reducirla, y llevarla a la forma de la expresión (1.44), considerando también la expresión (1.35) así:

$$\begin{aligned} \left[\frac{(t-t_p)}{T} \pi a^2 \right] \cdot \frac{2}{a^2} &= \left[\frac{1}{2} E a^2 - \frac{1}{2} a^2 \cdot e \cdot \sin E \right] \cdot \frac{2}{a^2} \\ M &= E - e \cdot \sin E = n(t - t_p) \\ M &= E - e \cdot \sin E \end{aligned} \quad (1.48)$$

La expresión (1.48) se conoce como la ecuación de Kepler y, permite con el cálculo de la anomalía media, conocer la posición del satélite sobre la órbita que éste describe.

2.1.3. Los elementos orbitales

Éstos se determinaron a partir de los vectores de posición y velocidad, que describen el movimiento del satélite alrededor del planeta; básicamente, el problema orbital como fue determinado en la expresión (1.16), requiere seis condiciones iniciales o constantes de integración, ya que es una ecuación diferencial de segundo orden que se representa en tres dimensiones. Estos elementos orbitales pueden observarse en las figuras 13 y 21; se describen a continuación así:

Forma de la órbita

- | | |
|------------------|-----|
| a) Semieje mayor | a |
| b) Excentricidad | e |

Posición a lo largo de la órbita

- | | |
|-------------------------------|-----|
| a) Anomalía media o principal | M |
|-------------------------------|-----|

Orientación de la órbita en el espacio

- | | |
|--|----------|
| a) Recta de ascenso o nodo de ascenso RAAN | Ω |
| b) Inclinación | i |
| c) Argumento del perigeo | ω |

2.1.3.1 Forma de la órbita.

• Semieje mayor: como se observó en el literal 2.1.2 movimiento elíptico, fue deducido el semieje mayor de acuerdo con la expresión (1.34) así:

$$a = \frac{1}{2} (r_{perigeo} + r_{apogeo}) = \frac{P}{1+e^2} \quad (1.49)$$

• Excentricidad: fue calculada en el literal 2.1.2, resaltando el hecho que el valor de e se encuentra restringido en el presente proyecto a: $0 < e < 1$ o $c < \frac{Gm_1}{h^2}$ por ser los únicos valores de los que describen una órbita elíptica sobre el planeta, en tal virtud, será también positiva y, despejando de la expresión (1.34) se puede inferir que:

$$e = \sqrt{1 - \frac{p}{a}} \quad (1.50)$$

2.1.3.2 Posición del satélite en la órbita.

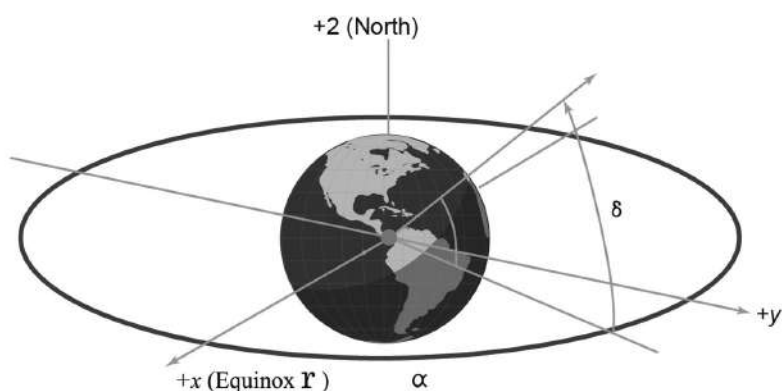
• Anomalía principal: este parámetro fue deducido en el literal 2.2.2; fue calculada con relación a la anomalía excéntrica E y excentricidad de acuerdo con la expresión (1.48) así:

$$M = E - e \cdot \sin E$$

2.1.3.3 Orientación de la órbita en el espacio.

Para determinar la órbita en el espacio se debe hacer un análisis de las coordenadas ecuatoriales a orbitales; el sistema de coordenadas ecuatorial se puede observar en la figura 12, donde el eje de rotación está alineado con el ecuador.

Figura 12. Sistema de coordenadas ecuatorial



Fuente: Montenbruck y Gill (2012)

La rotación se hace sobre el eje z y el plano ecuatorial lo forman los ejes x, y ; además, el eje x para tomar las referencias, se alinea con el equinoccio de primavera Y , ya que éste describe la intersección del plano ecuatorial con el plano orbital (equinoccio de primavera).

Es así como la longitud se mide desde el meridiano de Greenwich hasta el meridiano del lugar; se cuenta desde 0° hasta $+180^\circ$ hacia el este y desde 0° hasta -180° hacia el oeste. La latitud se mide desde el ecuador hacia el norte (0° hasta $+90^\circ$) y hacia el sur (0° hasta -90°).

Por otro lado, en coordenadas polares, también se describen la ascensión α , la declinación δ y la distancia geocéntrica r . La conversión entre estos dos sistemas de coordenadas es:

$$\vec{r} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \delta \cos \alpha \\ \cos \delta \sin \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (1.51)$$

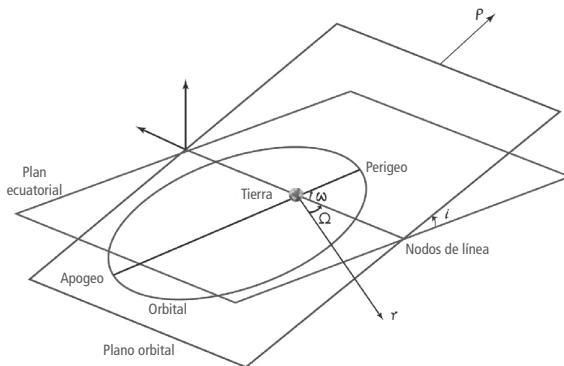
Donde:

$$\alpha = \arctan \frac{y}{x} \quad \delta = \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1.52)$$

$$\left. \begin{array}{l} -90^\circ < \alpha < +90^\circ \text{ para } x > 0 \\ +90^\circ < \alpha < +270^\circ \text{ para } x < 0 \end{array} \right\} \quad (1.53)$$

Se deben asociar las coordenadas ecuatoriales a los elementos orbitales inclinación, recta de ascenso o nodo de ascenso RAAN (Ω) y argumento del perigeo (ω); como se puede observar en la figura 13, el sistema de coordenadas de un satélite se toma en referencia al plano ecuatorial descrito por la Tierra, y el plano orbital descrito por el satélite.

Figura 13. Elementos orbitales



Fuente: Montenbruck y Gill (2012)

En la figura 13 pueden observarse tres vectores: $\vec{P}$, $\vec{Q}$ y $\vec{W}$, conocidos también como vectores unitarios o gaussianos, que provienen del sistema de coordenadas ecuatoriales asociando a los elementos orbitales (Lin y Yan, 2006) así:

- $\vec{W}$ Vector perpendicular al plano de la órbita
 $\vec{P}$ Vector en el plano de la órbita y en el sentido del perigeo
 $\vec{Q}$ Vector en el plano de la órbita y perpendicular a $\vec{P}$ de modo que $\vec{Q} = \vec{W} \wedge \vec{P}$

Los vectores son ortogonales de dos en dos, es decir $\vec{P} \cdot \vec{Q} = \vec{P} \cdot \vec{W} = \vec{Q} \cdot \vec{W} = 0$ y además también son unitarios. Siendo descritos estos vectores, ahora se busca que los ejes de coordenadas rectangulares coincidan con las direcciones de estos tres vectores $\vec{P}$, $\vec{Q}$ y $\vec{W}$. Se realiza un giro en $-\omega$ alrededor del eje W , que define la siguiente matriz:

$$R_z(-\omega) = \begin{bmatrix} \cos \omega & -\sin \omega & 0 \\ \sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.54)$$

De esta forma, el eje $\vec{P}$ pasa a ocupar la línea de nodo, o nodo de línea (línea punteada en la figura 10). En este punto $\vec{Q}$, sigue perpendicular a $\vec{P}$ en el plano orbital, y $\vec{W}$ no se ha movido; ahora se realiza un giro en $-i$ para que el plano orbital quede sobre el plano X, Y , descrito de la siguiente manera:

$$R_x(-i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i & -\sin i \\ 0 & \sin i & \cos i \end{bmatrix} \quad (1.55)$$

En este punto, el eje sigue $\vec{P}$ en el nodo de línea, y $\vec{Q}$ perpendicular a éste sobre el plano fundamental; $\vec{W}$ toma la posición del eje Z . Finalmente, se realiza un giro sobre $Z = \vec{W}$ con un ángulo $-\Omega$, siendo la matriz correspondiente así:

$$R_z(-\Omega) = \begin{bmatrix} \cos \Omega & -\sin \Omega & 0 \\ \sin \Omega & \cos \Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.56)$$

Con este último giro se logra que $\vec{P}$ coincida con X y $\vec{Q}$ con Y . Ahora, realizando el producto de las tres matrices de acuerdo con las expresiones (1.54), (1.55) y (1.56), se obtiene la matriz de cambio así:

$$M = R_z(-\Omega)R_x(-i)R_z(-\omega)$$

Ahora se aplica la matriz M a cada uno de los vectores $\vec{P}$, $\vec{Q}$ y $\vec{W}$ para obtener el resultado en la base X, Y, Z , de la siguiente manera:

$$M = \begin{bmatrix} P_X & Q_X & W_X \\ P_Y & Q_Y & W_Y \\ P_Z & Q_Z & W_Z \end{bmatrix} \quad (1.57)$$

Es decir:

$$\begin{aligned} \vec{P} &= \begin{bmatrix} P_X \\ P_Y \\ P_Z \end{bmatrix} = M * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Omega \cos \omega - \sin \Omega \cos i \sin \omega \\ \cos \omega \sin \Omega + \sin \omega \cos i \cos \Omega \\ \sin \omega \sin i \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \vec{Q} &= \begin{bmatrix} Q_X \\ Q_Y \\ Q_Z \end{bmatrix} = M * \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Omega \cos \omega - \sin \Omega \cos i \sin \omega \\ \cos \omega \sin \Omega + \sin \omega \cos i \cos \Omega \\ \sin \omega \sin i \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \vec{W} &= \begin{bmatrix} W_X \\ W_Y \\ W_Z \end{bmatrix} = M * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Omega \cos \omega - \sin \Omega \cos i \sin \omega \\ \cos \omega \sin \Omega + \sin \omega \cos i \cos \Omega \\ \sin \omega \sin i \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

De estas operaciones matriciales, se obtienen los vectores finalmente así:

$$\vec{P} = \begin{bmatrix} +\cos \omega \cos \Omega - \sin \omega \cos i \sin \Omega \\ +\cos \omega \sin \Omega + \sin \omega \cos i \cos \Omega \\ +\sin \omega \sin i \end{bmatrix}_{X,Y,Z} \quad (1.58)$$

$$\vec{Q} = \begin{bmatrix} -\sin \omega \cos \Omega - \cos \omega \cos i \sin \Omega \\ -\sin \omega \sin \Omega + \cos \omega \cos i \cos \Omega \\ +\cos \omega \sin i \end{bmatrix}_{X,Y,Z} \quad (1.59)$$

$$\vec{W} = \begin{bmatrix} +\sin i \sin \Omega \\ -\sin i \cos \Omega \\ +\cos i \end{bmatrix}_{X,Y,Z} \quad (1.60)$$

Los tres vectores (1.58), (1.59) y (1.60), llamados gaussianos (Mue-ller, 1969), permiten definir en términos de elementos orbitales la orien-tación de la órbita del satélite en el espacio, de tal manera que una vez enunciados los vectores se puede determinar con claridad el cálculo de i, Ω, ω .

- Recta de ascenso o nodo de ascenso: como se observa en la figura 13, Ω es el ángulo que se forma entre el equinoccio de primavera y el punto en el que el satélite cruza el ecuador de sur a norte. En considera-ción de la expresión (1.18), se puede decir que:

$$\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}} = r^2 \cdot \dot{\theta} \cdot (\hat{\mathbf{r}} \times \hat{\boldsymbol{\theta}}) = \mathbf{h}$$

$$\mathbf{h} = \mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}} = \begin{bmatrix} y\dot{z} - z\dot{y} \\ z\dot{x} - x\dot{z} \\ x\dot{y} - y\dot{x} \end{bmatrix}$$

Como h fue obtenida de la posición y la velocidad, se puede hacer la representación de h o de $\vec{W} = \mathbf{h}_{x,y,z}/|h|$, en función tanto de i , como de Ω :

$$\vec{W} = \begin{bmatrix} +\sin i \sin \Omega \\ -\sin i \cos \Omega \\ +\cos i \end{bmatrix}_{X,Y,Z} = \begin{bmatrix} h_x/h \\ h_y/h \\ h_z/h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +W_x \\ -W_y \\ +W_z \end{bmatrix} \quad (1.61)$$

De esta manera, la inclinación y la ascensión recta del nodo se dan en la evaluación de la expresión (1.52) $\alpha = \arctan$, donde el cuadrante de α debe ser seleccionado de tal manera que la señal del dominador X sea igual a la condición vista en la expresión (1.53), así:

$$\begin{aligned} -90^\circ < \alpha < +90^\circ & \quad \text{para } x > 0 \\ +90^\circ < \alpha < +270^\circ & \quad \text{para } x < 0 \end{aligned}$$

Finalmente, se determina Ω en consideración a lo expuesto por Montenbruck y Gill (2012) como:

$$\Omega = \arctan \left[\frac{W_x}{-W_y} \right] \quad (1.62)$$

Inclinación: como se observa en la figura 13, i es el ángulo (inclinación) que se forma entre el plano orbital y el plano ecuatorial, en consideración a lo desarrollado en la expresión (1.62) (Montenbruck y Gill, 2012); i está dado de la siguiente manera:

$$i = \arctan \left(\frac{\sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{W_z} \right) \quad (1.63)$$

Argumento del perigeo: como se observa en la figura 13, ω es el ángulo que se forma entre el nodo de línea y la dirección del perigeo de

la expresión (1.54) y (1.57) resolviendo $\cos \omega$ y $\sin \omega$; de acuerdo con lo expuesto por Montenbruck y Gill 2012), se tiene que:

$$\bar{\omega} = \arctan \left[\frac{z}{-xW_y + yW_x} \right] - \arctan \left[\frac{\sqrt{1-e^2} \sin E}{\cos E - e} \right] \tag{1.64}$$

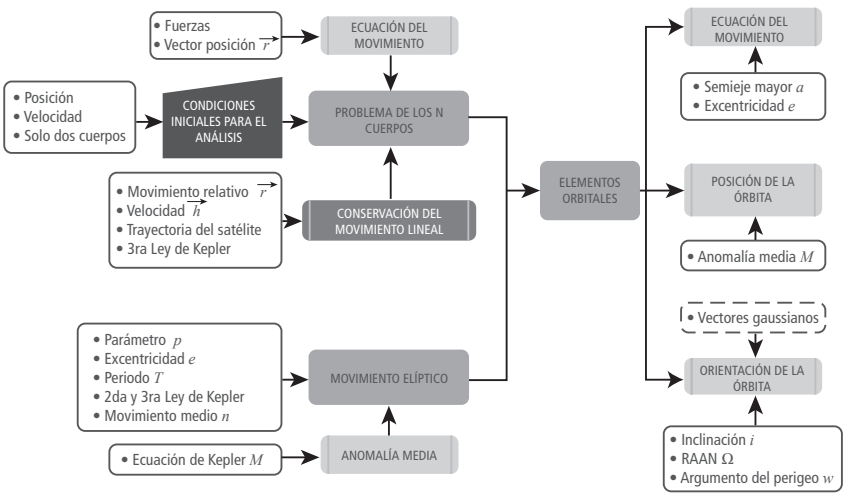
2.2. Métodos y herramientas

En este numeral se explica la metodología empleada en el cálculo de las órbitas; también se presenta la herramienta computacional aplicada en las simulaciones de los modelos de órbitas. Posteriormente, se menciona la manera en que se definieron la cobertura y los tiempos de vuelo para alcanzar una órbita geoestacionaria.

2.2.1. Metodología de diseño

La metodología propuesta se observa en la figura 14, en el diagrama de flujo aplicado en la obtención de las ecuaciones que describen las órbitas, sus formas y la posición del satélite en ellas.

Figura 14. Diagrama de flujo en el diseño de las órbitas

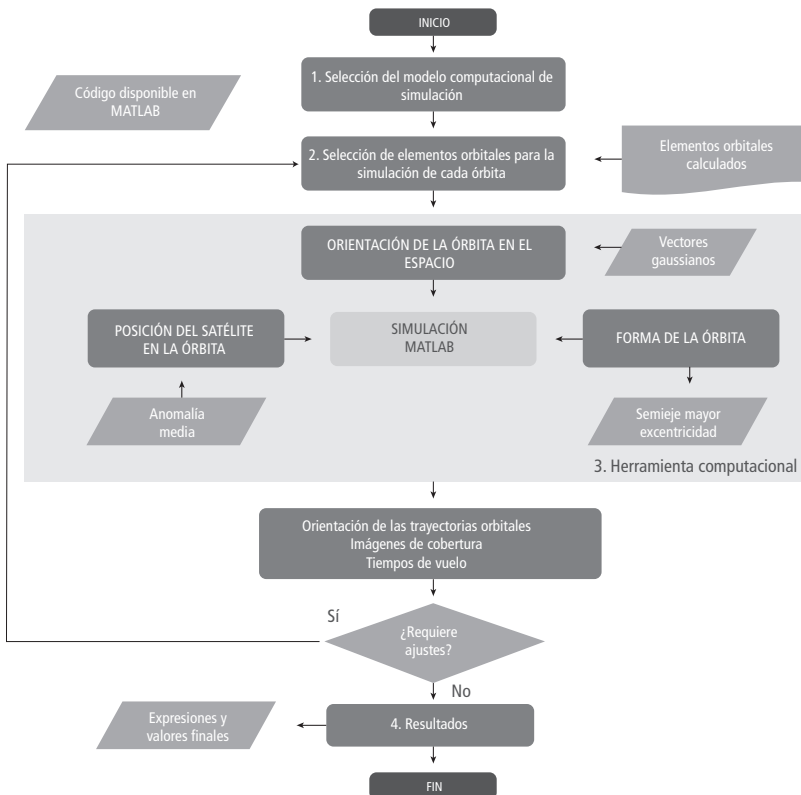


Fuente: Elaboración propia.

2.2.2. Herramienta computacional

La simulación de las órbitas de baja altura (LEO), de media altura (MEO/GTO), y la órbita geoestacionaria propuesta, permite observar de manera dinámica el movimiento que describe el satélite en cada una de ellas y la huella que describe sobre la superficie del planeta. Para la simulación se usó en el software MatLab Versión 7.10 de 2010, sobre el cual se usaron programas que simulan las trayectorias de las órbitas, a partir de los elementos orbitales calculados, así como el tiempo de cobertura sobre Colombia, el cual se calculó usando los periodos de rotación y velocidad del satélite respecto a la Tierra. En la figura 15 se observa el diagrama de flujo de la simulación.

Figura 15. Estructura de la simulación de las órbitas



Fuente: Elaboración propia.

2.3. Valores obtenidos

A continuación, se resumen los resultados analíticos y computacionales de las órbitas descritas. La metodología se basa en el diagrama de flujo presentado en la sección 2.2.1. Esta sección empieza en el diseño, simulación, cálculos de tiempo de vuelo y cobertura, para finalmente hacer la aproximación a los costos de una órbita geoestacionaria.

2.3.1. Variables calculadas

A continuación, se aplica el desarrollo matemático para el cálculo de los elementos orbitales vistos en el apartado 2.2.1, y sobre los cuales se sustentó el diseño de las órbitas.

2.3.1.1. Distancias del satélite. Las distancias entre el satélite y la Tierra se calculan en función de las órbitas que éste describirá desde su posición inicial en una órbita LEO, la transición que debe hacer a una órbita intermedia MEO/GTO, hasta que finalmente sea posicionado en una órbita GEO. Estas órbitas deben ser contempladas necesariamente, porque los costos de posicionamiento y operación de un satélite dependen de la órbita, o mejor, las órbitas que el satélite debe recorrer. El radio de la Tierra según el National Committee Of The International Union Of Geodesy And Geophysics (NCIGG, 2007) es de, por tanto, la órbita inicial LEO propuesta es circular, de 320 Km de altura h_{LEO} , o con un radio de 6.698,14 Km desde el centro de la Tierra como se puede observar en la figura 16.

$$h_{LEO} = 320 \text{ Km} \quad (1.65)$$

$$r_{LEO} = 6698,14 \text{ Km} \quad (1.66)$$

Figura 16. Órbita LEO

Fuente: Elaboración propia usando MatLab 2017.

En la parte izquierda de la figura 16 se observa la trayectoria descrita por la órbita, en color blanco, con una vista sobre Colombia. De acuerdo al Instituto Geográfico Nacional de España (2011), Colombia tiene paralelo sobre el ecuador, y su territorio tiene latitud norte en la frontera con Haití en coordenadas $16^{\circ}10'10''N$ y $79^{\circ}16'40''W$, hasta latitud sur en la frontera con Brasil en coordenadas $04^{\circ}13'36''S$ y $069^{\circ}56'37''W$; por tal razón, se escoge como inclinación mínima 16° , con el fin de garantizar el paso vertical del satélite sobre todo el territorio colombiano en la frontera norte y por ende, hasta latitud $16^{\circ}S$, lo que incluye todo el territorio nacional. En la parte derecha se tiene una vista sobre el polo norte de la órbita descrita.

La órbita de transición o MEO/GTO, es de forma elíptica y se propone que tenga en el perigeo una distancia $h_{perigeo}$ de la superficie de la Tierra igual a 320 kilómetros, igual a h_{LEO} donde se haría la transición, y en el apogeo h_{apogeo} igual a 35786 kilómetros de distancia de la superficie de la Tierra, lo cual se ajusta a lo recomendado por Erdner (2009), como puede evidenciarse en la figura 17, así:

$$h_{perigeo} = 320 \text{ Km} \quad (1.67)$$

$$h_{apogeo} = 35786 \text{ Km} \quad (1.68)$$

Figura 17. Órbita MEO/GTO

Fuente: Elaboración propia usando MatLab 2017.

En la parte izquierda de la figura 17 se observa la trayectoria descrita por la órbita en color blanco, con una vista desde el apogeo sobre Colombia, la cual tiene un ángulo de 16 grados de inclinación; en la parte derecha se tiene una vista sobre el polo norte, observando el apogeo sobre Colombia.

La última distancia por describir será de la órbita geoestacionaria, con radio r_{GEO} , en consideración de la expresión (1.66), y la distancia desde la superficie de la Tierra h_{GEO} ; en la figura 18 puede observar la trayectoria de dicha órbita:

$$r_{GEO} = 42164,140 \text{ Km} \quad (1.69)$$

$$h_{GEO} = 35786 \text{ Km} \quad (1.70)$$

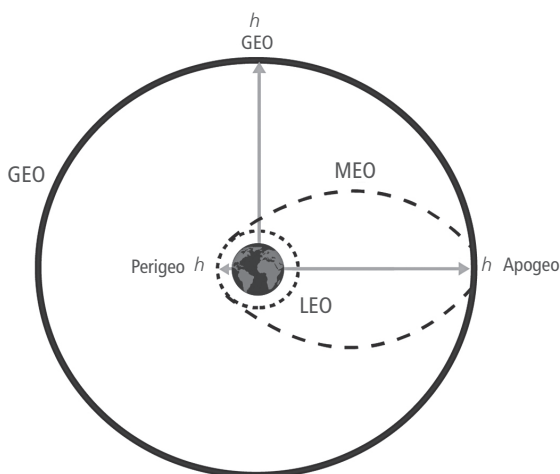
Figura 18. Órbita GEO



Fuente: Elaboración propia usando MatLab 2017.

En la parte izquierda de la figura 18 se observa la trayectoria descrita por la órbita, en color blanco, con una vista sobre Colombia, la cual tiene un ángulo de inclinación de 16 grados; en la parte derecha se tiene una vista sobre el polo norte. Las tres órbitas descritas respecto al planeta Tierra pueden observarse en la figura 19.

Figura 19. Trayectorias de las órbitas respecto a la Tierra.



Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.2. Elementos Orbitales SGC. Fueron definidos para cada una de las tres órbitas propuestas, inicialmente tomando como referencia, lo planteado en el desarrollo de los elementos orbitales, respecto a la forma de la órbita, la posición del satélite en la órbita y la orientación de la órbita en el espacio.

2.3.1.2.1. En la órbita LEO. Para esta primera órbita baja se definen los siguientes elementos orbitales, con relación a ésta es circular, y su semieje mayor es igual al radio definido para ella, así:

- Semieje mayor: $a=320Km \text{ de altura} + \text{radio de la tierra}$
 $a=6698,14 \text{ Km}$ (1.71)

- Excentricidad (e): como se observó la excentricidad en el literal 2.1.2, en la forma de la órbita, se definió para las circunferencias (e) con un valor de (0) cero; en consecuencia, con la primera órbita baja o LEO, la órbita descrita es una circunferencia de 320 Km de altura y por tanto excentricidad cero.

$$e=0 \quad (1.72)$$

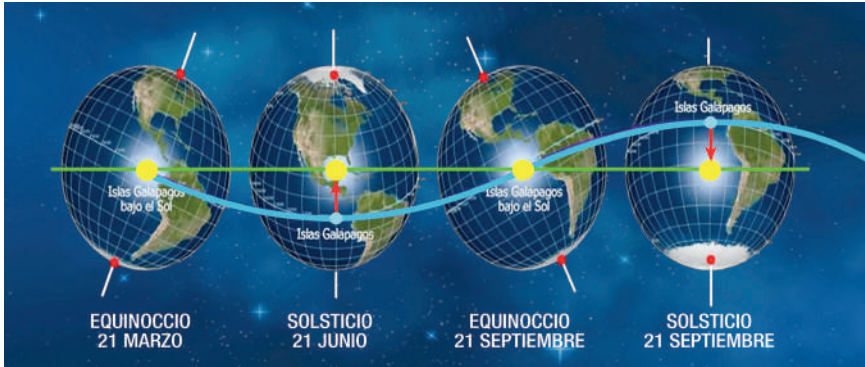
- Anomalía media (M): determina la posición inicial del cuerpo celeste; en este caso, el satélite alrededor de la Tierra, para esta órbita, tendrá un valor de 180° , en relación con la ubicación respecto al eje formado por el RAAN, siendo (180) en el perigeo donde se realiza el cambio a la órbita intermedia o MEO/GTO.

$$M=180^\circ \quad (1.73)$$

La recta de ascensión o el nodo de ascensión (RAAN) se calculó definiendo inicialmente la posición del equinoccio de primavera para la época actual (PijamSurf, 2011), es decir, el registrado el 21 de marzo de 2016 a las 04:30 horas del meridiano de Greenwich, 9:30 hora de Colombia, el cual, haciendo una proyección sobre la Tierra, sucedió exactamente sobre las Islas Galápagos en Ecuador, en el Meridiano W093,

de acuerdo a lo expuesto por Hoya (2016), y como se puede observar en la figura 20, así:

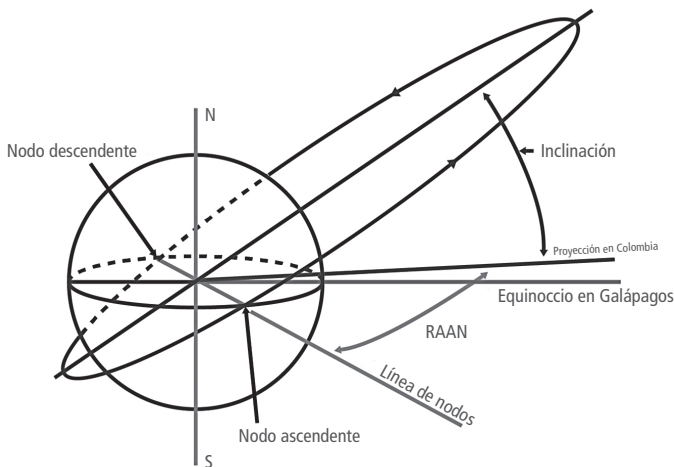
Figura 20. Solsticios y equinoccios



Fuente: Hoya (2016)

En consideración a la figura 20, se define un RAAN para que la ascensión de la órbita proyecte el semieje mayor sobre Suramérica, específicamente sobre territorio colombiano, como se muestra a continuación:

Figura 21. Ángulo RAAN y relación con el equinoccio



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 21 se puede observar de color rojo, la línea que proyecta el equinoccio sobre las Islas Galápagos, y perpendicular a la línea de nodos de color verde; de color azul se observa la línea o proyección del apogeo sobre el territorio colombiano, de tal forma que el ángulo RAAN se calculó desde la línea de color verde hasta la línea azul, o de proyección del apogeo sobre Colombia. El meridiano escogido sobre Colombia es el W75, es decir que, si desde la línea de nodos hasta la Islas Galápagos hay 90 grados, y desde la Islas Galápagos en el meridiano W93 hasta el meridiano W75 sobre Colombia hay 18 grados más, la distancia en grados desde el nodo de línea hasta la proyección sobre Colombia es 108°, y en consideración de la expresión (1.62) se observa que:

$$\begin{aligned}
 \text{RAAN} \quad \pi \leq \Omega \leq 2\pi \\
 93^\circ - 75^\circ = 18^\circ \\
 \Omega = 18^\circ + 90^\circ = 108^\circ \\
 \Omega = 108^\circ
 \end{aligned} \tag{1.74}$$

• Inclinación (i): garantizando la cobertura sobre todo el territorio colombiano fue seleccionada una inclinación como se observa a continuación:

$$i=16^\circ \tag{1.75}$$

• Argumento del perigeo (ω): es el ángulo que se forma entre el nodo de línea y la dirección del perigeo; para este caso, el plano orbital (circunferencia) se proyecta sobre el nodo de línea y en el sentido del perigeo, como posición inicial del satélite, por lo cual el ángulo es cero (0°).

$$\cos(\omega) = \frac{n \cdot i}{n \cdot i} = 0^\circ \tag{1.76}$$

2.3.1.2.2. *En la órbita MEO/GTO.* Para esta órbita intermedia o de transición, se definen los siguientes elementos orbitales, teniendo como referencia la expresión (1.49):

- Semieje mayor:
$$a = \frac{1}{2}(r_{min} + r_{max})$$
$$a = 24431.14 \text{ Km} \quad (1.77)$$

• Excentricidad: en el literal 2.1.2 sobre la forma de la órbita, se definió para las órbitas elípticas (e) con un valor comprendido entre $0 < e < 1$; en consecuencia, con la órbita elíptica o de transición MEO/GTO, con el perigeo y el apogeo descritos, y las expresiones (1.32) y (1.33), se obtiene que:

$$a = \frac{P}{1 + e^2}$$

$$e = \sqrt{1 - 0.4729} = 0,726$$

$$e = 0,726 \quad (1.78)$$

• Anomalía media (M): determina la posición inicial del cuerpo celeste; en este caso, para el satélite alrededor de la Tierra para esta órbita, se asume un valor inicial de 180° grados, que es el ángulo en el apogeo, donde la anomalía verdadera, excéntrica y media tienen el mismo valor, y que además es donde se realiza el cambio a la de transición a la órbita geoestacionaria, punto inicial seleccionado porque se proyecta sobre Suramérica, específicamente sobre Colombia.

$$M = 180^\circ \quad (1.79)$$

• RAAN: definido para esta órbita es igual que para la órbita LEO y GEO como se observa en la expresión (1.74).

$$\text{RAAN} \quad \pi \leq \Omega \leq 2\pi$$

$$\Omega = 108^\circ \quad (1.80)$$

• Inclinação (i): similar a la inclinación real de la Tierra como se definió en la expresión (1.75). De esta manera se mantiene el plano ecuatorial

$$i = 16^\circ \quad (1.81)$$

• Argumento del perigeo (ω): definido para esta órbita es igual que para la órbita LEO y GEO de acuerdo con la expresión (1.76), que es el punto máximo de apertura o distancia de la órbita sobre el territorio colombiano.

$$\cos(\omega) = \frac{n \cdot i}{n \cdot i} = 0^\circ \quad (1.82)$$

2.3.1.2.3. *En la órbita MEO/GTO.* Para esta última órbita, los elementos orbitales finalmente fueron definidos así:

• Semieje mayor: $a=42164,14 \text{ Km}$ (1.83)

• Excentricidad (e): como se observó la excentricidad en el literal 2.1.2, las órbitas y sus formas, se definió para las circunferencias (e) con un valor de (0) cero, en consecuencia con la órbita final geoestacionaria descrita con una altura de 36.000 km y de forma circular, la excentricidad es cero.

$$e=0 \quad (1.84)$$

• Anomalía media (M): al igual que la descrita en la órbita MEO/GTO y la expresión (4.15), se ha definido un valor de:

$$M=180^\circ \quad (1.85)$$

• RAAN: definido para esta órbita es igual que para la órbita LEO y MEO/GTO como se observa en la expresión (1.74) y (1.80).

$$\begin{aligned} \text{RAAN} \quad \pi \leq \Omega \leq 2\pi \\ \Omega = 108^\circ \end{aligned} \quad (1.86)$$

- **Inclinación (i):** para esta órbita es seleccionada de tal manera que siempre esté en el plano ecuatorial, logrando así su permanencia sobre el territorio colombiano en la posición seleccionada así:

$$i = 16^\circ \quad (1.87)$$

- **Argumento del perigeo (ω):** definido para esta órbita es igual que para la órbita LEO y MEO/GTO de acuerdo con las expresiones (1.76) y (1.82).

$$\cos(\omega) = \frac{n \cdot i}{n + i} = 0 \quad (1.88)$$

Considerando las expresiones (1.58), (1.59) y (1.60), los vectores que describen la forma de la órbita son:

$$\vec{P} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,30901 \\ +0,95105 \\ 0 \end{bmatrix}_{x,y,z}$$

$$\vec{Q} = \begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,91421 \\ +0,91421 \\ +0,27563 \end{bmatrix}_{x,y,z}$$

$$\vec{W} = \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +0,26214 \\ +0,08517 \\ +0,96126 \end{bmatrix}_{x,y,z}$$

2.3.1.3. Velocidades y periodos. Se parte de definir la órbita geoestacionaria como aquella que respecto al plano ecuatorial terrestre mantiene con una excentricidad igual o muy cercana a cero, ya que su órbita es circular. De acuerdo con la ley de velocidad de Vis-Viva (Bodanis, 2001), se plantea para una órbita circular o elíptica que:

$$v_{Circular} = \sqrt{\frac{GM}{a}} \quad (1.89)$$

$$a = r$$

El periodo de la órbita circular de la expresión (1.89) Goldstein (1980), estará determinado por:

$$T_{circular} = 2\pi\sqrt{\frac{a^3}{GM}} \quad (1.90)$$

Las velocidades del perigeo y del apogeo serán las mismas, debido a que la excentricidad e es cero, como se puede observar en el siguiente análisis:

$$v_{perigeo} = \sqrt{\frac{GM}{a}} * \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \quad (1.91)$$

$$v_{apogeo} = \sqrt{\frac{GM}{a}} * \sqrt{\frac{1-e}{1+e}} \quad (1.92)$$

Ahora se define la velocidad de satelización o primera velocidad cósmica, la cual es la mínima que debe tener un objeto o cuerpo para que entre en órbita alrededor de la Tierra con la expresión (1.65), y despreciando el rozamiento del aire (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2012).

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{a}} \quad (1.93)$$

Se llama a la segunda velocidad cósmica o velocidad de escape, a la velocidad mínima que se debe imprimir a un cuerpo para que abandone la órbita circular baja alrededor de la Tierra; se obtiene con la velocidad parabólica, ya que lo que se busca es que el cuerpo con esta segunda velocidad describa una elipse.

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{a}} \quad (1.94)$$

Para que los cuerpos entren en órbita geoestacionaria, se deben lanzar en la dirección del movimiento de la Tierra alrededor del Sol, lo cual desacelera el cuerpo colocándolo en dicha órbita. Que un cuerpo (en este caso un satélite), tenga órbita geoestacionaria, equivale a decir que la velocidad angular del satélite puesta en órbita circular sea igual que la de la Tierra ϖ .

$$v_{circ} = \varpi * r$$

$$v_{circ}^2 = \varpi^2 * r^2$$

Y sustituyendo:

$$\frac{GM}{r} = \varpi^2 * r^2$$

$$GM = \varpi^2 * r^3$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{GM}{\varpi^2}} \quad (1.95)$$

Donde ϖ es la duración del día sidéreo en tiempo solar medio (Aoki y Kinoshita 1982; Senovilla, 2012), es decir 86.164 segundos; ahora, si H es la altura del satélite respecto a la superficie de la Tierra, y A el radio de la Tierra según expresión (1.66), se obtiene:

$$H=R-A \quad (1.96)$$

R =distancia total del satélite al centro de la tierra.

Finalmente, H es la altura en la que un satélite es denominado geo-síncrono o geoestacionario; esta altura H ha sido calculada en aproximadamente 35.776,9 Km (Erdner, 2009). En la tabla 1 se pueden observar los valores calculados de velocidades y periodos para las tres órbitas.

Tabla 1. Velocidades y periodos en las tres órbitas

Órbita	Velocidad	Periodo	Grados por minuto
LEO	$v_{circular} = 7,714 \text{ km/s}$	$T_{circular} = 5,46 \times 10^3 \text{ s} = 90,92 \text{ min}$	$3,95^\circ$
MEO/ GTO	$v_{apogeo} = 1,6093 \text{ km/s}$ $v_{perigeo} = 10,1379 \text{ km/s}$	$T = 38001,1 \text{ Segundos} = 633.35$	$158,33^\circ$
GEO	$v_{Geo} = 3,0746 \text{ km/s}$	$T_{Geo} = 23 \text{ Horas} + 56 \text{ minutos} + 4,0003 \text{ Segundos} \approx 1 \text{ día}$	0°

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.4. Expresiones finales del SGC. Las expresiones finales que representan los movimientos de las tres órbitas del SGC, iniciando con la órbita de satelización o LEO, pasando posteriormente a la órbita de transición o MEO/GTO, para finalmente llegar a la órbita geoestacionaria sobre Colombia, se pueden observar en la tabla 2.

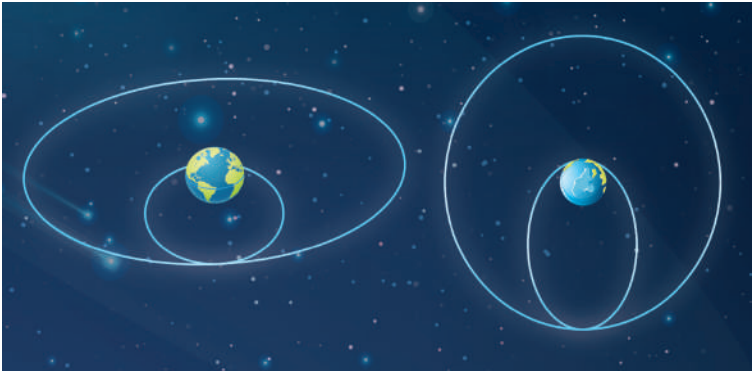
Tabla 2. Elementos orbitales por órbita

Elemento	Órbita	LEO	MEO/GTO	GEO
Semieje mayor	(<i>a</i>)	6698,14 Km	24431,14 Km	42164,14 Km
RAAN	(Ω)	108°	108°	108°
Argumento del perigeo	(ω)	90°	90°	90°
Inclinación	(<i>i</i>)	16°	16°	16°
Excentricidad	(<i>e</i>)	0	0,726	0
Anomalía media	(<i>M</i>)	180°	180°	180°

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 22 se pueden observar las trayectorias de las tres órbitas en color blanco respecto al planeta Tierra; asimismo, en el costado izquierdo con vista desde Colombia, y en el costado derecho con vista desde el polo norte.

Figura 22. Las tres órbitas



Fuente: Elaboración propia.

2.3.2. Simulación y análisis de la órbita

En este acápite se describe el programa utilizado y los cálculos obtenidos, tanto en tiempo de vuelo del satélite como los de cobertura y las huellas sobre el planeta Tierra. Para la simulación, se consideraron librerías y ejercicios publicados por MathLab Corporation (2014) y Jin, Jian, Quiao y Guo (2012), que con adaptación hecha por los autores lograron una simulación exitosa, utilizando las siguientes librerías de MatLab: Absolute Angular Acceleration; Convert Keplerian; Orbital Elements to a State Vector; Satélite Orbit Computation; Cowell's Method for Earth Satellites; Quaternions from Euler Angles, Euler Axis and Angle; The Circular-Restricted Three-Body Problem; Doppler Applications in LEO Satellite Communication Systems; y Orbital Periods of a Satellite.

Una vez tenido en cuenta el software disponible y lo descrito por De Orús, et al. (2007), se efectuaron las simulaciones de cada una de las órbitas y sus elementos orbitales calculados anteriormente, con lo que se aterriza el concepto de forma de la órbita, cobertura y periodos de una manera visual.

2.3.2.1. Cálculos de energía. El cálculo de energía en cada una de las órbitas permite conocer cuánta se debe imprimir en el satélite para lograr el cambio y/o transición del mismo entre las órbitas hasta su posicionamiento final. Además, entre más energía requiera un satélite para su posicionamiento y control, mayor será el consumo de combustible para realizar cambios de velocidad. La energía se describe por las siguientes ecuaciones:

$$E_{Cinetica} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.97)$$

$$E_{Potencial} = \frac{GM}{r} \quad (1.98)$$

$$E_{total} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GM}{r} \quad (1.99)$$

Los cálculos descritos en la tabla 3, se realizaron con las velocidades calculadas para cada órbita en la tabla 1.

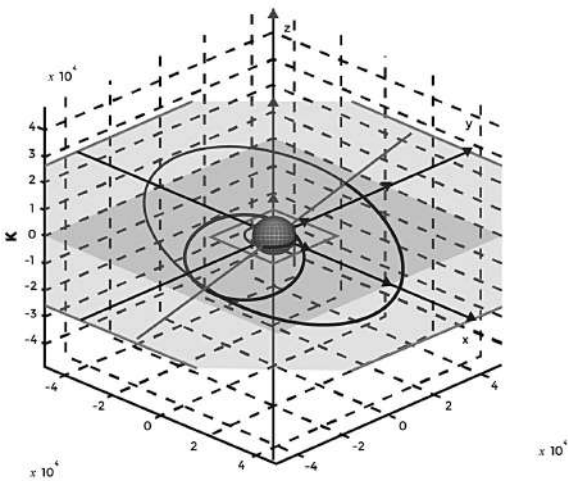
Tabla 3. Energía en las tres órbitas

Órbita	Energía cinética	Energía potencial	Energía total
LEO	$1,49 \times 10^9 J$	$59,6 \times 10^6 J$	$1,5496 J$
MEO/ GTO	$E_{perigeo} = 2,57 \times 10^9 J$	$E_{perigeo} = 59,6 \times 10^6 J$	$E_{perigeo} = 2,629 \times 10^9 J$
	$E_{apogeo} = 64,7 \times 10^6 J$	$E_{apogeo} = 9,453 \times 10^6 J$	$E_{apogeo} = 74,15 \times 10^6 J$
GEO	$236 \times 10^6 J$	$9,45 \times 10^6 J$	$246 \times 10^6 J$

Fuente: Elaboración propia.

2.3.2.2. Tiempo de vuelo “T.O.F.”. El tiempo de vuelo del satélite T.O.F (Widnal y Peraire, 2008), está descrito por los tiempos mínimos que se requieren, para que una vez puesto en la órbita LEO, realice el vuelo por la órbita MEO/GTO o de transferencia, también conocida como la órbita de transferencia de Hohmann (Baruh, 1999), hasta su posición final en la órbita geoestacionaria sobre Colombia.

Figura 23. Trayectorias descritas por las tres órbitas



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 23 se observan las trayectorias de las tres órbitas, con relación a los elementos orbitales descritos, siendo la línea verde la recta o nodo de ascensión RAAN, y el círculo rojo, la posición inicial del satélite. Inicialmente, se calculó el Δv_1 , que representa el cambio de velocidad de la órbita LEO u órbita baja, a la órbita de transición u órbita media MEO/GTO, como se observa en la figura 24; para ello se utilizaron los valores descritos en la tabla 1 de la siguiente manera:

Figura 24. Cambios de Velocidad para intercambiar de Órbita

$$\begin{aligned}\Delta v_1 &= |v_{perigeo} - v_{Circular}| = |10,1379 \text{ Km/s} - 7,714 \text{ Km/s}| \\ \Delta v_1 &= 2,4239 \text{ Km/s}\end{aligned}\tag{1.100}$$

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se calculó el Δv_2 , el cual constituye el cambio de velocidad en el satélite para que abandone la órbita de transferencia o media MEO/GTO y se poseione en la órbita final deseada o geoestacionaria GEO, para lo cual se utilizaron los valores descritos en la tabla 1, así:

$$\begin{aligned}\Delta v_2 &= |v_{Geo} - v_{apogeo}| = |3,0746 \text{ Km/s} - 1,6093 \text{ Km/s}| \\ \Delta v_2 &= 1,4653 \text{ Km/s}\end{aligned}\tag{1.101}$$

También se calculó el cambio de energía que se debe imprimir al satélite para lograr el cambio de órbita, usando los valores descritos en la tabla 3, siendo ΔE_1 la energía requerida para pasar de la órbita LEO a la órbita MEO/GTO, y ΔE_2 la energía requerida para pasar de la órbita MEO/GTO la Órbita GEO respectivamente.

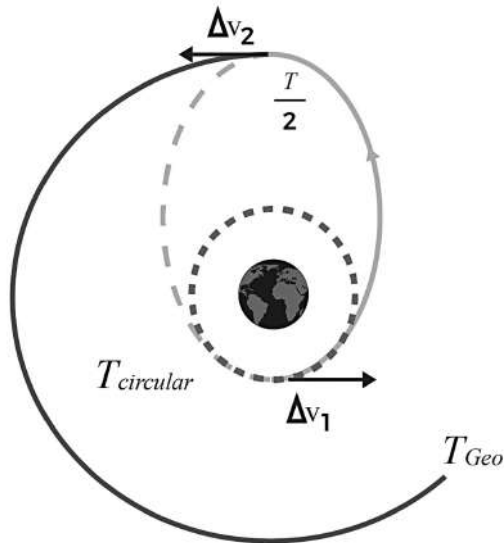
$$\begin{aligned}E_{LEO} &= 1,5496 \text{ J} \\ E_{total\ apogeo} &= 74,153 \times 10^6 \text{ J} \\ E_{total\ perigeo} &= 2,629 \times 10^9 \text{ J} \\ E_{GEO} &= 246 \times 10^6 \text{ J}\end{aligned}$$

$$\Delta E_1 = 74,153 \times 10^6 J - 1,5496 J = 74,1529 \times 10^6 J \quad (1.102)$$

$$\Delta E_2 = 2,629 \times 10^9 J - 246 \times 10^6 J = 2,3830 \times 10^9 J \quad (1.103)$$

Una vez calculadas las variaciones de velocidad y energía, se estimaron los tiempos de acuerdo con los periodos, para conocer el instante exacto sobre el cual se realizan los cambios de velocidad y de esa manera pasar el satélite de una órbita a otra conservando los parámetros definidos como son los elementos orbitales y la distancia.

Figura 25. Periodos y cambios de órbita



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 25 se observa en color amarillo la trayectoria de la órbita MEO/GTO, en azul la órbita LEO, y en color rojo la órbita geoestacionaria final o GEO. Para calcular el tiempo, se usaron las expresiones (1.90) y (1.92), así:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM}}$$

$$T.O.F = \frac{T}{2} = \pi \sqrt{\frac{(24430 \text{ Km})^3}{398600,4405 \text{ Km}^3/\text{s}^2}} = 19000,550592627 \text{ segundos}$$

$$T.O.F = 19000,550592627 \text{ segundos} \approx 316.6758 \text{ minutos} \approx 5,2779 \text{ Horas}$$

Finalmente, el tiempo de vuelo del satélite sobre la órbita MEO/GTO hasta alcanzar el punto de transferencia a la órbita GEO está dado por:

$$T.O.F = 5 \text{ horas} + 16 \text{ minutos} + 40,55 \text{ segundos} \quad (1.104)$$

En la tabla 4 se ven de manera resumida los cálculos del T.O.F. tiempo de vuelo, hasta la órbita GEO.

Tabla 4. T.O.F. Tiempos de vuelo en la órbita de transferencia

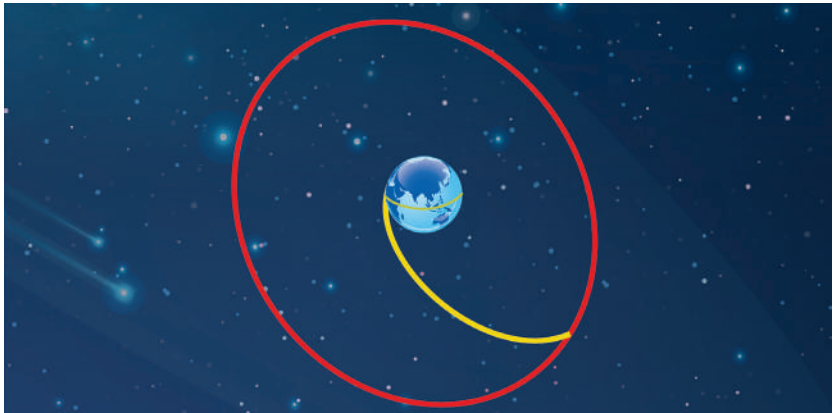
Δv_1	2,4239 Km/s
Δv_2	1,4653 Km/s
Δv_{total}	3,8892 Km/s
ΔE_1	74,1529x 10 ⁶ J
ΔE_2	2,3830x 10 ⁹ J
T.O.F	5 horas, 16 min, 40,55 seg

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 26 se puede observar en el software STK, las trayectorias de las órbitas de transferencia de Hohmann²⁴.

24 En la astronáutica e ingeniería aeroespacial, la órbita de transferencia de Hohmann es una maniobra orbital que, bajo las hipótesis comunes de la astrodinámica, traslada a una nave espacial desde una órbita circular a otra utilizando dos impulsos de su motor. Como se observa en la figura 23, la órbita de transferencia de Hohmann es una mitad de una órbita elíptica que toca tanto la órbita inicial que se desea dejar (en verde), y la órbita final que se quiere alcanzar (en rojo). Por ende, la órbita de transferencia (en amarillo), se inicia disparando el motor de la nave espacial para acelerarla creando una órbita elíptica; esto añade energía a la órbita de la nave espacial. Cuando la nave alcanza la órbita final, su velocidad orbital debe ser incrementada de nuevo para hacer una nueva órbita circular.

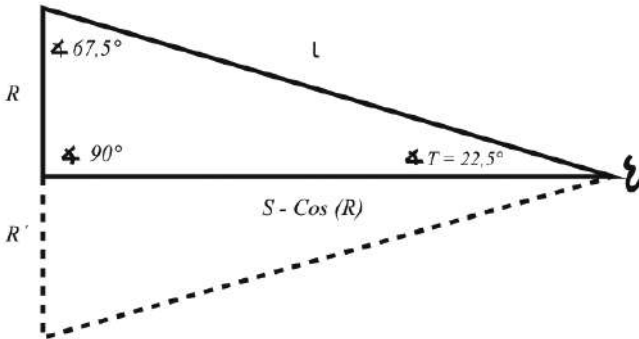
Figura 26. Transferencia de órbitas (STK software)



Fuente: Elaboración propia usando software STK.

2.3.2.3. Cobertura del satélite. El cómputo de la zona de cobertura del satélite se efectuó para cada órbita (LEO-MEO/GTO y finalmente la órbita deseada GEO), por la línea de vista sobre un área encima de la superficie del planeta. Se logró aplicando la geometría de la perspectiva polar (Poveda, 2016), es decir, el alcance visual del satélite está relacionado directamente con su altura sobre la superficie del planeta. Lo anterior puede observarse de manera básica en la figura 27, como lo propone Ostrander (1970):

Figura 27. Geometría de la perspectiva polar



Fuente: Ostrander (1970)

En la figura 27 se observan la variable T , que es el ángulo que relaciona la línea de vista del observador y el arco que forma R o el radio de la Tierra, y que una vez calculado se usa para relacionar el meridiano máximo sobre el cual el observador tendrá línea de vista. También está s , que es la distancia desde el observador y el centro de la Tierra y, por último, esta l , que es la distancia sobre horizonte, vista desde el observador. Para este caso en particular, el observador es el SGC durante su vuelo desde la órbita LEO hasta la órbita GEO. De acuerdo con lo enunciado por Ostrander (1970), el arco R estará limitado por $R \leq \sin^{-1}\left(\frac{1}{S}\right)$; con los planteamientos anteriores, T está definido de la siguiente manera:

$$\tan(T) = \frac{\sin(R)}{S - \cos(R)}$$

$$T = \tan^{-1} \left[\frac{\sin(R)}{S - \cos(R)} \right] \quad (1.105)$$

Se calculan las distancias considerando las expresiones (1.66) y (1.68):

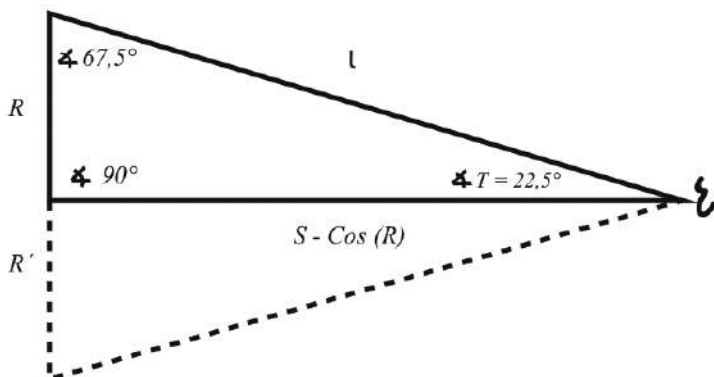
$$\begin{aligned} \cos(45) * (6378,14) &= 4510,026Km \\ 4510,026Km + (S - \cos(R)) &= 6698,14Km \text{ Órbita LEO} \\ S - \cos(R) &= 2188,114Km \text{ En LEO} \end{aligned} \quad (1.106)$$

En el perigeo de la órbita MEO/GTO es similar que el de la órbita LEO, debido a que tienen el mismo radio desde la Tierra.

$$\begin{aligned} 4510,026Km + (S - \cos(R)) &= 42164,14Km \text{ En Apogeo MEO/GTO} \\ S - \cos(R) &= 37653,988Km \text{ En Apogeo MEO/GTO} \end{aligned} \quad (1.107)$$

En GEO es similar que en el apogeo de la órbita MEO/GTO, dado que tienen el mismo radio desde la Tierra.

Aplicando el teorema de los senos y, considerando un  $T=22,5^\circ$ (un ángulo de 45° total de la figura 25), se puede deducir el área de cobertura así:

Figura 28. Línea de vista

Fuente: Elaboración propia.

$$\frac{S - \cos(R)}{\sin(67,5)} = \frac{R}{\sin(22,5)} \quad \text{se despeja } R \quad (1.108)$$

Conociendo R , se realizan los cálculos de cobertura para cada una de las órbitas como se expone a continuación:

2.3.2.3.1. *Cobertura en la órbita LEO.* Se hacen los cálculos de línea de vista máxima, aplicando las expresiones (1.66), (1.67), (1.106) y (1.108), de la siguiente manera:

$$\frac{2188,114Km}{\sin(67,5)} = \frac{R}{\sin(22,5)} \Rightarrow R = 956,3464Km$$

$$R + R' = 956,3464Km * 2 = 1912,6929896Km$$

$$1912,6929896Km = 1032,7715 Nmi$$

Este valor se convirtió en Millas Náuticas (), con el fin de averiguar cuántos meridianos tanto al este como al oeste, y cuántos paralelos al norte y al sur es el área aproximada de cobertura visual del satélite; además, la distancia entre paralelos es de 1° entre cada uno; un grado es equivalente a 60 millas náuticas de distancia²⁵. Por tanto, la cantidad

25 Para los meridianos, la distancia se evalúa diferente si es en la línea ecuatorial o en los polos, debido

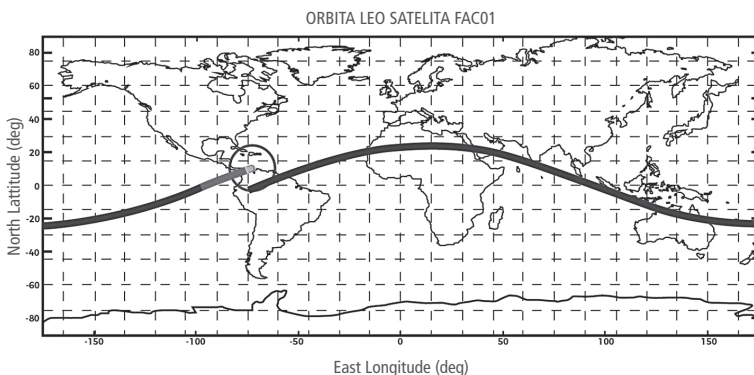
aproximada de paralelos y de meridianos de la posición de huella inicial del satélite definida como N 00° 00' 00" W 75° 00' 00", será:

$$\text{Paralelos y Meridianos} = \frac{1032,7715 \text{ Nmi}}{60 \text{ Nmi}} = 17,21 \Rightarrow 18 \quad (1.109)$$

De acuerdo con la expresión (1.109), se aproxima a 18 el número de paralelos, para manejar un número que permita dividir de manera proporcional y entera los meridianos y paralelos alrededor del punto central de la huella del satélite. Siendo 18 los paralelos totales del alcance visual, se distribuyen entonces nueve de las coordenadas iniciales al norte y nueve paralelos al sur, hasta N 09° y S 09°; de igual manera con los meridianos sobre el eje ecuatorial, serán nueve meridianos al este y nueve al oeste, hasta W 84° y W 66°.

Simulado en Matlab las expresiones (1.62), (1.63) y (1.109), se obtiene la proyección de la órbita y su cobertura sobre la superficie terrestre (figura 29). Considerando la rotación de la Tierra, el punto de color amarillo es la proyección exacta del satélite sobre la superficie terrestre, y el círculo alrededor de éste, el área del alcance de vista sobre el horizonte de acuerdo con la expresión (1.106).

Figura 29. Cobertura órbita inicial (LEO) SGC



Fuente: Elaboración propia usando Software MatLab.

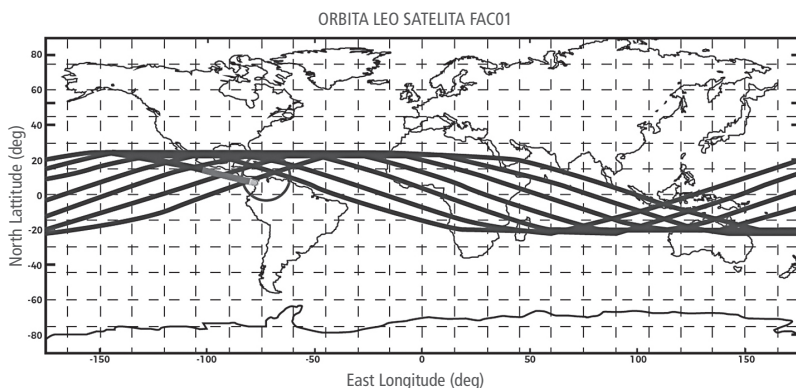
a la convergencia que tienen éstos en los dos polos. Para el caso de estudio del presente capítulo, y por tratarse de cálculos sobre la línea ecuatorial, la distancia entre meridianos es aproximadamente de 60 millas náuticas.

En la figura 29 se observa una discontinuidad en la trayectoria del satélite sobre Colombia, por efecto del movimiento de rotación de la Tierra. Con base en las expresiones (1.109) y los valores descritos en la tabla 1, el satélite en este caso tendrá un tiempo de cobertura sobre Colombia así:

$$\frac{18^\circ}{3,9592^\circ/\text{min}} = 4,5463 \text{ min}$$

El tiempo de cobertura es de 4,5463 min en la órbita inicial, nuevamente el satélite tendrá cobertura sobre Colombia en la órbita número 7, lo cual tardará 10 horas 36 minutos y 29 segundos; dichas órbitas se pueden observar en la figura 30.

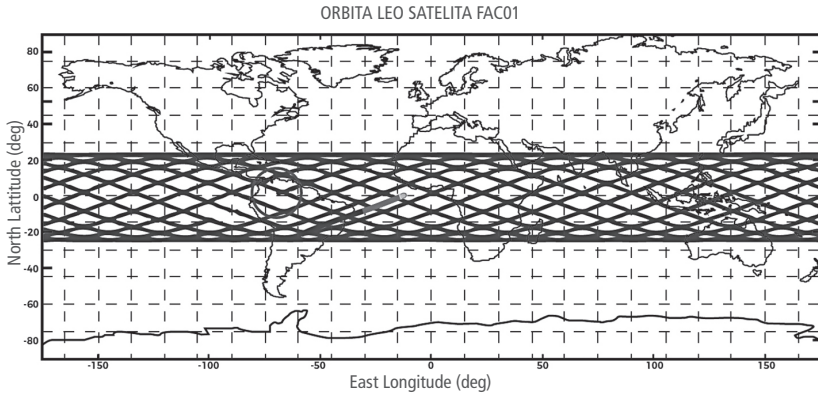
Figura 30. Cobertura órbita No 7 (LEO) SGC



Fuente: Elaboración propia usando Software MatLab.

Por último, en esta órbita baja LEO, y los periodos descritos en la expresión (1.70), se tiene que el satélite pasa por su posición inicial cada 15 órbitas, tomándole un tiempo de 22 horas 43 minutos y 54 segundos, como se puede observar en la figura 31.

Figura 31. Cobertura órbita No 15 (LEO) SGC



Fuente: Elaboración propia usando Software MatLab.

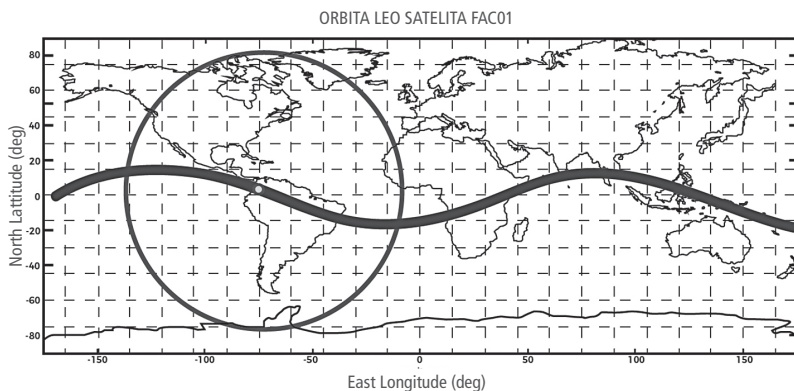
2.3.2.3.2. Cobertura en la órbita MEO/GTO. Se hacen los cálculos aplicando las expresiones (1.66), (1.67), (1.106) (1.107) y (1.108) para el apogeo y perigeo; puntualmente, en el perigeo, los cálculos de cobertura son exactamente los mismos que en la órbita LEO, en vista de que tienen el mismo radio.

Siendo 18 los paralelos totales del alcance visual distribuidos así: nueve de las coordenadas iniciales al norte y nueve paralelos al sur, hasta N 09° y S 09°. De igual manera con los meridianos sobre el eje ecuatorial, serán nueve meridianos al este y nueve al oeste, desde W 84° a W 66°

En el apogeo la cobertura cambia en razón a la distancia del satélite respecto al centro de la Tierra así:

$$\begin{aligned}
 S - \cos(R) &= 37653,988Km \\
 \frac{37653,988Km}{\sin(67,5)} &= \frac{R}{\sin(22,5)} \Rightarrow R = 15596,7925Km \\
 R + R' &= 15596,7925Km * 2 = 31193,5850Km \\
 31193,5850Km &= 16843,1884 Nmi
 \end{aligned} \tag{1.110}$$

El valor descrito en (1.110) es muy superior al valor del radio de la Tierra, por lo cual la cobertura del satélite es de toda la cara del planeta expuesta a él cuando se encuentra en el apogeo; se puede observar la huella por la línea de vista sobre la superficie terrestre en la figura 32.

Figura 32. Cobertura desde el apogeo órbita MEO/GTO SGC

Fuente: Elaboración propia usando Software MatLab.

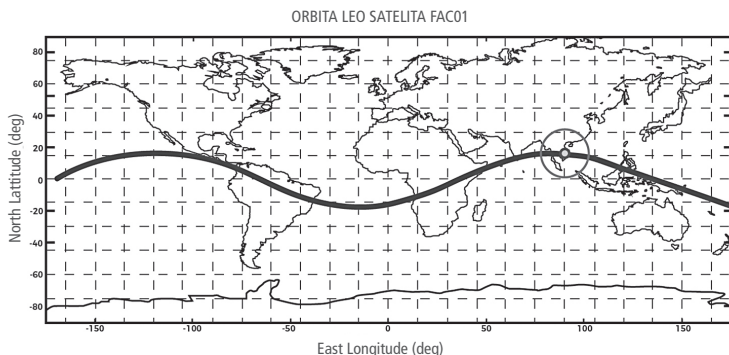
En la figura 32 se ha demarcado con un círculo, el área de cobertura en el apogeo de la órbita, mientras que el punto claro representa la proyección del satélite sobre la superficie de la Tierra y la línea que atraviesa el mapa muestra la trayectoria que describe el satélite en la primera rotación sobre el planeta. Considerando los periodos descritos en la tabla 1, se puede inferir que el satélite pasará dos veces al día sobre territorio colombiano; la velocidad en el perigeo determina el tiempo que estará en el costado opuesto del planeta, con relación a la posición geográfica de Colombia, de tal manera que el tiempo de recorrido de los 180° antes de salir en el horizonte será:

$$\frac{180^\circ}{3,9592^\circ/\text{minuto}} = 45,46 \text{ minutos}$$

El recorrido total de la órbita describe una trayectoria como la que puede observarse en la figura 33. Este tiempo es usado ahora para restar al periodo total de la órbita MEO/GTO, con lo cual se obtiene el tiempo de exposición sobre Colombia así:

$$\begin{aligned} 633,351690 \text{ min} - 45,46 \text{ min} &= 587,8879 \text{ min} \\ 587,8879 \text{ min} &= 9 \text{ horas} + 47 \text{ min} + 53 \text{ seg} \\ \text{Tiempo de Coertura MEO} &= 9 \text{ horas} + 47 \text{ min} + 53 \text{ seg} \end{aligned}$$

Figura 33. Cobertura desde el perigeo órbita MEO/GTO SGC

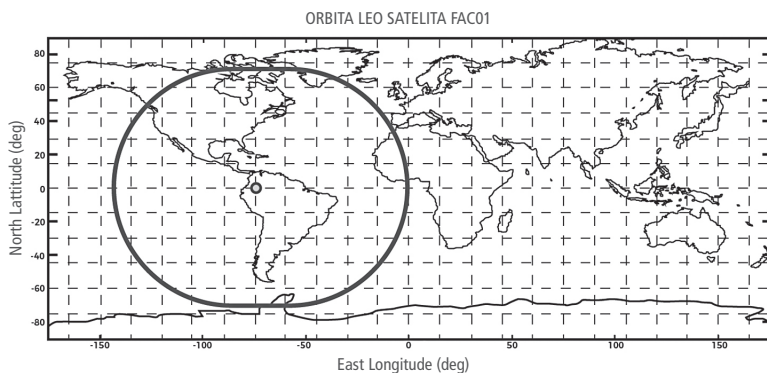


Fuente: Elaboración propia usando Software MatLab.

En la figura 33, la línea curva representa la trayectoria que describe el satélite en la primera rotación sobre el planeta; el círculo, la cobertura del satélite en el perigeo, mientras que el punto en la mitad de este, muestra la proyección del satélite sobre la superficie terrestre.

2.3.2.3.3 Cobertura en la órbita GEO. La cobertura del satélite en la órbita geoestacionaria sobre Colombia es relativamente fija, ya que los periodos de la rotación del día sideral de la Tierra tienen una duración de, y el periodo de rotación del satélite, según la tabla 1, es prácticamente igual, permitiendo que el satélite esté siempre en cobertura sobre Colombia, como se puede observar en la figura 34.

Figura 34. Cobertura órbita GEO SGC



Fuente: Elaboración propia usando Software MatLab

2.3.3. *Análisis de costos*

El análisis de costos de la puesta en órbita del SGC, se realizó a partir de la integración de las siguientes variables:

- Centros espaciales de lanzamiento y vehículos espaciales disponibles por centro.
- Vehículos espaciales lanzados durante el año 2018, masa de carga útil transportada y costo promedio por kilogramo para órbitas LEO y de transferencia; en este caso órbita MEO/GTO.
- Microsatélites con características de masa similares a las del FAC-SAT01 que han sido lanzados, y el tipo de vehículo espacial que realizó el lanzamiento.
- Costos promedio de lanzamiento para un microsatélite con características de masa similar al del SGC en órbitas LEO, MEO/GTO o de transferencia y, el vehículo que realizó el lanzamiento con precios promedio de 2018.

Otros costos que de manera directa e indirecta pueden influir en el costo del kilogramo puesto en el espacio, según el vehículo espacial utilizado, están dados por aspectos como los relacionados a continuación así:

1. Costos directos

- El costo en la producción de los vehículos espaciales.
- Costos operacionales:
 - Propulsores y materiales de consumo como combustibles, etc.
 - Operaciones de tierra, vuelo y misión de planificación.
 - Transporte del vehículo a su lanzador, recuperación y rehabilitación del vehículo recuperado después del lanzamiento.
 - Pago de seguros a daños en construcciones públicas o privadas.

2. Costos indirectos

- Administración del programa y de la gestión del sistema.
- Soporte técnico de los sistemas y mantenimiento de la estación de lanzamiento.

- Pago de seguros para el vehículo espacial y la carga útil: dependen en gran parte de la fiabilidad del vehículo espacial y el constructor de la carga útil.
- Costos de transporte específicos (costo por kg. de carga útil); dependen mucho del tamaño y la masa de la carga útil.
- Frecuencia de lanzamientos (vida útil de la carga puesta en el espacio y si utiliza siempre el mismo operador para los lanzamientos).
- Parámetros de la órbita.
- Situación competitiva (oferta/demanda) del mercado de lanzamiento mundial.
- Número de vehículos espaciales comprados y lanzamientos: entre mayor sea el número de éstos, los costos serán inferiores.

2.3.3.1. Centros espaciales de lanzamiento. La ubicación sobre el globo terráqueo es indispensable para el cálculo de trayectorias y costos, ya que entre más cerca se está de la línea del ecuador, es mayor la velocidad de rotación de la Tierra; por ende, es menor la velocidad que debe desarrollar el vehículo espacial para salir de la atmósfera terrestre. En contraste, cuando el satélite a ubicar requiere una órbita polar, será más conveniente el lanzamiento desde una posición cercana a los polos. En la figura 35 se pueden observar los principales centros espaciales desde donde se pueden poner en órbita satélites como el SGC, ya que existen otras bases de lanzamiento alrededor del mundo, pero sin registros en los últimos dos años de lanzamiento de cargas útiles.

Figura 35. Estaciones espaciales con lanzamientos en 2018



Fuente: Elaboración propia sobre mapa de Google Maps.

Las estaciones espaciales o centros espaciales más importantes en términos de actividad y lanzamientos durante el año 2018 (Federal Aviation Administration, 2018), fueron los siguientes (figura 32): Kennedy Centro Especial, Base Aérea Vandenberg, Base Naval Wallops Pacific Missile Range, Centro Espacial Tyuratam Baikonur, Centro Espacial Plesetsk, Centro Espacial Svobodniy, Centro Espacial Jiuquan Shanghai'engtsu, Centro Espacial Xichang, Centro Espacial Europeo Guayana, Centro Espacial Kagoshima, Centro Espacial Tanegashima y Centro Espacial Sriharikota.

2.3.3.1.1. *Estados Unidos*. Los centros espaciales de los Estados Unidos de América cumplen múltiples funciones de lanzamiento de misiles balísticos y de cohetes con fines de posicionamiento de cargas útiles de diferentes finalidades y distancias en el espacio (Range Commanders Council-Telemetry Group, 2008), bien sea alrededor de la Tierra, la Luna y otros cuerpos celestes.

Los vehículos espaciales lanzados por Estados Unidos durante 2018 (Federal Aviation Administration, 2018), pueden observarse en la tabla 5, donde éstos se describen, además de las estaciones o centros espaciales desde donde fueron lanzados en Estados Unidos (Marín, 2019), así como su confiabilidad en el cumplimiento de su misión y la masa de las cargas útiles puestas en cada órbita.

Tabla 5. Vehículos espaciales estadounidenses y lanzamientos en 2018

VEHÍCULO ESPACIAL		Delta II	2	100 %	1999	CCAFS, VAFB	2.703 (5.958)	0	0
		Delta IV Medium	1	100 %	2002	CCAFS, VAFB	12.240 (26.980)	6.267 (13.817)	
		Delta IV Heavy	3	100 %	2004	CCAFS, VAFB	22.560 (49.740)	14.420 (31.791)	
		Atlas V 401	3	100 %	2002	CCAFS, VAFB	9.797 (21.598)	4.750 (10.470)	
		Atlas V 541	4	100 %	2011	CCAFS, VAFB	17.443 (38.476)	8.290 (18.270)	
		Antares 120	2	100 %	2013	MARS	4.900 (10.780)	0	
		Falcon 9	22	100 %	2013	CCAFS, VAFB	13.150 (28.991)	4.850 (10.692)	
		Falcon 9 (Dragon)	5	100 %	2010	CCAFS	9.000 (19.842)	0	
		Falcon Heavy	3	100 %	2017	CCAFS, VAFB	63.800 (140.660)	26.700 (58.860)	
		Pegasus	1	100 %	1990	CCAFS	450(992)	0	
		Electron	1	100 %	2017	PSCA Mahla	150 (331)	0	
		Minotauro	1	100 %	1994	CCAFS, VAFB, MARS, PSCA	1.458 (3.214)	0	
Total de lanzamientos en el 2018									
Contabilidad en el 2018									
Año del primer lanzamiento									
Sitio del lanzamiento									
kg (lbs) puesto en órbitas LEO									
kg (lbs) puesto en órbitas Geo									

Fuente: Elaboración propia con información de Federal Aviation Administration (2018).

2.3.3.1.2. *Federación de Rusia.* Durante 2018, la Federación de Rusia realizó el lanzamiento al espacio de los vehículos Soyuz, Protón, Zenit y Rockot (MARÍN, 2019).

En la tabla 6 se pueden observar dichos vehículos espaciales y las estaciones desde fueron lanzados los cohetes rusos durante 2018 (Federal Aviation Administration, 2018); asimismo, su confiabilidad en el cumplimiento de su misión y la masa de cargas útiles puestas en órbita.

Tabla 6. Vehículos espaciales rusos y lanzamientos en 2018

VEHÍCULO ESPACIAL				
	Rockot	Soyuz 2	Proton M	Zenit 3SL
Total de lanzamientos en el 2018	4	22	6	1
Confiabilidad en el 2018	100 %	100 %	88 %	100 %
Año del primer lanzamiento	1994	2004	2001	1999
Sitio del lanzamiento	Baikonur, Plesetsk	Baikonur, Plesetsk	Baikonur	Baikonur
kg (lbs) puesto en órbitas LEO	2,150 (4,740)	4,850 (10,692)	23,000 (50,706)	0
kg (lbs) puesto en órbitas GEO	0	1,700 (3,800)	6,920 (15,256)	6,160 (13,580)

Fuente: Elaboración propia con información de Federal Aviation Administration (2018).

2.3.3.1.3. *China.* Las políticas de China con respecto al uso de las estaciones de lanzamiento, están profundamente ligadas a las relaciones internacionales con sus aliados. En este país existen dos centros espaciales capaces de posicionar cargas útiles en diferentes órbitas: Jiuquan Shanghai’engtsu (China Daily Mail, 2014), y Xichang (Capcom Espace, 2010).

Desde estos centros espaciales se lanzaron ocho vehículos durante 2018 (Marín, 2019). En la tabla 7 se pueden observar los vehículos espaciales y las estaciones desde fueron lanzados los cohetes chinos (Federal Aviation Administration, 2018); asimismo, la confiabilidad de éstos en el cumplimiento de su misión y la masa de las cargas útiles puestas en órbita.

Tabla 7. Vehículos espaciales chinos y lanzamientos en 2018

VEHÍCULO ESPACIAL				
	Long March 2C	Long March 2D	Long March 3A	Long 3B/C
Total de lanzamientos en el 2018	5	3	5	4
Confiabilidad en el 2018	100 %	100 %	100 %	100 %
Año del primer lanzamiento	1975	1992	1994	2008
Sitio del lanzamiento	Jiuquan, Tai-yuan, Xichang	Jiuquan	Xichang	Xichang
kg (lbs) puesto en órbitas LEO	3,850 (8,488)	1,300 (2,866)	0	0
kg (lbs) puesto en órbitas GEO	1,250 (2,756)	0	2,600 (5,732)	3,800 (8,3778)

Fuente: Elaboración propia con información de Federal Aviation Administration (2018).

2.3.3.1.4. *Europa en la Guayana.* El centro espacial de Kourou, también conocido como Centro Espacial Guayanés CSG (Franceinfo, 2014), se encuentra muy cerca de la línea del ecuador, lo cual facilita el lanzamiento y puesta en órbita de satélites geoestacionarios en relación a la velocidad de rotación de la Tierra en este punto geográfico del planeta. Desde este centro se lanzan vehículos espaciales como el Soyuz, Ariane y Vega (Marín, 2019).

En la tabla 8 se pueden observar los vehículos espaciales europeos que fueron lanzados durante el año 2018, desde la Estación Espacial de

la Guayana Francesa (Federal Aviation Administration, 2018); asimismo, la confiabilidad de éstos en el cumplimiento de su misión y la masa de las cargas útiles puestas en órbita.

Tabla 8. Vehículos espaciales europeos y lanzamientos en 2018

VEHÍCULO ESPACIAL			
	Ariane 5 ECA	Soyuz 2	Vega
Total lanzamientos en 2018	6	1	3
Confiabilidad en el 2018	100%	100%	1005%
Año primer lanzamiento	2002	2011	2012
Sitio del lanzamiento	Kourou	Kourou	Kourou
kg (lbs) puesto en órbitas LEO	21,000 (46,297)	4,850 (10,692)	2,300 (5,071)
Kg (lbs) puesto en órbitas GEO	9,500 (20,944)	4,500 (9,921)	0

Fuente: Elaboración propia con información de Federal Aviation Administration (2018).

2.3.3.1.5. *Japón.* Los centros espaciales japoneses Kagoshima y Tanegashima, cumplen funciones de lanzamiento de cohetes con fines de posicionamiento de cargas útiles de diferentes usos y distancias en el espacio (Japan Aerospace Agency -JAXA-, 2015). Desde ellos se lanzan los vehículos espaciales H-II A y Épsilon (Marín, 2019).

En la tabla 9 se pueden observar los vehículos espaciales japoneses que fueron lanzados en 2018, desde las estaciones japonesas (Federal Aviation Administration, 2018), así como la confiabilidad de éstos en el cumplimiento de su misión y la masa de las cargas útiles puestas en órbita.

Tabla 9. Vehículos espaciales japoneses y lanzamientos en 2018

VEHÍCULO ESPACIAL		
	H-IIA	EPSILON
Total de lanzamientos en el 2018	2	2
Confiabilidad en el 2018	100 %	100 %
Año del primer lanzamiento	2001	2013
Sitio del lanzamiento	Tanegashima	Tanegashima
kg (lbs) puesto en órbitas LEO	10,000 (23,046)	700 - 1,200 (1,543-2,646)
kg (lbs) puesto en órbitas GEO	6,000 (13,228)	0

Fuente: Elaboración propia con información de Federal Aviation Administration (2018).

2.3.3.1.6. *India.* Sriharikota es el centro espacial ubicado en una isla en el estado de Andhra Pradesh, al sur de la India (Indian Space Reserch Organisation -ISRO-, 2016).

Tiene capacidad para el posicionamiento de satélites de órbita polar y geoestacionaria, por lo que desde este centro espacial se pueden lanzar vehículos como PSLV CA, PSLV XL, y GSLV (Marín, 2019).

En la tabla 10 se pueden observar los vehículos espaciales indios que fueron lanzados durante 2018 (Federal Aviation Administration, 2018); asimismo, la confiabilidad de los mismos en el cumplimiento de su misión y la masa de las cargas útiles puestas en órbita.

Tabla 10. Vehículos espaciales indios y lanzamientos en 2018

VEHÍCULO ESPACIAL			
	PSLV CA	PSLV XL	GSLV Mk. II
Total de lanzamientos en el 2018	4	2	4
Confiabilidad en el 2018	100 %	100 %	100 %
Año del primer lanzamiento	2009	2012	
Sitio del lanzamiento	Satish Dhawan	Satish Dhawan	Satish Dhawan
Kg (lbs) puesto en órbitas LEO	2,100 (4,630)	1,800 (3,968)	5,000 (11,023)
Kg (lbs) puesto en órbitas GEO	0	1,140 (2,513)	2,500 (5,516)

Fuente: Elaboración propia con información de Federal Aviation Administration (2018).

2.3.3.2. Vehículos espaciales. Existen dos escenarios sobre los cuales se realizó el análisis general del costo de la órbita, así:

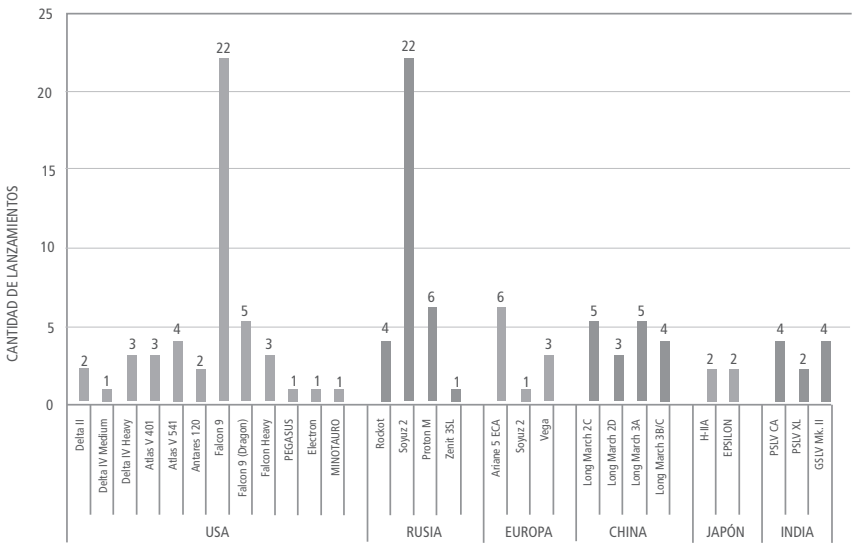
El vehículo espacial ubica el satélite en una órbita LEO, y este, con sistema de propulsión propia, continúa a la órbita de transferencia y posteriormente a la órbita GEO.

El vehículo espacial ubica el satélite en la órbita de transferencia MEO/GTO y, posteriormente, el satélite con sistema de propulsión propia, se posiciona en la órbita GEO, aprovechando una velocidad inicial que fue trasferida del propio cohete o vehículo espacial al dejarlo en dicha órbita de transferencia.

Para cada caso los costos son diferentes, dependiendo del tipo de vehículo; además, un satélite con características como las descritas para Colombia, SGC, viajaría en un vehículo espacial como parte de toda la carga útil.

En la figura 36 se pueden observar los lanzamientos discriminados por tipo de vehículo, realizados durante el año 2018.

Figura 36. Lanzamientos según el vehículo y país en 2018



Fuente: Elaboración propia con información de Federal Aviation Administration (2018).

2.3.3.3. Costos vehículo vs. kilogramo órbita. En esta sección se plantean unos costos aproximados con relación al tipo de vehículo y las órbitas en donde se ubicaron las cargas útiles.

2.3.3.3.1. Órbita LEO. De acuerdo con lo expuesto por la Federal Aviation Administration (2018), Space Exploration (2014) y Spaceflight (2016), se plantean unos costos aproximados que varían de acuerdo con la dinámica propia del mercado (Futron Corporation, 2002; National Aeronautics and Space Administration -NASA-, 2014), como se observa en la tabla 11.

Tabla 11. Costo kilogramo vs. vehículo,
según lanzamientos 2018 en órbitas LEO

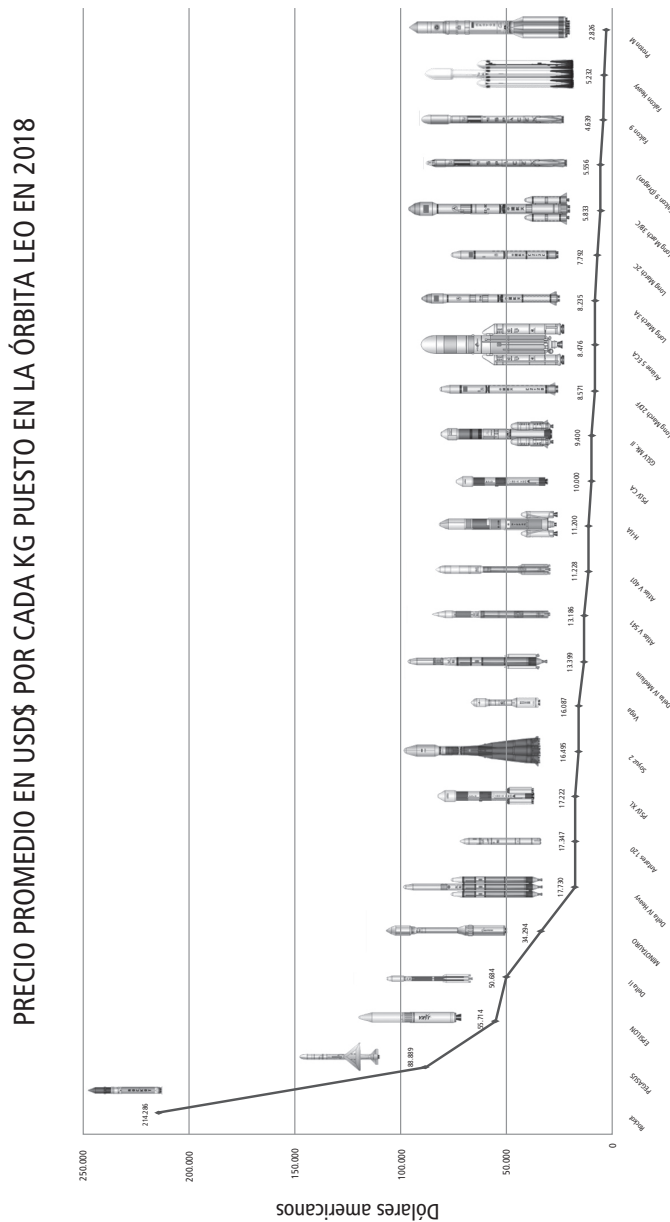
Vehículo	Costo lanzamiento USD\$	Carga útil Kg.	US\$ por Kg.
Delta II	137.000.000	2.703	50.684
Delta IV Medium	164.000.000	12.240	13.399
Delta IV Heavy	400.000.000	22.560	17.730
Atlas V 401	110.000.000	9.797	11.228
Atlas V 541	230.000.000	17.443	13.186
Antares 120	85.000.000	4.900	17.347
Falcon 9	61.000.000	13.150	4.639
Falcon 9 (Dragon)	50.000.000	9.000	5.556
Falcon Heavy	270.000.000	63.800	4.232
PEGASUS	40.000.000	450	88.889
ELECTRON	164.000.000	150	1.093.333
MINOTAURO	50.000.000	1.458	34.294
Rocket	390.000.000	1.820	214.286
Soyuz 2	80.000.000	4.850	16.495
Proton M	65.000.000	23.000	2.826
Ariane 5 ECA	178.000.000	21.000	8.476
Vega	37.000.000	2.300	16.087
Long March 2C	30.000.000	3.850	7.792
Long March 2D/F	30.000.000	3.500	8.571
Long March 3A	70.000.000	8.500	8.235
Long March 3B/C	70.000.000	12.000	5.833
H-IIA	112.000.000	10.000	11.200
EPSILON	39.000.000	700	55.714
PSLV CA	21.000.000	2.100	10.000
PSLV XL	31.000.000	1.800	17.222
GSLV Mk. II	47.000.000	5.000	9.400

Fuente: Elaboración propia con información de Federal Aviation Administration (2014, 2015, 2017, 2018).

En la figura 37 se puede observar los costos aproximados por kilogramo, así como la masa total en carga útil que puede movilizar el vehículo espacial. En las órbitas LEO, se establece que los precios de lanzamiento disminuyen con el tamaño del vehículo espacial, lo cual está relacionado con su capacidad de carga útil (Federal News Network Staff, 2014).

De igual manera, los vehículos espaciales de la India son muy económicos en valor por lanzamiento (Princeton University, 2010), y el kilogramo puesto en órbita LEO menos costoso, está en los vehículos Protón M Ruso y Falcón Heavy de Estados Unidos, donde oscila entre los US\$4.232 y US\$2.826.

Figura 37. Kilogramo por vehículo según lanzamientos de 2018 para órbitas LEO



Fuente: Elaboración propia con información de Federal Aviation Administration (2014, 2015, 2017, 2018).

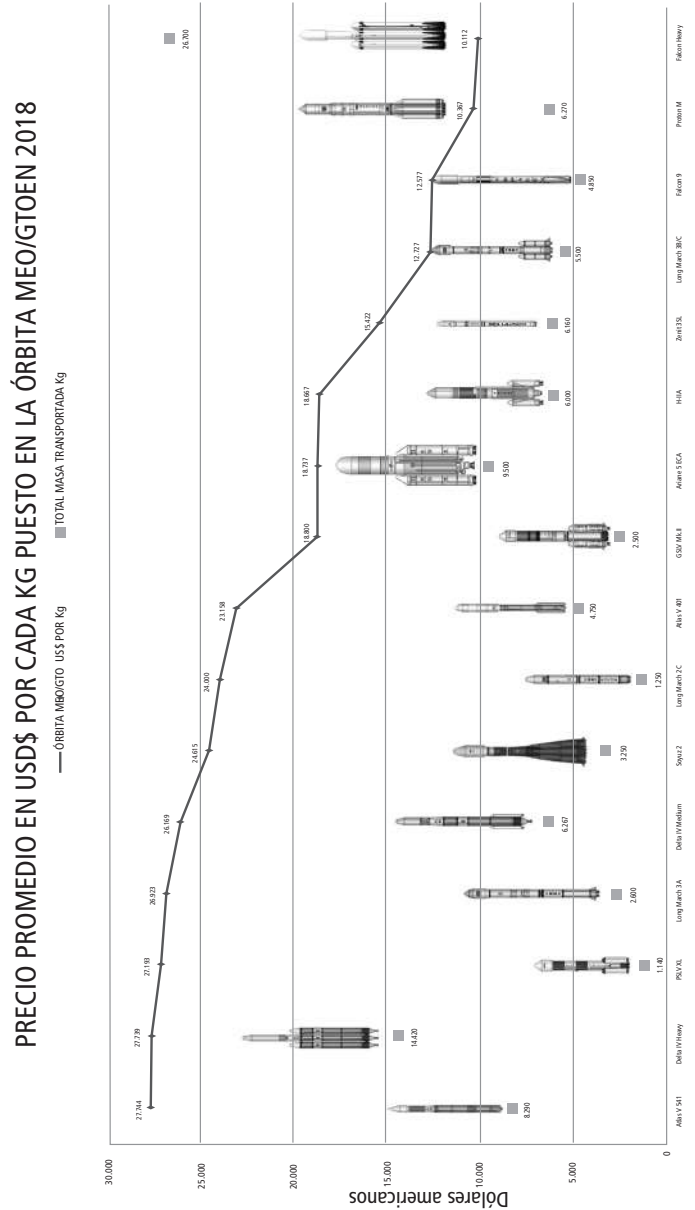
2.3.3.3.2. *Órbita MEO/GTO.* De acuerdo con Futron Corporation (2002), Space Exploration (2014), Federal News Network Staff (2014), Federal Aviation Administration (2014, 2015, 2017, 2018) y Spaceflight (2016), los costos aproximados en órbita MEO/GTO son los siguientes:

Tabla 12. Costo kilogramo vs. vehículo según lanzamientos 2018 en órbitas MEO/GTO

Vehículo	Costo lanzamiento USD\$	Carga útil Kg.	US\$ por Kg
Delta IV Medium	164.000.000	6.267	26.169
Delta IV Heavy	400.000.000	14.420	27.739
Atlas V 401	110.000.000	4.750	23.158
Atlas V 541	230.000.000	8.290	27.744
Falcon 9	61.000.000	4.850	12.577
Falcon Heavy	270.000.000	26.700	10.112
Soyuz 2	80.000.000	3.250	24.615
Proton M	65.000.000	6.270	10.367
Zenit 3SL	95.000.000	6.160	15.422
Ariane 5 ECA	178.000.000	9.500	18.737
Long March 2C	30.000.000	1.250	24.000
Long March 3A	70.000.000	2.600	26.923
Long March 3B/C	70.000.000	5.500	12.727
H-IIA	112.000.000	6.000	18.667
PSLV XL	31.000.000	1.140	27.193
GSLV Mk. II	47.000.000	2.500	18.800

Fuente: Elaboración propia con información de Federal Aviation Administration (2014, 2015, 2017, 2018).

Figura 38. Kilogramo por vehículo según lanzamientos 2018 para órbitas MEO/GTO



Fuente: Elaboración propia con información de Federal Aviation Administration (2014, 2015, 2017, 2018).

En la figura 38 se observan los costos aproximados por kilogramo, así como la masa total en carga útil que puede movilizar el vehículo espacial. Para las órbitas MEO/GTO, los precios de los vehículos espaciales rusos y estadounidenses son muy económicos, gracias a su relación capacidad de carga versus costo de lanzamiento; en tal virtud, el costo por kilogramo puesto en órbita MEO/GTO oscila entre los US\$10.367 para el Protón M y US\$10.112 para el Falcon Heavy.

2.3.3.4. Satélites según su masa. La clasificación de los satélites según su masa (Federal Aviation Administration, 2016), determina que, de acuerdo con sus características, el Satélite Geoestacionario Colombiano (SGC), es un satélite pequeño (tabla 13).

Tabla 13. Clasificación de los satélites pequeños según su masa

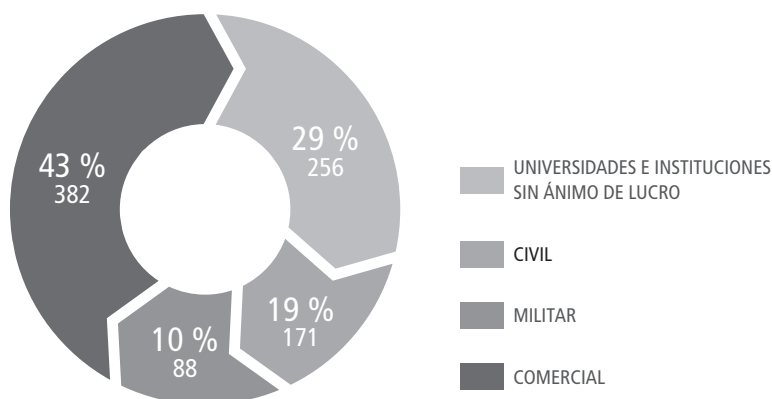
Satélites pequeños	
Clase de satélite	Kilogramos (Kg)
Femto (Cubesat)	0,01 - 0,1
Pico (Cubesat)	0,11 - 1
Nano (Cubesat)	1,1 - 10
Micro	11 - 200
Mini	201 - 600
Small	601 - 1200

Fuente: Federal Aviation Administration (2016).

En la figura 39 se muestra la distribución, según su uso, de los satélites pequeños lanzados al espacio entre 2003 y 2018. Los proveedores de servicios de lanzamiento en todo el mundo enviaron 466 naves al espacio, aunque 23 sufrieron fallas en su lanzamiento (Federal Aviation Administration, 2018).

Figura 39. Cantidad de satélites pequeños según su uso

DESTINACIÓN DE SATÉLITES LANZADOS ENTRE 2003 Y 2018



Fuente: Elaboración propia con información de Federal Aviation Administration (2014, 2015, 2016, 2017, 2018).

Ahora bien, cabe resaltar que los satélites geoestacionarios puestos en órbita entre febrero del año 1963 y agosto del año 2019 suman en total 962 (N2YO.com, 2019), similares al Satélite Geoestacionario Colombiano (SGC) y, considerando la tabla 12 y la capacidad de llevar 1.000 kilogramos a órbitas MEO/GTO, se puede inferir que el costo de poner el SGC en órbita oscila entre USD\$ 27.739 y USD\$ 10.112 por kilogramo según el vehículo.

3. Colombia: una plataforma de lanzamiento para cohetes y vehículos espaciales

Considerando la creciente demanda de los países por recursos naturales vitales, como el agua, el oxígeno, la fauna y la flora, que garantizan la sostenibilidad de los pueblos, cobra gran importancia la necesidad de ahorro en el consumo de combustibles fósiles, ya que no solo contaminan y afectan a importantes reservas naturales del planeta, sino también se hacen

cada vez más onerosos por su creciente escasez en la Tierra. De allí que se vengán desarrollando todos los esfuerzos posibles para la gestión eficiente de los recursos; en consecuencia, surge la necesidad de buscar elementos basados en la ciencia, la tecnología, los procedimientos, la revisión de las teorías y las leyes de la física y la matemática, que permitan explotar las ventajas naturales propias de la Tierra, para reducir la contaminación generada por cohetes y vehículos espaciales en su recorrido hacia el espacio, que ya ha sido estudiada desde el Programa de las Naciones Unidas para el Análisis y Cuidado del Medio Ambiente (PNUMA), que además cuenta con apoyo y financiamiento de NASA, la Comisión Espacial Europea, la Organización Mundial de la Salud (OMS), y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, 2018).

De esta forma, y a la par de los nuevos desarrollos tecnológicos, se busca presentar soluciones con resultados más eficientes en el transporte de personas, material, equipo y diferentes tipos de suministros para la explotación del espacio, así como la proyección del ser humano fuera del Sistema Solar, paso inevitable en la evolución de la sociedad y la conciencia humana (White, 1998). Para la Fuerza Aérea Colombiana, dentro de su misión constitucional y doctrina propia del uso del poder aéreo, está el logro de los fines del Estado como sostiene la Constitución Política de Colombia, 1991, lo cual supone el permanente desarrollo tecnológico, mejoramiento de procesos y estrategias, para garantizar el cumplimiento de la función constitucional plasmada en el artículo 217 de la Carta Magna.

Bajo esta premisa, y acatando los objetivos en materia de incursionar en la carrera espacial y la protección del medio ambiente, surgen grandes incógnitas; por ejemplo: ¿puede la posición geográfica de Colombia brindar ventajas naturales para el lanzamiento de vehículos espaciales, haciendo más eficiente el uso de combustibles líquidos y sólidos?

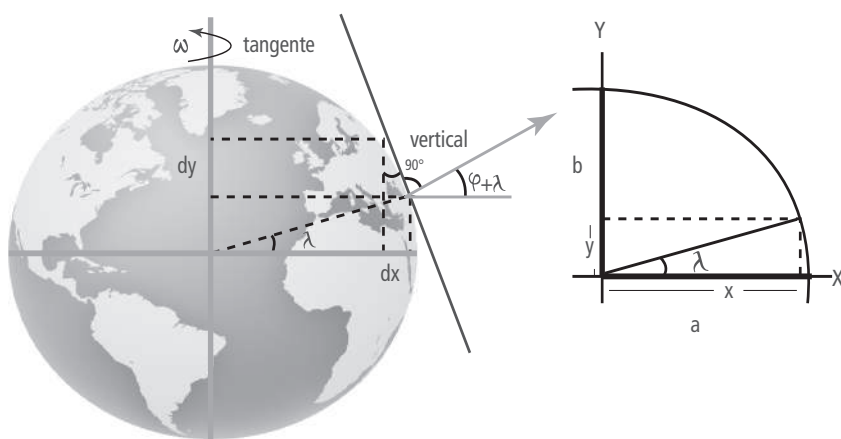
Para dar respuesta al interrogante anterior, se aplicó un método exploratorio que describe analíticamente el comportamiento de una variable asociada a la forma y la gravedad de la Tierra (García, 2010), las leyes de Newton en una estrecha relación con la Mecánica celeste, las leyes de Kepler, y el uso de combustibles líquidos y sólidos para la generación de la velocidad requerida para que los vehículos espaciales abandonen la

Tierra y posicioneen cargas útiles en órbitas alrededor del planeta. En virtud de lo expuesto se aplican herramientas de análisis matemático en las leyes de la física, para demostrar cómo las ventajas naturales que ofrece el planeta Tierra pueden permitir un uso más eficiente de los combustibles para el lanzamiento de vehículos espaciales, en contraposición a los costos de poner cargas útiles en el espacio.

3.1. La forma de la Tierra

Con base en lo dicho, es importante definir la forma de la Tierra; para ello se construye el concepto matemático que demuestra la ventaja de la posición natural de la línea del ecuador en el globo terráqueo para el lanzamiento de vehículos espaciales y cohetes (Poveda, Rodríguez, Vallejo y Ocampo, 2018). En este sentido, la fuerza de gravedad es perpendicular a la superficie de la Tierra en cualquiera de sus puntos. Como se observa en la figura 40, la línea recta a la derecha del planeta representa una tangente sobre cualquier punto de la superficie, mientras que la línea angular demuestra cómo la gravedad resulta ser un componente vertical de fuerza hacia el centro del planeta.

Figura 40. Forma de la Tierra y componente de fuerza de la gravedad



Fuente: García (2010).

Como la Tierra es un geoide achatado en el centro y no una esfera perfecta, se tienen diferentes mediciones físicas, dependiendo del punto de la Tierra en donde se tomen dichas medidas; dos de ellas son la gravedad y el radio medido desde el centro de la Tierra hasta algún punto en la superficie (Poveda, et al., 2018). En la figura 40, aparece el ángulo λ , que es la latitud respecto a la línea del ecuador de la Tierra y, entendiendo que la pendiente de la tangente se relaciona a una curva, se define:

$$y = f_x \text{ cuando } X = 0 \quad (2.1)$$

A la ecuación (2.1) se le aplicó la derivada $\frac{dy}{dx}$ para resolverla y construirla, de modo que, de manera general describa la forma de la Tierra.

$$\tan(\lambda + \varphi) = -\frac{dy}{dx} \quad (2.2)$$

Otra manera de describir el sistema, solo en términos de x y de y es:

$$\tan(\lambda) = \frac{y}{x} \quad (2.3)$$

A partir de las expresiones (2.2) y (2.3) reemplazando $(\lambda + \varphi) = \alpha$ se obtiene la siguiente ecuación diferencial, que representa de manera general la forma del planeta Tierra:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= -\frac{(1 - \alpha)x}{y} \\ \int -\frac{(1 - \alpha)x}{y} \cdot \frac{dy}{dx} \\ (1 - \alpha) * x^2 + y^2 &= c \end{aligned} \quad (2.4)$$

En la ecuación (2.4) aparece una constante C , que determina una constante de integración; gracias a esta ecuación se puede resolver el binomio, de tal forma que se consigue calcular los dos radios extremos de la Tierra, es decir, un radio polar o mínimo y un radio ecuatorial o máximo. a radio ecuatorial, b radio polar.

$$\begin{cases} y = 0 & x = a \\ x = 0 & y = b \end{cases}$$

$$a = \sqrt{\frac{c}{1-\alpha}} \quad (2.5)$$

$$b = \sqrt{c} \quad (2.6)$$

Si bien la figura de la Tierra no es una circunferencia perfecta, se puede aproximar a la figura descrita por una elipse (Piskunov, 2009).

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

Aplicando las ecuaciones hasta ahora descritas, se obtiene que:

$a=6.378,140km$ de acuerdo con lo expuesto por (The International Astronomical Union, 1964), y el radio polar se describe como:

$$\begin{cases} a = \text{radio ecuatorial} = 6.378,140km \\ b = \text{radio polar} = 6.356,752km \end{cases} \quad (2.7)$$

Para el aplastamiento de la Tierra se obtiene que:

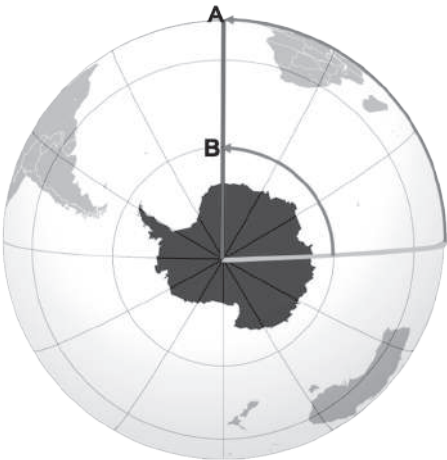
$$f = \frac{a-b}{a} \Rightarrow 1 - \sqrt{1-\alpha} \Rightarrow 3,3533 * 10^{-3} \quad (2.8)$$

3.2. La velocidad de rotación de la Tierra

Debido a que el giro de la Tierra sobre su propio eje es uno de sus movimientos, todo lo que esté sobre ella o en su interior gira simultáneamente, entorno de dicho eje; y, sabiendo que la Tierra es un esferoide achatado, se infiere que tiene una velocidad de giro diferente dependiendo de su posición sobre la superficie.

Esta velocidad es conocida como velocidad angular, siendo mayor dicha velocidad de manera proporcional a la distancia del eje de giro; es decir, a un radio o distancia del centro de la Tierra mayor, mayor velocidad.

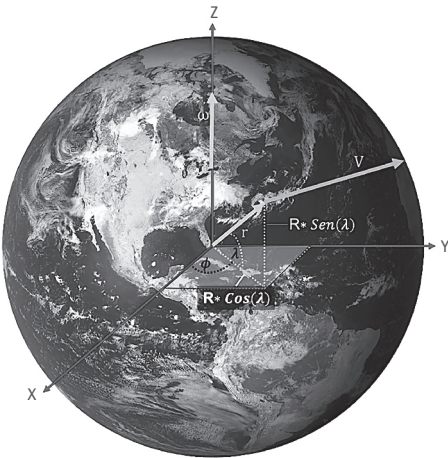
Figura 41. Velocidad angular



Fuente: Elaboración propia, modificación de imagen original de Wikipedia Maps.

Como puede observarse en la figura 41, desde la posición de la línea horizontal, la partícula *A* debe tener una velocidad angular superior, para llegar a la posición de la vertical al mismo tiempo que la partícula *B*. Para entrar en el contexto matemático de la velocidad, se desglosó paso a paso el análisis sobre la figura 42, así:

Figura 42. Vectores que describen la rotación de la Tierra



Fuente: Elaboración propia con información de Universidad de Sevilla (2002).

La velocidad sobre un punto específico de la superficie de la Tierra se puede expresar como el vector de posición resultante en función de $\vec{r}$ que:

$$\vec{\omega} \times \vec{r} = \vec{v} \quad (2.9)$$

Siendo $\vec{\omega}$ la velocidad angular del planeta Tierra sobre su eje Z según la figura 42. Analizando ese vector $\vec{r}$ en función de la longitud x y latitud y , para obtener el vector de posición de acuerdo con la figura 3, se obtiene:

$$\vec{r}(\lambda, \phi) = \begin{cases} x = r \cos \lambda \cos \phi \\ y = r \cos \lambda \sin \phi \\ z = r \sin \lambda \end{cases} \quad (2.10)$$

Para poder calcular la velocidad se aplica la derivada respecto al tiempo t a la expresión (2.10) obteniendo:

$$\vec{v}(t) = r\omega \cos \lambda [-\sin \omega t, \cos \omega t, 0] \quad (2.11)$$

Al derivar nuevamente el vector velocidad de la expresión (2.11) respecto al tiempo, se halla la aceleración:

$$\vec{a}(t) = \frac{dv}{dt} = -r\omega^2 \cos \lambda [\cos \omega t, \sin \omega t, 0] \quad (2.12)$$

Resolviendo la ecuación puntual para cada vector de velocidad y aceleración, éstos se reducen a las siguientes expresiones:

$$\vec{v} = r\omega \cos \lambda \quad (2.13)$$

$$\vec{a} = -r\omega^2 \cos \lambda \quad (2.14)$$

En este punto de la ecuación de velocidad y aceleración, se requiere el cálculo de $\vec{\omega}$, la velocidad angular, para reducirla a solo una función en términos de λ es decir, de la latitud.

Acogiendo la teoría física del movimiento angular descrita por Zare (1988), y entendiendo que una revolución completa de la Tierra es 2π radianes, se deduce que:

$$\frac{v}{r} = \frac{2\pi}{T} = \omega = 2\pi f \quad (2.15)$$

$$v = \omega r \quad (2.16)$$

Siendo f la frecuencia con la que rota el planeta, T el periodo o tiempo que tarda en dar una vuelta completa sobre su propio eje.

3.3. Cálculos de energía

El cálculo de energía en vehículos espaciales, específicamente el generado en torno al movimiento, donde los apogeos descritos están en órbitas LEO o MEO/GTO, permite identificar la cantidad de energía requerida para alcanzar la altura de satelización o de puesta en órbita de transferencia.

Estas energías son muy importantes de calcular, porque la velocidad del vehículo espacial está estrechamente relacionada con la energía que éste desarrolle para alcanzar la altura objetivo sobre la superficie de la Tierra (Poveda, 2016).

La energía se describe por las siguientes expresiones matemáticas:

$$E_{Cinetica} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.17)$$

$$E_{Potencial} = \frac{GM}{r} \quad (2.18)$$

$$E_{total} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GM}{r} \quad (2.19)$$

Donde m es la masa del vehículo espacial, G es la constante universal de la gravitación (Universidad Politécnica de Madrid -UPM-, 2013) (De Orús, et al., 2007):

$$G = 6,6710 \times 10^{-11} \left[\frac{m^3}{(Kg \cdot Seg^2)} \right] \quad (2.20)$$

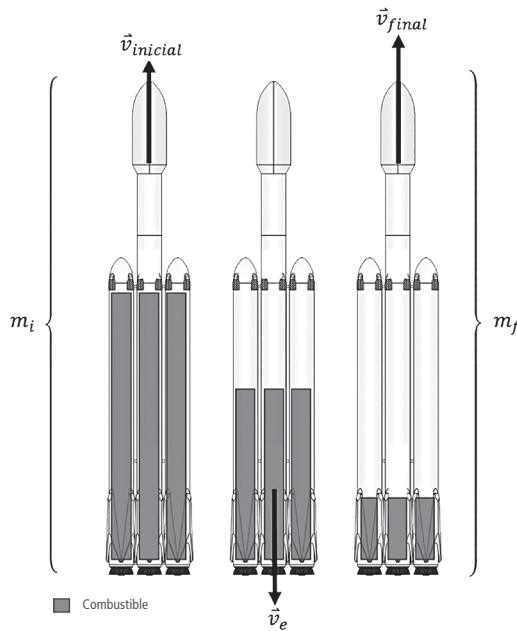
M es la masa de la Tierra. Para todos los cálculos se utiliza, de acuerdo con lo expuesto por (Neff, 1995), un valor de:

$$M=5.979 \times 10^{24} \text{ Kg} \quad (2.21)$$

3.3.1. Cálculos de combustible según velocidad requerida

En aplicación a lo presentado por École Polytechnique Fédérale de Lausanne -EPFL- (2018), en cuanto a la ecuación de Tsiolkovsky, el gasto de combustible vs. la velocidad de un cohete se puede describir de la siguiente manera:

Figura 43. Consumo de combustible de cohetes y vehículos espaciales



Fuente: Elaboración propia con información de EPFL (2018).

Para describir el comportamiento físico, se presenta la ecuación que incorpora las variables de velocidad inicial $\vec{v}_{inicial}$, velocidad de empuje $\vec{v}_e$, velocidad final $\vec{v}_{final}$ y las masas, de inicio m_i y final m_f respectivamente, como puede observarse en la figura 43, teniendo:

$$\Delta V = v_e \log_e \left(\frac{m_i}{m_f} \right) \quad (2.22)$$

La expresión (2.22) o ecuación Tsiolkovsky se complementa incorporando a los cálculos el impulso específico I_{sp} y la fuerza de la gravedad a vencer.

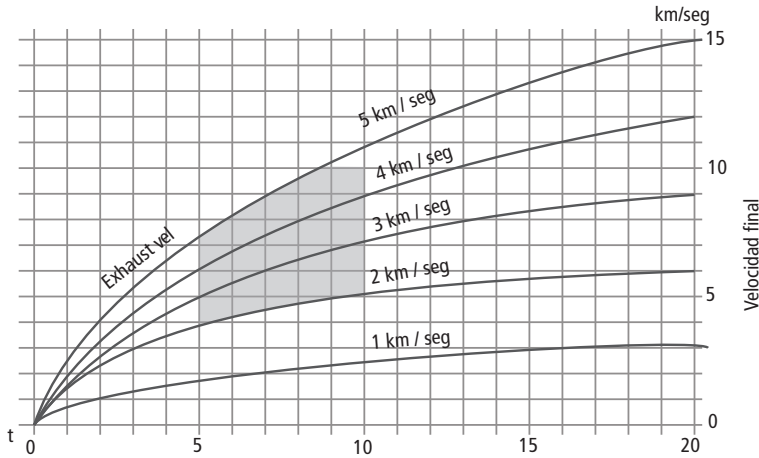
$$\Delta V = g * I_{sp} \log_e \left(\frac{m_i}{m_f} \right) \quad (2.23)$$

Por otra parte, se calcula el combustible (masa) del vehículo espacial m_p , que requiere para alcanzar la velocidad deseada; esto se consigue desvinculando la expresión (2.23) en variables en términos de masa que faciliten el análisis de la siguiente forma:

$$\Delta V \Rightarrow \begin{cases} m_p = m_i \left[1 - e^{\left(-\frac{\Delta V}{g * I_{sp}} \right)} \right] \\ m_p = m_f \left[e^{\left(-\frac{\Delta V}{g * I_{sp}} \right)} - 1 \right] \end{cases} \quad (2.24)$$

La velocidad de empuje ideal para alcanzar una órbita sobre el planeta dependerá del vehículo y de la velocidad de escape mínima a desarrollar; esta velocidad en promedio es aproximadamente de 4,5 Km/s (EPFL, 2018) y un gasto aproximado del 90% de la m_i de combustible, alcanzando una velocidad final entre 5 Km/s y 10 Km/s. Según el tipo de combustible y peso total del vehículo, la relación al respecto puede observar en la figura 44.

Figura 44. Relación velocidad final vs. velocidad en la tobera



Fuente: Elaboración propia información de Clarke (1984).

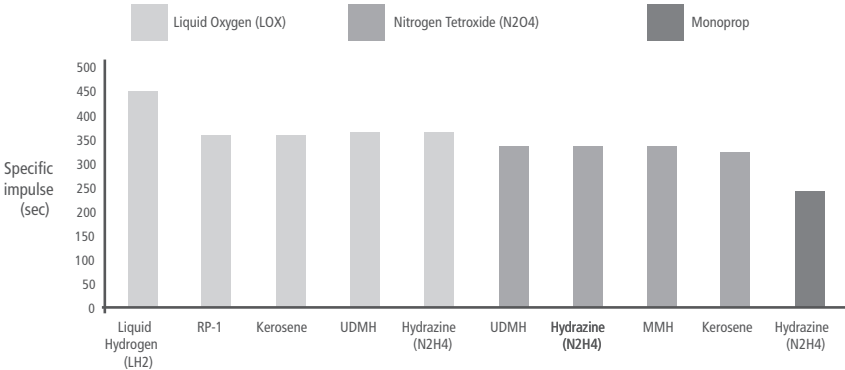
Al aumentar la velocidad de empuje, la velocidad final del vehículo también aumentará; En la figura 44 se puede observar que entre 5 y 10 minutos (horizontal). Por su parte, la velocidad de escape del planeta (vertical) a alcanzar, estará entre los 5 y 10 Km/Seg.

Se debe tener en cuenta que el tipo de combustible que usan cohetes y vehículos espaciales en el mundo es diferente en la mayoría de los casos; asimismo es necesario considerar el hecho de que cada combustible puede generar un máximo de velocidad diferente. En la figura 45, se exponen los tres grandes grupos de carburantes existentes para cohetes.

Cada uno de estos grupos de propelente genera un I_{sp} (expresión 2.23), impulso específico, que a la vez desarrolla una velocidad final diferente en el cohete o vehículo. Por ejemplo:

1. Monopropelentes-Hidracina (color verde) $I_{sp}=200$ a 250 seg genera en promedio de 2 a $2,5$ Km/s de velocidad de empuje $\vec{v}_e$.
2. Nitrógeno tetroxidado-UDMH, (N₂H₄) $I_{sp}=280$ a 300 seg genera en promedio de $2,8$ a $3,0$ Km/s de $\vec{v}_e$.
3. Oxígeno líquido-hidrógeno líquido $I_{sp}=450$ seg genera en promedio a $4,5$ Km/s de $\vec{v}_e$.

Figura 45. Impulso teórico específico en el vacío según el tipo de combustible



Fuente: EPFL (2018).

En el proceso matemático de demostrar la ventaja del lanzamiento de cohetes desde la línea del ecuador, se definen los radios aproximados en kilómetros tanto para el ecuador en latitud 0° como para el Polo Norte en la latitud 90°; también se definieron intervalos de quince grados de latitud en los cálculos, en referencia a la expresión (2.7) así:

$$\begin{cases} a = \text{radio ecuatorial} = 6.378,14\text{km} \\ b = \text{radio polar} = 6.356,75\text{km} \end{cases}$$

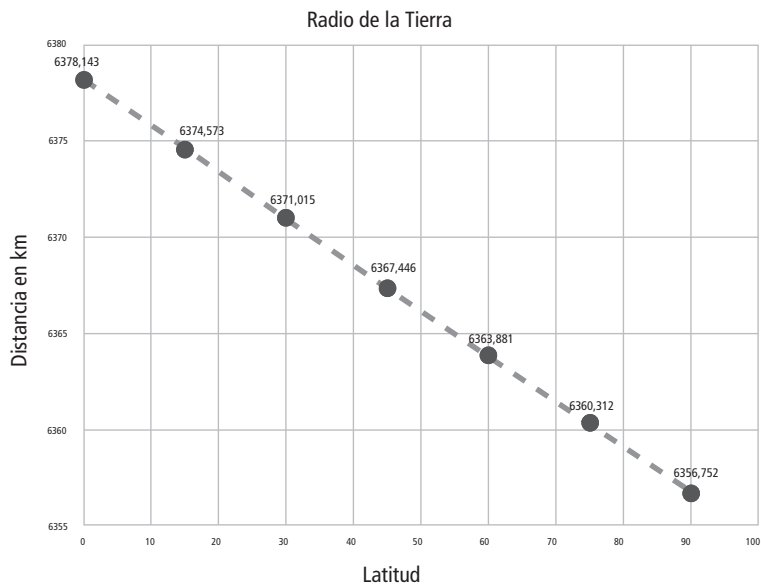
De las expresiones (2.3) y (2,4) se construye la tabla 16, donde se ve la relación de radios aproximados por latitud, despreciando elevaciones y definiendo la superficie de la Tierra a nivel del mar.

Tabla 16. Radio de la Tierra según su latitud

Latitud en grados	Radio en Km.
0	6356,752
15	6360,312
30	6363,881
45	6367,446
60	6371,015
75	6374,573
90	6378,143

Fuente: Elaboración propia.

Figura 46. Radio de la Tierra según su latitud



Fuente: Elaboración propia con base en los datos de la tabla 16.

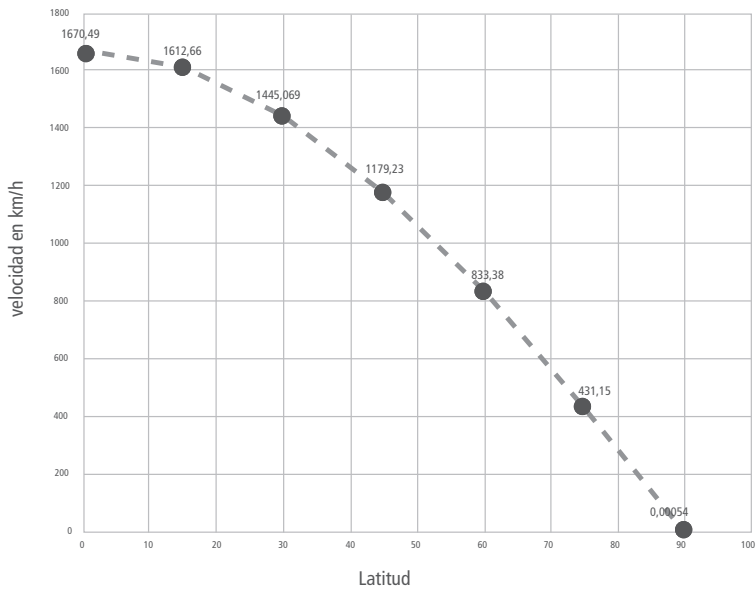
En la tabla 17 se ejecutan los cálculos de velocidad para cada una de las latitudes propuestas, aplicando las expresiones (2.13) y (2.16), donde λ es la latitud en grados, y que determinan los puntos de acuerdo con la figura 47.

Tabla 17. Velocidad de rotación de la Tierra según su latitud

Latitud en grados	Velocidad KM/H
0	1670,49
15	1612,66
30	1445,069
45	1179,23
60	833,38
75	431,15
90	0,00054

Fuente: Elaboración propia.

Figura 47. Curva de velocidad según latitud



Fuente: Elaboración propia con base en los datos de la tabla 17.

La clasificación según la velocidad de los vehículos espaciales se da de acuerdo con la velocidad del sonido que pueden desarrollar. En la tabla 18 se puede observar dicha clasificación, así:

Tabla 18. Clasificación de los vehículos espaciales según su velocidad

Clasificación	Velocidad
Subsónico hasta	0,75 mach
Trans-sónico	0,75 a 1,2 mach
Supersónico	1,2 a 5 mach
Hipersónico	Mayor de 5 mach

Fuente: Elaboración propia.

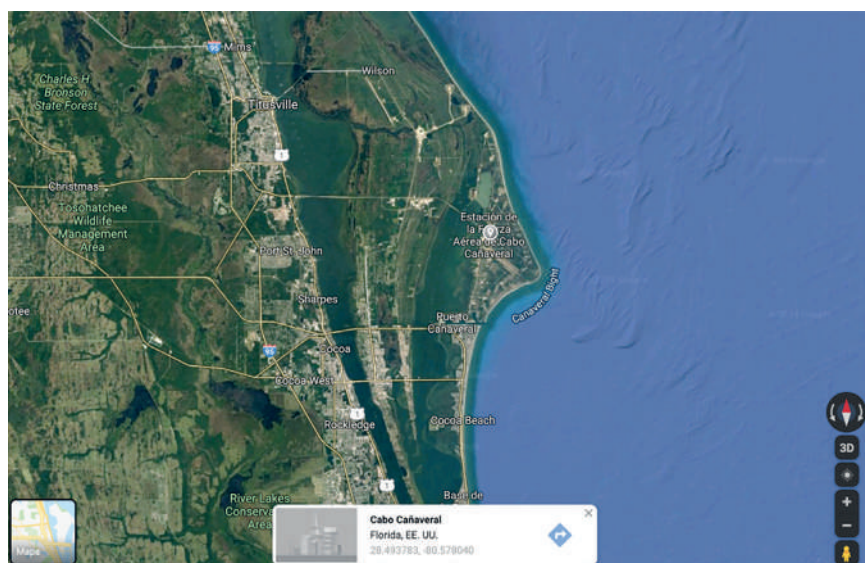
Existe también una clasificación menos habitual, que se refiere a los tipos de combustible diferenciándolos si el “propulsor usa combustible sólido o líquido” (Godínez, 2012).

Hoy en día, los combustibles líquidos proponen una tendencia por su versatilidad, potencia que generan y facilidad en la manipulación; por ejemplo, aparecen el LOX y RP-1 como en los vehículos tipo Falcon Heavy y Delta IV. A continuación, se definen unos aspectos técnicos genéricos de un vehículo espacial, que en este caso será el Falcon Heavy, como ejemplo, lo que permitirá definir una metodología para hacer los cálculos de cualquier vehículo:

- Velocidad de escape requerida: 8 km/seg.
- Masa (para cálculos de energía): 1'420.000 kg total del vehículo
- Masa de la carga útil: 64.000 kg

Los datos mencionados son útiles para hacer la comparación con dos latitudes conocidas y evidenciar matemáticamente la ventaja en el lanzamiento desde la línea del ecuador, en relación con una latitud 30, muy cercana a la latitud del Kennedy Space Center en la Florida (figura 48).

Figura 48. Kennedy Space Center, Florida-Estados Unidos



Fuente: Google. Maps Inc.

La información de la tabla 18 se contrasta con la velocidad de escape a desarrollar a partir de las expresiones de conservación de energía total (2.19):

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2gR} \quad (2.27)$$

$$v_e = \sqrt{2gR} = 11446.6 \text{ m/s} \quad (2.28)$$

$$v_e = 11.44 \text{ Km/s} \quad (2.29)$$

Usando las expresiones (2.27) y (2.28) se incorpora la variable que es la gravedad o intensidad del campo gravitatorio de la Tierra, definido como $g=9,81 \text{ m/s}^2$.

En la expresión (2.29) puede observarse la celeridad de escape del planeta Tierra; sin embargo, los vehículos espaciales, en teoría, con el 70% de esa rapidez pueden alcanzar una velocidad que les permita escapar de la Tierra, es decir:

$$v = 28845 \text{ Km/h} \quad (2.30)$$

$$v = 8 \text{ Km/s} \quad (2.31)$$

Teniendo en cuenta la tabla 17 y las expresiones (2.30) y (2.31) se obtienen los resultados expuestos en la tabla 19, la cual evidencia cuánta velocidad es requerida para un cohete lanzado desde una posición en latitud cero o línea del ecuador, en contraste con otras latitudes sin importar si son norte o sur.

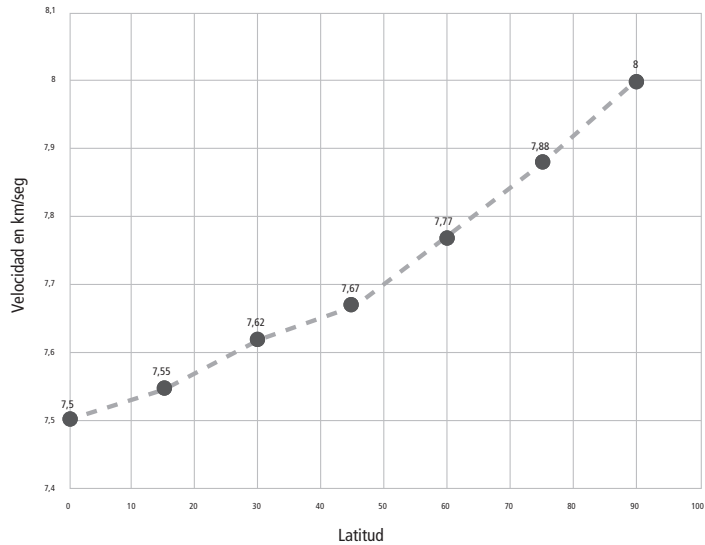
Tabla 19. Velocidades de escape a desarrollar según latitud

Velocidad de escape en Km/s	Latitud en grados	Velocidad rotación Km/s	Velocidad requerida por el vehículo espacial en Km/s
8	0	0,45641	7,50
	15	0,44796	7,55
	30	0,38140	7,62
	45	0,32756	7,67
	60	0,23149	7,77
	75	0,11976	7,88
	90	1,5113 x 10-7	8,00

Fuente: Elaboración propia.

Aterrizando la tabla 19 en la figura 49, se puede observar cómo al aumentar la latitud, también aumenta la velocidad que necesita el vehículo espacial para salir a órbita terrestre.

Figura 49. Velocidad de escape requerida según la latitud del lanzamiento



Fuente: Elaboración propia con base en los datos de la tabla 19.

Al observar el comportamiento de las velocidades en la tabla 19 y figura 49 se procedió con la siguiente comparación:

3.3.1.1. En latitud cero (línea del ecuador). La velocidad de rotación es $0,456 \text{ Km/s}$ o su equivalente a $1670,49 \text{ km/h}$ y la velocidad de escape del planeta Tierra ya calculada es de 8 km/s o su equivalente 28845 km/h . Se puede inferir que un cohete o vehículo espacial lanzado desde la línea del ecuador solo debe desarrollar una velocidad de 27174.5 Km/h

3.3.1.2. En latitud treinta (cercano a Kennedy Space Center). La velocidad de rotación es $0,401 \text{ Km/s}$ o su equivalente a $1445,068 \text{ km/h}$ y la velocidad de escape del planeta Tierra ya calculada es de 8 km/s o su equivalente 28845 km/h . Se puede inferir que un cohete o vehículo espacial lanzado desde la latitud 30 debe desarrollar una velocidad de 27400 Km/h .

La diferencia de velocidad a desarrollar por el vehículo desde el ecuador es inferior en 225.5 km/h , lo que en un vehículo de una masa superior al millón de kilos representa ahorro de energía para alcanzar la velocidad de escape requerida.

El vehículo espacial usado como ejemplo es el Falcon Heavy, el cual puede consumir la siguiente cantidad aproximada de combustible:

- Combustible LOX 363 toneladas
- Combustible RP-1 157 toneladas

Figura 50. Cohete Falcon Heavy SpaceX-parche de misión



Fuente: SpaceX (2019).

Los Falcon Heavy de mediano y largo alcance comparten una capacidad aproximada para cargar combustibles de 520 toneladas.

Usando la (2.23) y que el oxígeno líquido-hidrógeno líquido LOX que tiene un $I_{sp}=450 \text{ seg}$ y representa $4,5 \text{ Km/s}$ de velocidad de empuje, se plantea el siguiente racionamiento, m_p (m_{pi} masa de combustible inicial, m_{pf} masa de combustible final) de la expresión (2.24), considerando que los ΔV o la variación de velocidad según la latitud que fue hallada en la tabla 19, y que la velocidad final se halla al consumir el 90% del combustible, se resuelven las expresiones de la siguiente forma:

Cálculos de consumo de LOX en latitud cero o línea del ecuador:

$$\begin{cases} m_p = m_i \left[1 - e^{\left(\frac{-\Delta V}{g \cdot I_{sp}} \right)} \right] \\ m_p = m_f \left[e^{\left(\frac{-\Delta V}{g \cdot I_{sp}} \right)} - 1 \right] \end{cases} \text{ ecuación general.}$$

$$\begin{cases} m_{pi} = 363.000Kg \left[1 - e^{\left(\frac{-7.5km/s}{9.8m/s^2 \cdot 450s} \right)} \right] \\ m_{pf} = 36.300Kg \left[e^{\left(\frac{-7.5km/s}{9.8m/s^2 \cdot 450s} \right)} - 1 \right] \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} m_{pi} = 297731 \text{ Kg} \\ m_{pf} = -297731 \text{ Kg} \end{cases}$$

Cálculos de consumo de LOX en latitud treinta (cercano a Kennedy Space Center).

$$\begin{cases} m_{pi} = 363.000Kg \left[1 - e^{\left(\frac{-7.62km/s}{9.8m/s^2 \cdot 450s} \right)} \right] \\ m_{pf} = 36.300Kg \left[e^{\left(\frac{-7.62km/s}{9.8m/s^2 \cdot 450s} \right)} - 1 \right] \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} m_{pi} = 298510 \text{ Kg} \\ m_{pf} = -298599 \text{ Kg} \end{cases} \quad (2.33)$$

La interpretación a los valores positivos hallados en las expresiones (2.32) y (2.33) permite evidenciar que el mismo vehículo o cohete requiere una velocidad diferente para salir del planeta, siendo inferior en la línea del ecuador.

Al contratar estos valores respecto a la masa en combustible requerido para lanzar desde la línea del ecuador, se evidencia que se requiere menos combustible usando el mismo vehículo; es decir, se presenta un ahorro de 1.778,93 kilos de combustible LOX.

Ahora, aplicando una metodología de cálculo igual al RP-1 se obtiene: Cálculos de consumo de RP-1 en latitud cero (línea del ecuador).

$$\begin{cases} m_{pi} = 157.000Kg \left[1 - e^{\left(\frac{7.5km/s}{9.8m/s^2 + 450s} \right)} \right] \\ m_{pf} = 15.700Kg \left[1 - e^{\left(\frac{7.5km/s}{9.8m/s^2 + 450s} \right)} \right] \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} m_{pi} = 128338 Kg \\ m_{pf} = -128338 Kg \end{cases} \quad (2.34)$$

Cálculos de consumo de RP-1 en latitud treinta (cercano a Kennedy Space Center).

$$\begin{cases} m_{pi} = 157.000Kg \left[1 - e^{\left(\frac{7.62km/s}{9.8m/s^2 + 450s} \right)} \right] \\ m_{pf} = 15.700Kg \left[1 - e^{\left(\frac{7.62km/s}{9.8m/s^2 + 450s} \right)} \right] \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} m_{pi} = 129108 Kg \\ m_{pf} = 12910,8 Kg \end{cases} \quad (2.35)$$

La interpretación de los valores positivos hallados en las expresiones (2.34) y (2.35) permite evidenciar que el mismo vehículo o cohete en este caso, tiene un ahorro en RP-1 de 510,6 kilos. Al sumar estos dos resultados en el Falcon Heavy, el ahorro en peso de combustible LOX y RP-1 (1778,93+769,40) al lanzar desde la línea del ecuador es de 2548,33 Kg de combustible que, en últimas, se puede usar en más carga útil o en un ahorro económico significativo de combustible.

El costo promedio del LOX es de \$USD 7,55 por Kg (Wade, 1980) y RP-1 de US\$5,35 por Kg (Quimi-Net, 2016); en tal virtud, el ahorro en combustible LOX y RP-1 al lanzar desde el ecuador será:

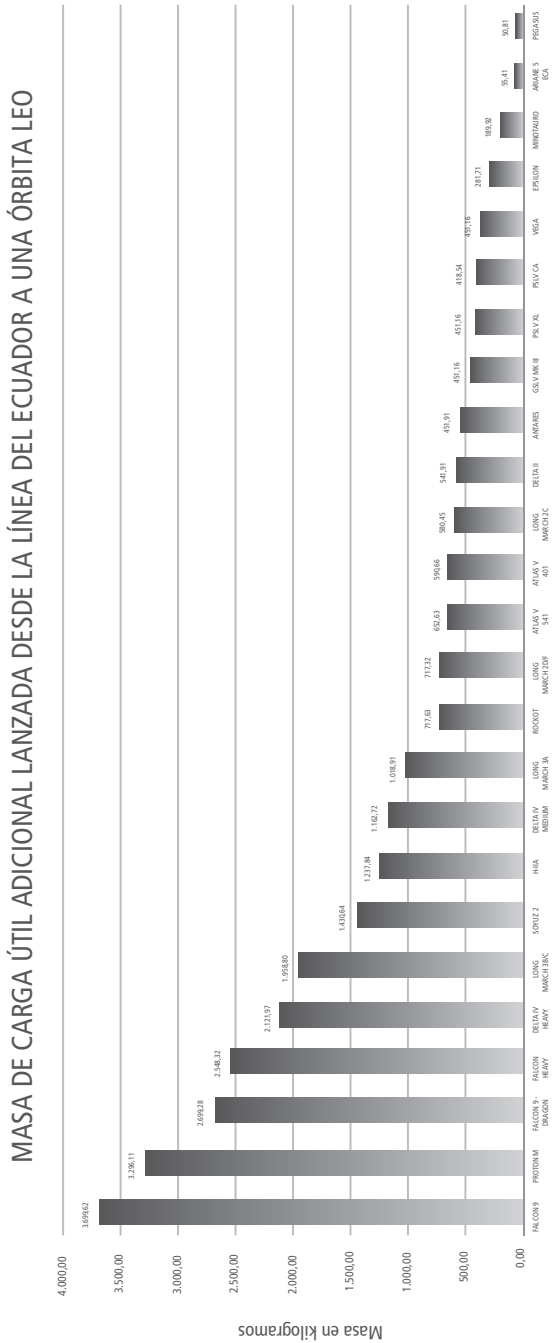
- LOX USD\$ 13.430,92
- RP-1 USD\$ 4.116,29

El ahorro en el costo de combustible es entonces aproximadamente de USD\$17.542; la diferencia se hace aún más significativa, cuando la variable a calcular es el costo de un kilogramo puesto en el espacio, considerando las tablas 11 y tabla 12 en órbitas LEO y MEO/GTO para el vehículo Falcon Heavy, oscilando entre poco más de diez millones de dólares (USD\$ 10'784.505) y poco menos de veintiséis millones de dólares (USD\$ 25'768.648) respectivamente.

Al aplicar la misma metodología en los demás vehículos espaciales lanzados en 2018, analizando sus sitios de lanzamiento, costos y masas, versus el lanzamiento desde la línea del ecuador, se observa en la figura 51 la masa en carga útil que se puede poner de más usando el mismo vehículo en órbitas LEO. En la figura 52 será la masa a favor al lanzar desde la línea del ecuador a órbitas MEO/GTO.

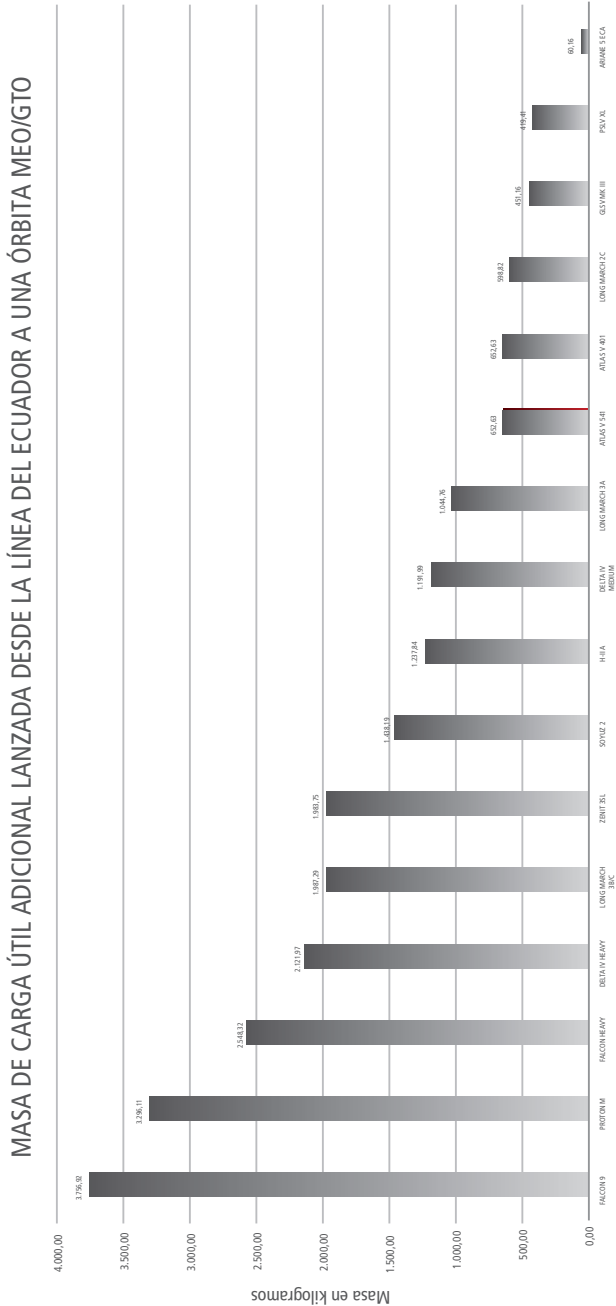
Por otra parte, haciendo el mismo ejercicio de convertir las masas expuestas en las figuras 52 y 53 en costos por kilogramo puesto en las órbitas descritas, se encuentran los valores en dólares americanos de las ganancias aproximadas en carga útil al lanzar desde la línea del ecuador a la órbita LEO en la figura 54, y a la órbita MEO/GTO en la figura 55.

Figura 51. Masa adicional en carga útil a órbita LEO



Fuente: Elaboración propia.

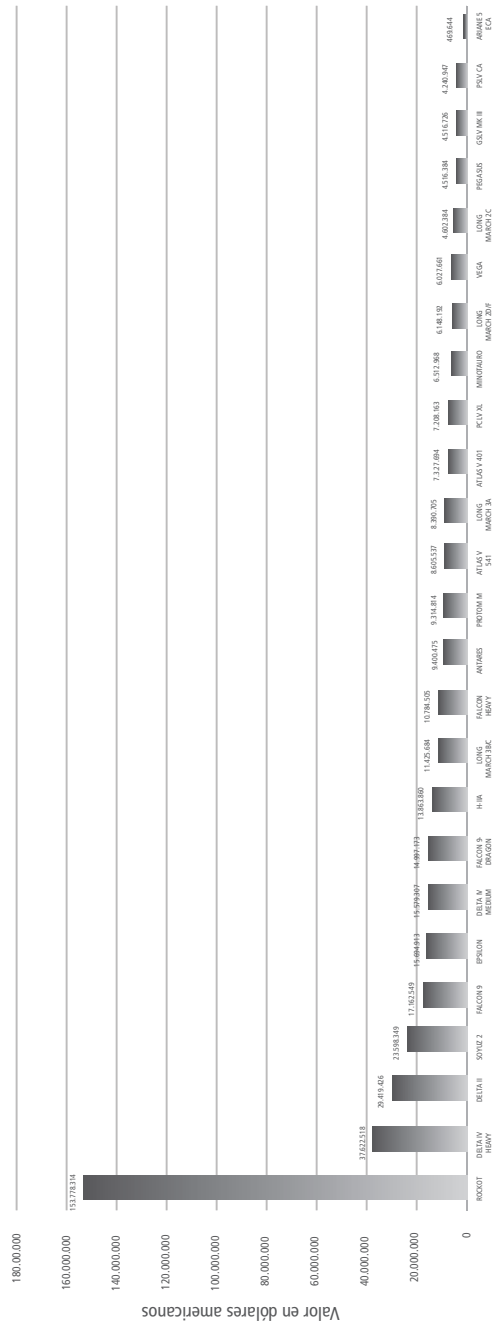
Figura 52. Masa adicional en carga útil a órbita MEO/GTO



Fuente: Elaboración propia.

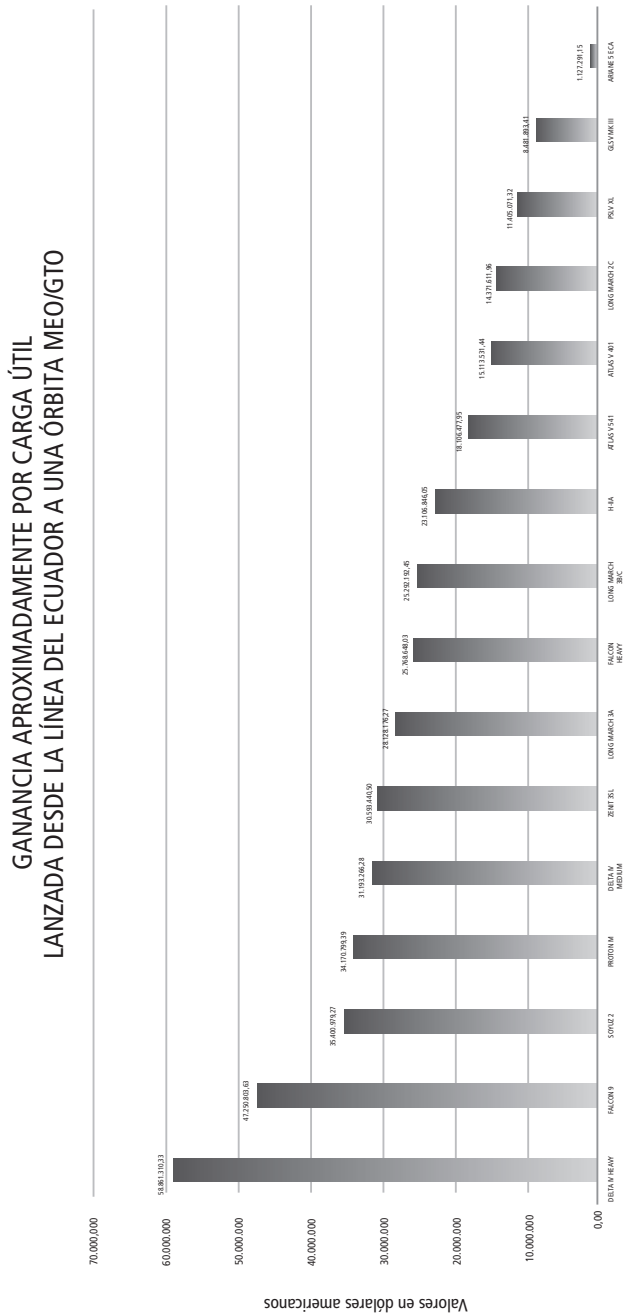
Figura 53. Ganancia adicional en carga útil a órbita LEO

GANANCIA APROXIMADA POR CARGA ÚTIL
LANZADA DESDE LA LÍNEA DEL ECUADOR A UNA ÓRBITA LEO



Fuente: Elaboración propia.

Figura 54. Ganancia adicional en carga útil a órbita LEO



Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones

El análisis del problema de los dos cuerpos, la ecuación del movimiento en torno de las fuerzas ejercidas por la Tierra y el SCG, dan un acercamiento teórico al diseño y planeamiento de la órbita de un satélite que permita a futuro corroborar la minucia técnica del vuelo de los satélites colombianos. La inclinación máxima de las órbitas LEO o MEO/GTO para el máximo aprovechamiento de un satélite en Colombia debe ser de 16 grados, para que la cobertura en su vuelo sobre el territorio nacional garantice un paso vertical sobre todos los puntos geográficos del país; pero en la medida que crezca la red de satélites colombianos en el espacio, los cálculos de cobertura deberán ser complementados.

La aplicación de las bases de las ciencias del espacio, de las leyes de Kepler, las leyes de Newton, la ecuación Tsiolkovsky, las ciencias de la Tierra, la mecánica celeste, evidencian la sostenibilidad y rentabilidad del negocio espacial, representada en los precios globales promedio de poner cargas útiles en el espacio que, en conjunción con los combustibles, los tipos de vehículos espaciales o cohetes, justifican ver en Colombia una gran oportunidad en el desarrollo de la carrera espacial desde el diseño y construcción de puertos espaciales sobre la línea del ecuador de Colombia, que permitan ofertar al negocio espacial global, un punto de lanzamiento que economiza combustible y permite llevar más carga útil al espacio.

Al existir una serie de restricciones geopolíticas sobre la disponibilidad de ubicaciones geoestratégicas para el establecimiento de puertos espaciales en el mundo, Colombia es uno de los 13 países ecuatoriales que, por su desarrollo militar, desarrollo económico y posición geoestratégica, representa uno de los mejores prospectos para la instalación de lanzadores espaciales.



PROGRAMA ESPACIAL COLOMBIANO*

Carlos Enrique Álvarez Calderón

CR. Carlos Giovanni Corredor Gutiérrez

CR. Robert Santiago Quiroga Cruz

CR. (RA) Álvaro Molano Valbuena

*La Tierra es la cuna de la humanidad,
pero nadie puede vivir en la cuna por siempre*

Konstantin E. Tsiolovsky

* Este capítulo hace parte del proyecto de investigación de la Maestría en Seguridad y Defensa Nacionales, Desafíos y Nuevos Escenarios de la Seguridad Multidimensional en el Contexto Nacional, Regional y Hemisférico en el Decenio 2015-2025, el cual hace parte del grupo de investigación Centro de Gravedad de la Escuela Superior de Guerra General Rafael Reyes Prieto, reconocido y categorizado en (A1) por COLCIENCIAS, con el código COL0104976.

1. Introducción

Las potencias espaciales podrían dividirse en tres categorías: las superpotencias originales (Rusia y Estados Unidos), un grupo más grande de poderes espaciales de rango medio, y los nuevos participantes. Las superpotencias espaciales lanzaron por primera vez satélites en 1957 y 1958; el grupo de rango medio las siguió en las décadas de 1960 a 1980; y los nuevos participantes a partir de la década de 1990. Hasta el día de hoy, Rusia y Estados Unidos siguen siendo las superpotencias dominantes, tomando en cuenta que Estados Unidos tiene el presupuesto espacial más grande que todos los demás Estados combinados, y Rusia lanza más satélites al año que cualquier otro actor espacial. Por su parte, las potencias de rango medio como China, Japón, India, Israel y Corea del Sur, han logrado convertirse en programas espaciales significativos y maduros, mientras que los logros espaciales de Francia formaron la base del programa espacial europeo.

A pesar de las diferencias de escala y presupuesto, los programas espaciales de los nuevos participantes han tenido muchas similitudes en su desarrollo; comenzaron con pequeños pasos, utilizando cohetes primitivos de combustible sólido y/o colocando pequeños satélites en órbitas terrestres, hasta perseguir un camino de la indigenización para el desarrollo de sus propias capacidades espaciales (aprender a tomar prestada tecnología del extranjero y reconstruirla en casa); en efecto, programas espaciales como los de Brasil, México, Argentina, Perú, Chile, Bolivia y Venezuela, entre otros, son claros ejemplos de cómo las actividades espaciales pueden servir de herramienta para el desarrollo nacional, en

campos como las comunicaciones, la observación de la Tierra y la protección al medio ambiente.

En contraste, la estrategia de aprovechamiento de los recursos espaciales por parte de Colombia habría estado marcada por la falta de una hoja de ruta clara, resultando en una multiplicidad de esfuerzos desarticulados, con sus respectivas ineficiencias asociadas.

Esta situación ha relegado a Colombia con respecto al resto de la comunidad espacial internacional, no solo dentro del ámbito global sino regional, si se toma en consideración que Estados de la vecindad, aun contando con menores recursos y mayores dificultades, cuentan con programas espaciales que generan retornos y beneficios sociales, tecnológicos, industriales y económicos asociados a las tecnologías espaciales.

En la actualidad, Colombia enfrenta grandes y diferentes retos que implican, además de la necesidad de fortalecer su seguridad y defensa, la de incursionar en campos tales como la búsqueda de energías limpias y asequibles, proteger al medio ambiente de la degradación, fortalecer la educación en materia de tecnología, información y comunicación (TIC), incrementar su competitividad económica, optimizar la infraestructura de comunicaciones y transporte, y promover relaciones internacionales mutuamente beneficiosas; y, en todos ellos, el uso y el aprovechamiento del espacio ultraterrestre juega un papel fundamental. En tal virtud, la formulación, ejecución y consolidación de una estrategia espacial en Colombia imprimiría un impulso importante en pro del desarrollo y la prosperidad nacional.

La economía colombiana ocupa a nivel mundial, la posición 39 en el listado de países por tamaño de su Producto Interno Bruto (PIB), siendo superada a nivel latinoamericano solo por Brasil, México y Argentina, que ocupan las posiciones 9, 15 y 24, respectivamente (The World Bank, 2019a). Sin embargo, Estados como Pakistán (posición 40 en el mismo listado), Rumania (posición 47), Perú (posición 50), Nueva Zelanda (posición 52), Argelia (posición 54), Ucrania (posición 58) y Luxemburgo (posición 72), ubicados por debajo Colombia, cuentan con una agencia espacial registrada ante las Naciones Unidas (United Nations Office for Outer Space Affairs -UNOOSA-, s.f.).

De otra parte, en el documento *Perspectivas económicas mundiales: mayores tensiones, escasas inversiones*, de junio de 2019, el Banco Mundial estima que la economía nacional crecerá un 3,5% en 2019, cifra superior al 3,3% inicialmente previsto, equivalente además a casi un punto adicional del crecimiento de la economía mundial, estimado en 2,6%, y casi el doble del crecimiento previsto para la región del 1,7%. El crecimiento de la economía de Colombia en 2019 solo es superado por Bolivia (4,0%) y Perú (3,8%), y estaría por encima del previsto para Brasil (1,5%), México (1,7%) y Argentina (que caería un 1,2%), e igualaría al de Chile (3,5%). Así mismo, para 2020 y 2021, se estima que el PIB de Colombia podría crecer un 3,7% durante ambos periodos (The World Bank, 2019b).

Frente a una mejora de la economía y los indicadores sociales asociados, resulta lógico pensar que, en el siglo XXI, el espacio exterior puede ser para Colombia un escenario de oportunidades geopolíticas, económicas y estratégicas, que alentará a su vez al gobierno, empresas, inversionistas, la comunidad científica y la sociedad en general, a buscar fronteras más allá del conocimiento y los recursos convencionales, donde la ventaja competitiva, el desarrollo tecnológico, la comprensión científica, el crecimiento económico, el prestigio global y el fortalecimiento de su seguridad y su soberanía, pueden ayudar a la construcción de un Estado moderno.

El espacio exterior podría convertirse también en una de las puntas de lanza de la transformación productiva de la economía nacional. La dependencia en commodities, tanto agrícolas como mineros, supone un gran riesgo debido a las constantes fluctuaciones en el mercado global, como fue el caso de la crisis del petróleo ocurrida en 2014 (Depersio, 2019). Así, las materias primas que se venden a precios bajos en el mercado internacional, se transforman, multiplicando su valor en beneficio de grandes conglomerados económicos de otros países; para el caso del sector espacial, se estima que por cada dólar invertido en la exploración espacial, éste se traduce en un beneficio económico de 10 dólares, en lo cual las empresas nacionales pueden tener una participación clave (Amadeo, 2019), como parte de un círculo virtuoso en términos del PIB (ventas, empleo, gasto de los hogares, impuestos y reinversión de retornos).

En este sentido, es necesario plantear una aproximación diferente a la utilizada hasta ahora, con el fin de aprovechar los beneficios asociados a la participación nacional en las actividades espaciales. Ésta requiere llevarse a cabo en forma metódica y efectiva, de tal suerte que no represente otra iniciativa perdida, en un momento en el que muchos Estados miran al espacio como fuente de oportunidades reales para atender las necesidades actuales y futuras de sus ciudadanos. Tal y como ha quedado claro en los capítulos anteriores de esta obra, tener acceso en la actualidad al espacio ultraterrestre, se ha convertido en el equivalente a tener acceso al mar. Colombia no puede permitirse carecer de acceso al espacio exterior, porque es y será la mayor fuente de tecnología y desarrollo; como indica Kaku (2018), acceder al espacio permitirá que la sociedad humana prospere más allá de la Tierra, comenzando con un futuro cercano interplanetario, para luego expandirse a todo el Universo, e incluso más allá.

2. El espacio como una oportunidad

Los datos y servicios espaciales se han convertido en una condición indispensable de la vida diaria de las personas; permiten introducir constantes ofertas de valor derivadas de las tecnologías espaciales. En este sentido, el ecosistema espacial internacional cambia rápidamente, dando vida a nuevos actores con proyectos, retos y ambiciones propias, quienes convierten cada vez más el espacio exterior en un escenario de interacción comercial con mayor participación del sector privado. Así, y como consecuencia directa, se generan cambios tecnológicos mayores y disrupciones en los modelos industriales y de negocios del sector, reduciendo el costo de acceso y uso del espacio exterior; permitiendo, por ejemplo, la explotación de los recursos naturales existentes en el espacio exterior, que son escasos o casi inexistentes en la Tierra.

Teniendo en cuenta las oportunidades que provee el espacio exterior y la inminente necesidad del ser humano de acceder a él para explorarlo y explotarlo, Colombia tiene entre otras, la opción de lograr bene-

ficios dada su posición ecuatorial, que ofrece ventajas para desarrollar capacidades de lanzamiento, ya sea de manera autónoma o dentro de un proceso de cooperación espacial internacional con aliados, entidades u organizaciones con intereses en lograr esta capacidad. En este sentido, el campo espacial permite un medio ambiente perfecto para la participación de la industria aeroespacial colombiana en la ejecución de proyectos de gran envergadura como: el diseño, construcción y puesta en órbita de diferentes tipos de sistemas satelitales; procesamiento y almacenamiento de datos espaciales; generación de aplicaciones, productos y servicios relacionados con las tecnologías espaciales; investigación y desarrollo de tecnologías y soluciones aplicadas; programas académicos especializados y, la ejecución de programas asociados a la cooperación espacial internacional. Todos estos proyectos permitirían en diferente medida, la gestión de canales de acceso y transferencia tecnológica, fomentando la creación de un sector productivo nacional, una nueva área de conocimiento y la inmersión del país en el concepto de desarrollo social y económico basado en las tecnologías provenientes o derivadas del espacio exterior.

3. Conciencia, conocimiento y desarrollo nacional a través del espacio

Existe una estrecha relación entre la actividad espacial y la educación, sea ésta de nivel primario, secundario o terciario. Según indica Monastersky (2009), en un estudio realizado por la revista *Nature*, más del 80% de los científicos encuestados consideró que las ciencias de la vida, las ciencias físicas, la ingeniería y la fisiología humana, se beneficiaron en cierta medida del vuelo espacial humano, y casi el 90% dijo que todavía inspira a las generaciones más jóvenes a estudiar ciencias.

La naturaleza altamente técnica del sector espacial requiere de una comunidad de expertos y técnicos altamente calificados dentro del país. Esto significa que la educación terciaria del país debe responder a esta necesidad, ofreciendo oportunidades a nivel nacional.

Desafortunadamente, Colombia no cuenta con suficientes programas de nivel terciario relevantes para el desarrollo espacial en la actualidad. Por ello, es necesario apoyar las iniciativas que ya están en curso por parte de la academia, en cuanto al intercambio de programas y estancias; esto permitiría enviar estudiantes colombianos a las mejores universidades y aprender de primera mano con los líderes del sector. Por supuesto, para que esto tenga éxito, se requiere que exista a su regreso una oferta laboral que se corresponda con las aspiraciones de estos profesionales, o de otro modo, terminarán por renunciar y pasarán a la estadística de los talentos fugados del país.

Una importante reflexión de esta situación es que el gran reto de la iniciativa académica no está en la tecnología, en la ciencia o en el recurso humano. El factor más crítico es la toma de decisión de los administradores de los recursos públicos, siendo necesario que se considere la inversión en tecnologías espaciales como fundamental para el desarrollo social, económico y transversal a todos los sectores productivos de la sociedad y del país; creando un ambiente productivo centrado en el estímulo del uso de tecnologías espaciales, en el cual los profesionales nacionales tendrían un espacio propicio para aplicar sus conocimientos en beneficio de la nación.

En este mismo sentido y, enfocadas en el desarrollo nacional sustentado por las tecnologías espaciales, las aplicaciones de telecomunicaciones y observación son una oportunidad vital para el cierre de las enormes brechas sociales existentes, así como para incrementar la productividad de las empresas en la nueva economía digital. Un análisis de correlación realizado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP), entre la velocidad de conexión a Internet, la cual es una medida de la calidad del servicio y el PIB per cápita, concluyó que si Colombia crece su velocidad promedio de conexión a Internet (o velocidad de descarga) en 1 Mbps, su PIB per cápita podría aumentar hasta en 1,6%. Si se triplica la velocidad del país, el PIB per cápita podría aumentar hasta en 18,4%, alcanzando niveles de países como México y Brasil (DNP, 2018).

Por su parte, la observación desde el espacio contribuye, entre otros aspectos, a monitorear el riesgo relacionado con los fenómenos natu-

rales, como en el caso de la tragedia de Mocoa ocurrida en 2017. Así mismo, las imágenes satelitales permiten analizar fenómenos tales como la erosión en las laderas y el comportamiento de la vegetación en ellas, causas frecuentes de deslizamientos y represamiento de ríos. Para el caso de Mocoa, tragedia que pudo haberse evitado, tan solo los costos materiales de recuperación de las viviendas se estiman en US\$24 millones, sin contar las cerca de 300 víctimas mortales, cuya pérdida es irreparable (Carriazo, 2018). Es indudable el aporte que el uso y la explotación del espacio pueden ofrecer a la economía colombiana. Además de las mencionadas, existen nuevas y mejores oportunidades financieras y sociales relacionadas con tecnologías espaciales tales como la movilidad, el Internet de las cosas, la conectividad, la prevención de desastres y el control efectivo del territorio, conforme el país asuma una actitud decidida frente al aprovechamiento del recurso espacial.

4. Elementos para la competitividad de un programa espacial en Colombia

La principal fortaleza del sector espacial radica en la transferencia de conocimiento teórico al uso práctico, que es relativamente ágil y sistemática, por lo cual, contar con una política espacial estructurada y coherente resulta pertinente para el desarrollo y el progreso del Estado. No se trata entonces de imitar a los países más avanzados en esta materia, más sí considerarlos como referentes. En este caso, la hoja de ruta espacial que Colombia implemente debe estar acorde con la realidad socioeconómica del país e incluir aspectos como el conocimiento, control, uso, exploración y explotación de los recursos en el espacio. Si bien los desafíos de competitividad de cara al uso del espacio pueden ser complejos, se considera que sean un esfuerzo articulado, ya que los avances aislados de diferentes actores han demostrado tener poco impacto y baja generación de resultados.

El reto de construir y desarrollar un programa espacial estratégico y efectivo, consiste en definir y fortalecer sus componentes. Bajo esa

premisa, el Consejo Nacional de Investigación de los Estados Unidos, National Research Council (2009), a través del Comité para el Razonamiento y el Establecimiento de Metas del Espacio, estableció cuatro elementos críticos para tal propósito, sin los cuales la voluntad de las agencias gubernamentales, la academia y las empresas de cualquier país, carecerían de robustez, realismo y sostenibilidad en su desarrollo; éstos son: 1) estrategias nacionales coordinadas, 2) talento humano competente, 3) infraestructura organizada y de tamaño efectivo y 4) inversión prioritaria en tecnología e innovación. La delimitación de estos factores generales y su identificación en el plano nacional facilitará la adopción de medidas tendientes a fortalecerlos, y con ello, la consolidación de un programa espacial colombiano que sirva a las necesidades e intereses del país.

4.1. Estrategias nacionales coordinadas

Este elemento se refiere a la implementación de la política espacial nacional de manera coherente, en la que todas las agencias (civiles y militares), con el apoyo de universidades, centros de investigación y empresas, trabajan coordinadamente para hacer frente a las necesidades y prioridades nacionales, alineando sus esfuerzos hacia los intereses comunes en el espacio, en beneficio de la seguridad, desarrollo y progreso nacional. Un conjunto coordinado y sostenible de estrategias debería garantizar que las responsabilidades se ajustan de manera realista a los recursos disponibles.

En el caso colombiano, solo hasta 2006 se proyectó articular estos esfuerzos a través de la Comisión Colombiana del Espacio (CCE). A este órgano de consulta se encomendó la tarea de coordinar, planificar y liderar la implementación de políticas nacionales para el desarrollo y aplicación de tecnologías espaciales, lo mismo que la generación de planes y programas del sector.

La CCE comenzó con 15 miembros y hoy está conformada por 47: 13 ministerios, cuatro departamentos administrativos, junto con otras 21 entidades gubernamentales y nueve universidades, en calidad de consultores técnicos. En 2007, presentó un documento denominado

Lineamientos de la política espacial, que designó siete áreas técnicas en los que sendos grupos de trabajo deberían empezar a actuar: telecomunicaciones, navegación satelital, observación de la Tierra, astronáutica, astronomía y medicina aeroespacial, gestión del conocimiento y de la investigación, gestión política y de la investigación y, asuntos legales e infraestructura colombiana de datos.

No obstante, a pesar del interés del gobierno y el propósito estratégico de la comisión, los avances coordinados no han sido significativos y se deben hacer cambios estructurales para fortalecer su gestión. La primera observación, da cuenta de la naturaleza armonizadora y consultiva de la CCE, sin que su organización la defina como un ente rector o regulador de la actividad espacial. Incluso, modificaciones en sus funciones como las establecidas en el Decreto 724 de 2016 pueden “significar un debilitamiento en el apoyo político para la CCE y, con ello, en el desarrollo de temas aeroespaciales en Colombia” (Correa, 2017).

Otra crítica apunta a que la política espacial no es clara, pues la CCE carece de un documento de referencia con suficiente peso político y administrativo, que impide su trascendencia en todo el ciclo de la política pública (Becerra, 2014). En este sentido, los documentos que produce la CCE no persiguen un fin común y se limitan a reportes de los grupos de trabajo, cuya importancia radica en el interés particular de la entidad que los lidera; el último de estos reportes data de 2015 y no se observan avances significativos.

La tercera reflexión es acerca de la necesidad de asignación de un presupuesto autónomo para el desarrollo de actividades espaciales, puesto que no existe actualmente alguno para tal fin. Las cifras destinadas a la investigación y exploración del espacio resultan de la revisión que se hace de las entidades que conforman la CCE y, en ese sentido, se hace acopio de temas como convocatorias para proyectos académicos, fortalecimiento de capacidades en telecomunicaciones, o formación de capital humano.

Ante lo expuesto, el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad, teniendo como referencia el concepto de economía espacial de la Organización para la Cooperación y el

Desarrollo Económicos (OCDE), buscó ofrecer una solución que, aunque no es completa, tiene como fin implementar una Política Nacional para Desarrollar el Sector Espacial, como parte del Pacto Transversal VII: Pacto por la Transformación Digital de Colombia: gobierno, empresas y hogares conectados con la era del conocimiento. Así, por primera vez un gobierno nacional consideró el sector espacial dentro del plan de desarrollo del país, como parte integral del crecimiento económico, la competitividad y motor de la ciencia, la tecnología y la innovación. De esta manera, dentro del marco de la Política Nacional de Desarrollo Productivo, el CONPES 3866 de 2016, asignó a la Comisión Colombiana del Espacio:

La tarea de diseñar una política nacional para el desarrollo de este sector que incluyera como mínimo: revisar y plantear una estrategia de fortalecimiento del marco de gobernanza actual, proponiendo medidas para su articulación con las políticas de productividad y competitividad del país, definiendo roles entre las entidades públicas y articulando los intereses del sector público, privado y academia; establecer una hoja de ruta para la identificación de potencialidades del país, basada en evidencia, que permita definir líneas estratégicas sobre las cuales el país podría orientar esfuerzos tanto públicos como privados y, definir soluciones para reducir barreras y fallas de mercado que habiliten el emprendimiento y la inversión en el sector espacial, así como la adopción de estas tecnologías en todos los sectores de gobierno y en el sector productivo (DNP, 2019, pp. 655-656).

En tal virtud, y según lo considera el Plan Nacional de Desarrollo, el sector espacial es un importante tema pendiente para el país, convirtiéndose en un aspecto de gestión a evaluar tanto para el gobierno nacional, como la CCE o cualquier otra entidad que lo promueva. En este sentido, las actividades espaciales deben estar enfocadas y articuladas en un esfuerzo común que permita alcanzar los intereses nacionales, y de la misma forma, involucre a la sociedad a ser partícipe y protagonista de los avances que Colombia logre en esta estrategia espacial coordinada.

4.2. Talento humano competente

Quizás el reto más grande de los países con incipientes programas espaciales es la consolidación de una masa crítica de estudiantes, investigadores y profesionales que laboren en actividades relacionadas con el espacio, tanto en el ámbito civil, como militar. Una premisa definitiva establece que, en la industria aeroespacial, las agencias civiles y militares y la industria privada, son codependientes de la misma fuerza laboral altamente calificada. Éste ha sido el caso de empresas aeroespaciales tales como Scaled Composites, SpaceX y Virgin Galactic, que han hecho acopio de pilotos, ingenieros, técnicos y profesionales en diversas disciplinas, quienes han aportado su conocimiento para el logro de hitos históricos en la carrera espacial comercial.

En el escenario nacional, existen dos barreras a superar. La primera, relacionada con la oferta de conocimiento especializado, identificando programas académicos disponibles relacionados con la temática aeroespacial, que se encuentran principalmente enfocados en lo estrictamente aeronáutico, registrando un limitado conocimiento de lo espacial. El segundo aspecto, es la casi nula existencia de proyectos productivos espaciales, articulados ya sea por el Estado, la academia o la empresa privada, sin los cuales, no es posible identificar y posicionar el espacio exterior como un generador y motor de actividad económica y, por ende, el capital humano educado en temas relacionados con el espacio emigra del país o simplemente concentra sus esfuerzos y conocimientos en otras áreas laborales transversales.

Históricamente, en Colombia los avances tangibles en las ciencias espaciales han sido protagonizados por la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) y la academia, que mantienen un permanente interés por el espacio exterior, siendo inciertos los esfuerzos que puedan realizar otras entidades estatales y la empresa privada para el desarrollo del talento humano en esta área del conocimiento. Con la creación del Departamento de Asuntos Espaciales de la FAC, esta institución destinó personal especializado en temáticas espaciales a fin de diseñar, conducir y coordinar proyectos

enfocados en desarrollar capacidades espaciales propias. Gracias a la activa participación de este personal, se han logrado importantes hitos en proyectos llevados a cabo en coordinación con la academia, como es el caso del lanzamiento de globos sonda, avances en coherería, desarrollo de vehículos autónomos y finalmente, contar con un nanosatélite propio, incluyendo la integración de una estación terrena para su control y seguimiento. De la misma forma, y dando continuidad a la estrategia de formación de capital humano, esta institución desarrolla un proceso de capacitación continuo que busca ampliar sus habilidades en áreas de ingenierías, gobernanza y administración de recursos espaciales y, proyecta contar con un nutrido grupo de profesionales con conocimientos espaciales al servicio de la institución, sector defensa y del país.

Un aspecto a considerar dentro de la formación del capital humano es la migración de talentos o fuga de cerebros, siendo un fenómeno que afecta a los países en vías de desarrollo (Angulo, 2016). En Colombia, la evolución del perfil migratorio muestra que los países de destino más importantes son Estados Unidos, España, Canadá y Ecuador (Ramírez y Mendoza, 2013). Como sucede en las diferentes áreas del STEM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas, por sus siglas en inglés), muchos de los profesionales y académicos en ciencias espaciales no encuentran en el país una estructura organizativa que respalde su investigación y deciden emigrar hacia países o instituciones internacionales con más recursos.

Así, ingentes esfuerzos adelantan las universidades colombianas para la formación de profesionales e investigadores en ciencias aeronáuticas y aeroespaciales, quienes constituyen el elemento más valioso para un programa espacial coherente. Estudios en tecnologías, pregrados, especializaciones y maestrías, progresivamente enriquecen la oferta educativa colombiana, al tiempo que universidades, principalmente de Bogotá, Cali y Medellín, se fortalecen como los centros educativos más avanzados en temáticas aeroespaciales en el contexto nacional. Por otro lado, universidades consideradas referentes mundiales como Purdue (Estados Unidos), Georgia Tech (Estados Unidos), Nanterre (Francia) y Lipköping (Suecia) entre otras, han puesto su mirada en la formación investigativa del recurso humano en Colombia, a través de acuerdos colaborativos,

movilidad académica, estancias estudiantiles y redes de excelencia. Esta última iniciativa apunta a una participación de las universidades nacionales y extranjeras en proyectos de aplicación real, con el liderazgo formal e intensivo del sector privado y del gobierno colombiano para fortalecer la asociación del modelo triple hélice (universidad-empresa-Estado).

La decisión de un país de involucrarse en actividades espaciales hace parte de un círculo virtuoso de interés social y económico. Davenport (2018), menciona que con la ola de empresas privadas incursionando en el espacio, las aplicaciones para programas en ingeniería aeroespacial en solo una universidad de Estados Unidos han aumentado en un cincuenta por ciento. De esta manera, Colombia y el mundo experimentan una interesante etapa de florecimiento del interés por la exploración espacial, donde el desafío por construir un programa nacional espacial puede ser una excelente oportunidad para contar con una fuerza laboral sólida en esta materia.

4.3. Infraestructura organizada y de tamaño efectivo

Los logros del programa espacial de un cualquier Estado dependen del grado de desarrollo de su infraestructura, compuesta por instalaciones, organizaciones y centros de investigación, bien sean de propiedad del gobierno, la industria, la academia u otras instituciones del sector privado. Ante la imperiosa necesidad de alcanzar metas tangibles en el corto plazo, el inventario de esta infraestructura debe relacionar facilidades de índole académica e investigativa, como las universidades con sus laboratorios en áreas especializadas de electrónica, ingeniería de software, telecomunicaciones, robótica, Internet de las cosas, simulaciones virtuales y otros campos relacionados con la exploración espacial, tales como la presurización, propulsión, química, e incluso fisiología de vuelo, entre otras. Así mismo, pueden hacer parte del inventario las instalaciones propias de las empresas y corporaciones privadas colombianas, cuyas aplicaciones aeronáuticas guardan estrecha relación con las espaciales. También es importante incluir todas aquellas áreas destinadas para el lanzamiento, operación y control de misiones que superen o puedan

superar la atmósfera, dando así cumplimiento al primer imperativo astropolítico propuesto en esta obra.

Desde el punto de vista académico, la infraestructura espacial aviva en las nuevas generaciones el interés por explorar campos fascinantes como la astronomía y la astrofísica, al tiempo que facilita la comprensión de diversos conceptos que en principio pudieran parecer complejos. Desde esta perspectiva, hacen parte de tal infraestructura los museos, bibliotecas, observatorios, planetarios y aulas de clase que promuevan el conocimiento de las ciencias del espacio. Caso distintivo en Colombia es el Observatorio Astronómico Nacional de Colombia (OAN), el primero construido en América bajo la iniciativa del naturalista español José Celestino Mutis, y que en la actualidad es utilizado para labores de investigación, docencia y extensión, bajo la dirección la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. La decisión de fomentar la investigación en las generaciones futuras proviene de los académicos de hoy y no se condiciona al grado de desarrollo del país en materia tecnológica.

A nivel educativo y de investigación en educación superior, es loable la inversión que instituciones privadas y públicas realizan en temas aeroespaciales, a fin de contar con un grado de alistamiento cercano al de sus pares internacionales. Tal es el caso de la Universidad Sergio Arboleda, gestora del lanzamiento del primer satélite colombiano. Otras iniciativas similares han resultado en la Universidad de Los Andes con el Proyecto Uniandino Aeroespacial, que busca el diseño de cohetes capaces de poner un objeto en órbita baja, el lanzamiento de globos sonda que transporten nanosatélites a través del proyecto Kratos de la Universidad EAFIT, y otros propósitos académicos en las universidades del Valle, Nacional, de Antioquia, San Buenaventura, Pontificia Bolivariana y Los Libertadores, que evidencian el enorme potencial existente y aporte de la academia colombiana a las ciencias espaciales.

En cuanto a la industria colombiana, en los últimos diez años se ha expandido el enfoque aeronáutico y con él, la infraestructura corporativa existente, para dar cabida a posibles negocios en temáticas espaciales, lo cual constituye un panorama prometedor para la activación del sector.

La Corporación de la Industria Aeronáutica Colombiana (CIAC), empresa aeroespacial de economía mixta más grande del país, ha venido estrechando desde 2015 sus relaciones comerciales con la multinacional europea Airbus, específicamente a través de la división operativa Airbus Defense and Space. Gracias a los acuerdos establecidos, así como a la obtención de las certificaciones internacionales AS/EN 9100 y AS/EN 9110, la oferta en temas de fabricación y mantenimiento de aeronaves, equipos, partes aeronáuticas y drones se ha diversificado, contemplando la posible producción de componentes para satélites y la provisión de servicios aeroespaciales, cuyo potencial resulta interesante para el desarrollo económico del mercado.

Por otro lado, algunas empresas privadas del ámbito aeronáutico que se agrupan en agremiaciones especializadas o clústeres, han cambiado su denominación a corporaciones aeroespaciales como parte del proceso de sofisticación de suministro de productos y servicios, lo cual cambia favorablemente la visión de sus negocios, como es el caso del Clúster Aeroespacial Colombiano (CAESCOL) y la Asociación Colombiana de Productores Aeroespaciales (ACOPAER).

Cabe resaltar el sustancial aporte que la FAC ha brindado para la consolidación de una infraestructura fundamental dentro del sector. En este sentido, las instalaciones de las Bases Aéreas de Marandúa (Vichada) y el Aeródromo de Velásquez (Boyacá) han servido de bases de lanzamiento para cohetes y globos sonda con propósitos de investigación espacial. Así mismo, con el fortalecimiento de las instalaciones y el moderno equipamiento disponible en el Centro de Investigaciones en Tecnologías Aeroespaciales (CITAE) en Cali-Valle, el Centro de Desarrollo Tecnológico Aeroespacial para la Defensa (CETAD) en Rionegro-Antioquia, y el Centro Tecnológico de Innovación Aeronáutica (CETIA) en Madrid-Cundinamarca, se han logrado avances significativos en temas de ingeniería y tecnología. En cuanto a otras disciplinas, la FAC ha incursionado en temas de la fisiología y psicología aeroespacial, promoviendo ecosistemas científicos alrededor del desarrollo de trajes espaciales o el estudio del comportamiento humano en misiones de este tipo.

Finalmente, y como parte de la infraestructura espacial nacional, la FAC proyectó y desarrolló el Programa Facsat, que actualmente cuenta con su primer nanosatélite en órbita, el Facsat-1, de una serie de satélites que buscan fomentar tanto el acceso a las tecnologías satelitales, como el desarrollo de capacidades país alrededor del tema espacial. Por medio de esta capacidad, la institución militar colocó al servicio de la sociedad, un activo espacial de observación de la Tierra que orbita el planeta bajo el control de un grupo de profesionales desde una estación terrena en la Escuela Militar de Aviación, constituyéndose en un proyecto integrador que plantea múltiples oportunidades y se visualiza como punto de partida para la consolidación de la infraestructura espacial colombiana y la generación de conocimiento.

4.4. Inversión prioritaria en tecnología e innovación

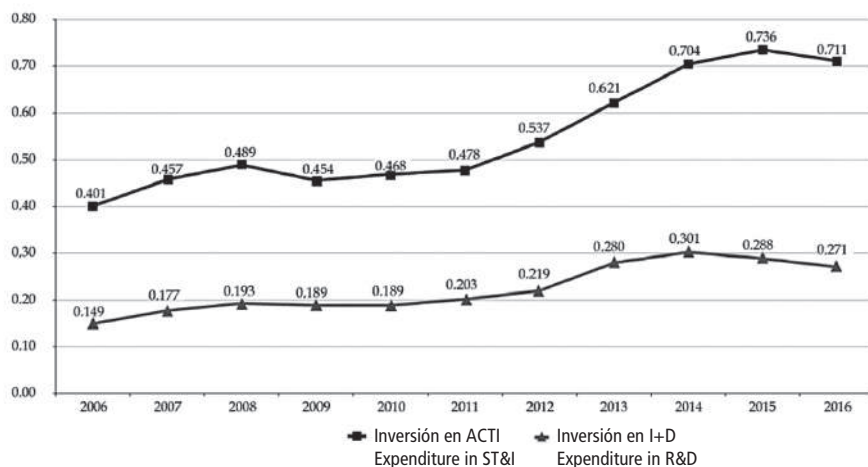
Para la consolidación de un programa espacial, es indispensable cimentar un marco de fomento y apoyo a la tecnología y a las ciencias avanzadas, a fin de propiciar y estimular la investigación, reducir la brecha tecnológica con otros países y mejorar la competitividad del sector productivo. Las inversiones en actividades espaciales pueden impactar y contribuir al estado del arte en sectores relacionados con conectividad a Internet, catastro, medio ambiente, reforestación y fuentes hídricas, entre otros. Por esta razón, es imperativo que la financiación de las actividades espaciales no recaiga exclusivamente en agencias estatales, pues las presiones presupuestarias y prioridades institucionales pueden ser un obstáculo mayor para el avance en este campo.

Por lo general, las actividades espaciales son financiadas en un alto porcentaje con recursos públicos, tanto para actores públicos como privados (Weeden, 2017). En efecto, esto se debe a que la incertidumbre asociada con las altas inversiones y los largos tiempos de retorno, causan que exista un alto riesgo que solo puede ser mitigado con el apoyo estatal. En este sentido, el Reino Unido estima que los retornos de la inversión en proyectos aeroespaciales se obtienen a partir del año doce; por esta razón, el desarrollo del sector en este país se ha dado mediante una

fuerte y continua intervención estatal para incentivar la participación del sector privado (Aerospace Growth Partnership -AGP-, 2013; OCDE, 2016). Esta actitud se ve soportada en que, durante la última década, el cliente principal del mercado sea el gobierno, tanto en aplicaciones civiles como militares (Euroconsult, 2016).

A pesar de las restricciones presupuestales y los desafíos prioritarios que el país deba enfrentar, uno de los retos más importantes es el de la inversión; la calidad de la educación debe ser complementada por la decisión de innovar y asumir riesgos en busca de beneficios superiores, bien sea a través de fondos públicos o privados. Esta oportunidad de financiamiento estatal y corporativo debe ser el escenario para poner la investigación en ciencia y tecnología al alcance de todos, consolidar equipos transdisciplinarios de trabajo en áreas aeroespaciales y brindar a Colombia, una política sostenible y de largo plazo hacia el desarrollo en este campo.

En cuanto a recursos financieros, el sector ha visto cómo éstos han sido dependientes del interés político del momento. Se mencionó anteriormente, que en al menos dos oportunidades existió la voluntad política y se asignaron los recursos para financiar proyectos de adquisición de un satélite de comunicaciones y otro de observación de la Tierra, pero nunca se materializaron. Aunque la inversión en actividades de ciencia, tecnología e innovación (ACTI) se ha incrementado en los últimos diez años (figura 1), como lo muestran los datos del Observatorio de Ciencia y Tecnología (2016), el panorama no es alentador cuando se comparan las inversiones en I+D por cada objetivo socioeconómico.

Figura 1. Evolución de la inversión en actividades de ciencia, tecnología e innovación (ACTI) como porcentaje del PIB, 2006–2016

Fuente: Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología -OCyT(2016, p. 20).

Las estadísticas de la financiación gubernamental para investigación y desarrollo por objetivos socioeconómicos, muestran que durante el periodo 2011-2016, la inversión para la exploración y explotación del espacio fue en promedio 0.32%, es decir USD \$1.410.769,51. Si a estos datos se suman las inversiones realizadas por la FAC para su proyecto de nanosatélite Facsat-1, el promedio de inversión del periodo queda en USD \$1.752.183,84 (tabla 1).

Tabla 1. Inversión en I+D para el periodo 2011-2016

	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Total USD	\$1,458,095.12	\$5,596,343.35	\$107,761.90	\$1,338,624.73	\$816,278.54	\$1,195,999.39

Fuente: Elaboración propia, con datos de OCyT (2016) y FAC (2017).

Para entender mejor la situación de Colombia, vale la pena comparar cómo se encuentra su inversión en ACTI con relación a otros países de la región. La tabla 2 muestra que Colombia ha ido incrementando recien-

temente el presupuesto de ACTI con relación a su PIB; sin embargo, si se tiene en cuenta que países como Brasil, México y Argentina tienen mayor PIB que Colombia (Central Intelligence Agency, 2016), y que a su vez cuentan con mejor nivel de desarrollo tecnológico en el sector espacial, es evidente que Colombia está dando pasos en la dirección correcta hacia la construcción de una economía basada en conocimientos.

Tabla 2. Inversión en ACTI como porcentaje del PIB según países

País	Año				
	2010	2011	2012	2013	2014
Argentina	0,61	0,61	0,68	0,66	0,64
Brasil	1,60	1,56	1,62	1,61	n.d.
Canadá	1,84	1,80	1,79	1,68	1,60
Chile	0,33	0,35	0,36	0,39	0,38
Colombia	0,47	0,48	0,54	0,62	0,70
Costa Rica	1,86	1,77	1,98	2,01	n.d.
Cuba	1,01	0,45	0,59	0,79	0,71
Ecuador	0,47	0,40	n.d.	n.d.	n.d.
España	1,35	1,33	1,29	1,27	1,24
Estados Unidos	2,74	2,77	2,71	2,74	2,76
México	0,75	0,74	0,73	0,75	0,87
Panamá	0,41	0,51	0,31	0,35	n.d.
Portugal	1,53	1,46	1,38	1,33	1,29
Trinidad y Tobago	0,12	0,11	0,12	0,13	0,20
Uruguay	0,69	0,60	0,55	0,51	0,54
Venezuela	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Fuente: OCyT (2016).

De esta manera, se evidencia tanto la importancia como la necesidad de invertir en actividades y proyectos de tecnología e innovación espacial, enfocados en desarrollar capacidades productivas con relación a los retos que demanda el futuro inmediato. Colombia posee una masa

crítica de profesionales y desarrolladores de nuevas ideas de negocio, que rápidamente se adaptan a las oportunidades que ofrece un mercado con alcance global como lo es el espacial. Para esto es necesario dar un paso inicial sólido y comprometido desde el Estado, que brinde bases fuertes y genere un ambiente en el cual se fomente el desarrollo de proyectos e iniciativas de largo plazo, consolidando el inicio del desarrollo de la actividad productiva espacial, siguiendo el ejemplo de múltiples naciones que, desde el interior del Estado, estimularon políticas que permitieron desarrollar la actividad espacial como un reglón adicional de sus economías productivas.

5. Colombia como potencia espacial regional

Dependiendo del nivel de avance tecnológico y económico, las políticas espaciales de los países pueden tener fines más ambiciosos. Por ejemplo, en las potencias espaciales como Estados Unidos, Rusia y la Unión Europea, la política espacial está muy enfocada en el desarrollo del sector económico privado en la exploración y explotación espacial. Por supuesto, estos países ya superaron un periodo en el que el Estado era quien debía realizar la mayor cantidad de inversiones en I+D, y a su vez se constituía en el principal cliente; ahora, su industria se encuentra en un punto de madurez tal, que puede trasladar mayor responsabilidad al sector privado (Harrison, 2012; OECD, 2016; Paikowsky, Reichard, Baram y Ben, 2016). Los países en desarrollo, en cambio, buscan que el resultado de su actividad espacial contribuya al desarrollo económico, a la disminución de brechas sociales y una mejor prestación de servicios públicos (Harding, 2013; Munsami, 2014; Özalp, 2009).

Con base en la tendencia creciente de democratización de acceso al espacio evidenciada a lo largo de los últimos veinte años, en la que para aprovechar al máximo los beneficios de tecnología espacial, no es estrictamente necesario contar con una capacidad autónoma de lanzamiento para situar cargas en órbita, ni con un desarrollo tecnológico y económico más allá de lo factible en aspectos operacionales y de recursos;

Colombia podría buscar posicionarse como una potencia regional espacial, aún si no cuenta con el legado de otros países en la materia.

Con base en la tendencia creciente de democratización de acceso al espacio evidenciada a lo largo de los últimos veinte años, en la que para aprovechar al máximo los beneficios de tecnología espacial, no es estrictamente necesario contar con una capacidad autónoma de lanzamiento para situar cargas en órbita, ni con un desarrollo tecnológico y económico más allá de lo factible en aspectos operacionales y de recursos; Colombia podría buscar posicionarse como una potencia regional espacial, aún si no cuenta con el legado de otros países en la materia.

Sin embargo, para esto, se hace necesario que el gobierno nacional asuma una postura de compromiso clara, que permita hacer realidad lo que algunos pocos países han alcanzado desde hace más de medio siglo y muchos más hacen desde hace unos pocos años, concentrando sus esfuerzos en el uso del espacio exterior, de manera que se alcancen resultados tangibles desde la perspectiva de desarrollo sostenible; es decir, la satisfacción de las necesidades actuales de la humanidad sin comprometer las de futuras generaciones, garantizando un equilibrio entre el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social. Esto sería posible a través de la formulación de una visión y política espacial, que se tradujera en una estrategia, ejecutada bajo el liderazgo de una agencia espacial con la fuerza y recursos necesarios para desarrollar un plan de acción apoyado por el gobierno, que fomente la integración de la academia y la empresa privada con el Estado, en beneficio de los intereses nacionales.

No obstante, el papel del gobierno no solo se circunscribe al antes descrito, sino también al de ser un socio, facilitador y regulador; que identifique y habilite oportunidades en los contextos nacional e internacional, a través de alianzas bilaterales, multilaterales y esfuerzos de cooperación, al administrar adecuadamente las barreras y obstáculos para la participación en el mercado espacial tanto a nivel local como por fuera de él, comprometiéndose con el desarrollo e implementación de obligaciones y normativas internacionales, estableciendo un marco regulatorio que fomente el emprendimiento y la gestión del riesgo y, delimitando de

manera clara los alcances de las actividades espaciales civiles y militares de interés nacional.

5.1. Agencia Espacial de Colombia

Debido a la precaria situación en la cual quedó la CCE luego de cuatro de años de inactividad, hasta 2018, así como los constantes cambios de dirección que enfrentó, se hace necesario reformular toda la estrategia espacial nacional de manera que, además de dar cumplimiento a lo establecido en el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022, de diseñar una política nacional para el desarrollo de este sector, se genere desde su interior, la propuesta para la creación de una entidad tipo agencia espacial, que tenga como responsabilidades las de liderar las actividades espaciales nacionales y velar por los intereses del Estado colombiano en esta materia.

La anterior idea no es nueva, tampoco innovadora; más bien necesaria y urgente, si de posicionar a Colombia se refiere, en el escenario espacial y tecnológico internacional. Esta misma recomendación fue presentada como parte de un estudio técnico adelantado por parte de la CCE en 2011, proponiendo en su momento que una entidad de estas características se adscribiera a la Presidencia de la República, considerando que liderará la visión, política y estrategia de desarrollo nacional a través del uso del espacio, así como de un plan estratégico en el corto, mediano y largo plazo.

Suficientes argumentos se han dado en esta materia a través de los años, tanto por la CCE y la unánime decisión de sus miembros, así como por tangibles ejemplos de éxito alrededor del mundo, por medio de los cuales se puede identificar el fundamental rol que ha jugado una entidad del tipo agencia espacial para el desarrollo espacial de un país, al considerar beneficios directos como: el mismo desarrollo de capacidades e infraestructura espacial, avances tecnológicos, generación de conocimiento, cooperación internacional, posicionamiento del país, desarrollo productivo del sector, apoyo al desarrollo económico y logro de los intereses del país, y seguridad y defensa, entre muchos más, que, de acuerdo

al enfoque y necesidades de la nación operadora de la agencia, proponen logros y resultados adaptados a sus necesidades específicas.

En congruencia con lo anterior, la FAC, siendo uno de los miembros fundadores de la CCE, con representación en cada uno de los siete grupos de trabajo de la comisión y habiéndose desempeñado como Secretaría Ejecutiva por un periodo de dos años, mantuvo su persistencia en el tema espacial, incorporándolo a su plataforma estratégica por medio de la cual considera el desarrollo del poder espacial como parte de su misión, visión y del objetivo estratégico de fortalecer la capacidad operacional de la institución (FAC, 2019). De esta manera, como entidad autónoma y líder del poder espacial del sector defensa, la FAC ha consolidado y fortalecido sus capacidades espaciales con activos de terceros y propios, capital humano, conocimiento y doctrina, que podrían constituirse en el punto de partida para proyectar la creación de la futura agencia espacial del país.

5.2. Industria privada espacial

La identificación de nuevas tendencias y necesidades del sector espacial ofrece enormes oportunidades para los emprendimientos locales. Como se ha expuesto, existe un amplio espectro de áreas de desarrollo espacial para explotar; desde las clásicas aplicaciones enfocadas en beneficio de la educación, la medicina, la atención y prevención de desastres, la defensa, etc., hasta las más novedosas si se quiere, como la minería espacial, turismo espacial y la administración de basura espacial. No obstante, lo anterior también supone una capacidad resolutive para identificar el camino y recorrerlo.

En consecuencia, es necesario detectar las fortalezas existentes y a partir de allí apalancarse para desarrollar el ecosistema espacial nacional. La ventaja de este enfoque es que las bases, llámese infraestructura, conocimiento, experticia, habilidades, ya están presentes, reduciendo la necesidad de inversión y especialmente, el nivel de riesgo asociado al desarrollo de una nueva actividad económica. Ahora bien, aquí el éxito estriba en alcanzar la excelencia en una o varias tecnologías y no intentar

abarcas todo el espectro de posibilidades. Un caso de éxito de la importancia del enfoque en ciertas áreas es el que ha mostrado Canadá. La industria espacial canadiense, con el apoyo de la inversión gubernamental en el espacio, ha generado empleos para trabajadores altamente calificados y fuertes exportaciones basadas en la propiedad intelectual y tecnologías competitivas de clase mundial. Este éxito se extiende más allá de los fabricantes de activos espaciales e incluye empresas que explotan comercialmente los productos y servicios que generan estos activos (Douville, Faulkner y Kittridge, 2012).

En todo esto es fundamental que el gobierno establezca directrices sobre lo que se considera que debe ser el ideal espacial de la nación. Por ejemplo, algunos podrían estar pensando que Colombia debería concentrar sus esfuerzos en desarrollar una industria de fabricación de satélites; para otros, puede ser el establecimiento de un puerto espacial que aproveche la posición geográfica de Colombia, y aún más, otros podrían decir que en realidad Colombia solo requiere generar un valor agregado a la información derivada de los activos espaciales. Sea cual fuese la decisión, es necesario que cada uno de los actores, sin importar su naturaleza, se comprometa a trabajar en esa dirección el tiempo suficiente para poder ver los frutos del esfuerzo. Invertir en el espacio es un esfuerzo de largo aliento que demanda un compromiso país, independiente de voluntades políticas pasajeras; más bien, exige un compromiso a largo plazo que involucre políticas de promoción y fomento de la industria espacial, fundamentales en este contexto. En esta línea, vale la pena mencionar que, entre otros, los principales instrumentos de financiación y estímulo para la empresa privada empleados por los países de la OCDE incluyen subsidios, préstamos, contratos y exenciones tributarias (OCDE, 2016).

5.3. Cooperación internacional

La cooperación internacional es uno de los pilares del marco de Naciones Unidas en lo que respecta a las actividades espaciales. Las Resoluciones de la Asamblea General de las Naciones Unidas (AGNU)

en 1961, enfatizaron la importancia de fortalecer la cooperación internacional en los usos pacíficos del espacio ultraterrestre (Zhao, 2016). Dicha cooperación es uno de los elementos claves de la estrategia de la Agencia Espacial Europea (Hufenbach, Reiter y Sourgens, 2014). En Latinoamérica, Brasil es un ejemplo claro de cómo se puede avanzar para explotar adecuadamente el camino de la cooperación internacional. Actualmente, este país no es dependiente de Estados Unidos con relación a asistencia tecnológica espacial, y se encuentra involucrado con las agencias espaciales europea y rusa; así mismo, su relación con China ha florecido satisfactoriamente (Lele y Arévalo, 2013). Esto demuestra que no importa el nivel de desarrollo alcanzado; la explotación y exploración del espacio son un esfuerzo global. Los beneficios de la cooperación internacional se pueden evidenciar en forma de eficiencia monetaria, sostenibilidad programática y política y estabilidad de la fuerza laboral, siempre y cuando se mantenga un enfoque de beneficio mutuo (Broniatowski, Faith y Sabathier, 2006).

Además, los programas modernos de exploración espacial bajo el esquema de cooperación internacional incorporan, entre otros: la construcción de nuevos hardware, software, componentes, productos y servicios, control de activos, procesamiento de datos e imágenes, almacenamiento, lanzamiento, e infraestructura de soporte, como un objetivo común que redundo en beneficios mutuos, disminución de esfuerzos, integración de capacidades y reducción de inversión. Dicha estrategia puede ser adelantada tanto a nivel gubernamental, como de la industria, y exige una planificación detallada y estandarización de procesos y procedimientos de manera que se garantice la interoperabilidad y redundancia.

6. Conclusiones

Las actividades espaciales han provisto soluciones tangibles que aportan directamente a mejorar el bienestar de la humanidad, consolidándose al mismo tiempo como una fuente de progreso que se integra a

la estrategia de desarrollo de los países que las realizan. Por esta razón, es cada vez mayor la cantidad de países que incorporan las tecnologías espaciales enfocadas en un amplio espectro de usos, adecuándolas según sus necesidades, en beneficio de los intereses nacionales. En este sentido, se podría asociar el nivel de desarrollo de un país con el acceso y uso que realiza del espacio exterior.

La experiencia de las potencias espaciales emergentes indica que, a medida que la historia del siglo XXI continúa desarrollándose, más actores pueden llegar a ver los vuelos espaciales como una herramienta vital en la mejora de la seguridad multidimensional. Así, Colombia tiene varias oportunidades y tareas por cumplir en el futuro cercano con relación al desarrollo espacial; la primera, y que constituye un buen comienzo, fue la inclusión en el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022, de una estrategia que busca implementar una política nacional para impulsar el sector espacial a cargo de la CCE, estrategia que se tendrá la oportunidad de evaluar con el paso del tiempo y que podría constituirse como el punto de partida para el desarrollo del sector espacial colombiano.

La segunda consideración contempla la necesidad de constituir una agencia espacial dentro de la estructura del Estado Colombiano, con autonomía administrativa, capital humano y recursos; empoderada para velar por los intereses espaciales de la nación en escenarios nacionales e internacionales y proyectando la constitución articulada de infraestructura y capacidades espaciales del país, dando respuesta a los retos que imponen los rápidos avances científicos, la demanda y acceso a soluciones tecnológicas, la exploración y explotación espacial y, el cambio climático, entre otros factores.

El tercer aspecto considera la mandataria integración de capacidades de la academia, la empresa privada y el gobierno, sin lo cual el sector espacial se desarrollaría desarticuladamente, afrontando una pérdida continuada de esfuerzos. En este sentido, la iniciativa de carácter integrador ha estado generalmente a cargo de los gobiernos, con el objetivo de posicionar un sector espacial maduro, productivo y autónomo, por medio de la generación de aplicaciones, productos y servicios espaciales, a través de una industria robusta desarrollada

para satisfacer las necesidades domésticas de tecnología espacial, y con capacidad para competir en el mercado espacial internacional.

La cuarta consideración está relacionada con la cooperación internacional, fundamental en el desarrollo del sector espacial, catalogada como una actividad crítica a ejecutar por potencias espaciales como China, Estados Unidos, Europa y Rusia, constituyéndose la Estación Espacial Internacional como el mejor ejemplo de integración de esfuerzos de la humanidad con el fin de iniciar la conquista del espacio. Por lo anterior, Colombia, dadas las potencialidades de su ubicación geográfica, estabilidad económica y competencias intelectuales, tiene un reconocimiento internacional, al cual se le puede dar buen uso en cuanto a temas espaciales se refiere. Ante este escenario, se requiere adelantar una estrategia intensa que permita establecer canales de cooperación internacional de manera que, profesionales, empresas, sectores productivos y en general toda la maquinaria de desarrollo humano, económico, tecnológico y social del país tenga acceso y se integre a programas y proyectos internacionales que potencien las capacidades espaciales de la nación.

La última consideración pretende que la experiencia y el terreno ganado por la FAC, en cuanto al liderazgo del poder espacial del sector defensa, capacidades, conocimiento y experticia operativa espacial a través de su programa satelital Facsat, sirva de referencia y como punto de partida para consolidar el desarrollo de la capacidad espacial nacional, la organización, los proyectos, el marco de gobernanza y la academia nacional. De esta manera, se ratificaría para el caso colombiano, el concepto globalmente aceptado de que las tecnologías espaciales satisfacen múltiples dominios y sectores productivos, integrando así al sector defensa con la totalidad del sector productivo del país.

Dicho lo anterior, el espacio se constituye en una oportunidad infinita para Colombia, y para hacerla posible, se propone que una futura agencia espacial nacional lidere un programa espacial colombiano, que integre temas comunes y vitales para el desarrollo de una estrategia espacial nacional, incluyendo: la necesidad de garantizar la capacidad de acceso, uso, exploración y explotación del espacio, a través de la

satisfacción de los imperativos astropolíticos de Colombia; la generación de normatividad y estímulos que promuevan la industria espacial nacional; la priorización y apoyo a proyectos y emprendimientos espaciales; el desarrollo comercial de las tecnologías satelitales y fomento de aplicaciones basadas en tecnología satelital; el estímulo para la creación de áreas de conocimiento espacial en aspectos operacionales, técnicos, de gobernanza y de administración de recursos; la formación de astroestrategas; el apoyo a la investigación científica; el desarrollo de la cooperación internacional; la socialización de los beneficios de las tecnologías espaciales y, el estímulo a las futuras generaciones para educarse en ciencias espaciales. De esta manera, y dada la importancia que el espacio representa para el desarrollo socioeconómico del país, se consolidaría un entorno ideal para el nacimiento de actores nacionales que deseen acceder, explotar y explorar el espacio de manera pacífica, en beneficio de los intereses nacionales.

En conclusión, el desarrollo espacial no da espera, se tiene la responsabilidad de cimentar el futuro de las nuevas generaciones, y para esto, es fundamental tomar rápidas decisiones como país, que permitirán materializar las infinitas oportunidades que el espacio exterior está en capacidad de brindarle a Colombia.

AUTORES

Carlos Enrique Álvarez Calderón

Politólogo con Maestrías en Relaciones Internacionales de la Universidad Javeriana y Coaching Ontológico Empresarial en la Universidad San Sebastián de Santiago de Chile (Chile). Becario Center for Hemispheric Defense Studies “William Perry” en Washington. Profesor Investigador, Jefe de línea de Investigación y Editor de la Revista “Ensayos sobre Defensa y Seguridad” de la Maestría en Seguridad y Defensa Nacionales de la Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”. Docente de la Escuela de Posgrados de la Fuerza Aérea Colombiana “Capitán José Edmundo Sandoval”, Escuela de Inteligencia Aérea de la Fuerza Aérea Colombiana, Escuela Militar de Cadetes “General José María Córdova” y Universidad Militar Nueva Granada. Asesor del Comando de Apoyo de Combate de Inteligencia Militar (CAIMI) del Ejército de Colombia y de la Maestría en Ciencias Militares Aeronáuticas de la Escuela de Posgrados de la Fuerza Aérea Colombiana. Ha editado y publicado varios libros, capítulos y artículos sobre temas de Estrategia, Seguridad y Defensa, Geopolítica e Inteligencia Estratégica.

CR. Carlos Giovanni Corredor Gutiérrez

Coronel de la Fuerza Aérea Colombiana. Ingeniero Electrónico de la Universidad Pontificia Bolivariana, Especialista en Gerencia de Proyectos de Telecomunicaciones del Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario, Magister en Gerencia de Ingeniería de la Universidad de la Sabana, Candidato a Magister de Seguridad y Defensa Nacionales en la Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”. Es miembro de la Academia Internacional de Astronáutica. Actualmente se desempeña como Asesor para Asuntos Espaciales de la Vicepresidencia de la República de Colombia, y entre sus funciones se encuentra la coordinación inter-institucional de los miembros de la Comisión Colombiana del Espacio con el fin de recomendar al Gobierno Nacional mecanismos para la implementación y ejecución de la Política Espacial Nacional.

MY. Nora Patricia Gutiérrez Rodríguez

Mayor de la Fuerza Aérea Colombiana. Historiadora con Maestría en Historia de la Universidad del Valle. Directora, investigadora y docente de la Maestría en Ciencias Militares Aeronáuticas de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana “Capitán José Edmundo Sandoval”. Investigadora del Grupo Ciencias Militares Aeronáuticas de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”. Miembro de la Academia Colombiana de Historia Militar y de la Academia Colombiana de Historia Aérea. Miembro de la red Interdisciplinary Social Sciences Knowledge Community. Actualmente es investigadora principal del proyecto “Fuerza Aérea Colombiana: De la evolución de las capacidades a la independencia estratégica”.

CR. (RA) Álvaro Molano Valbuena

Coronel de la Reserva Activa de la Fuerza Aérea Colombiana. Ingeniero Electrónico, especializado en Ingeniería de Telecomunicaciones con formación en Administración de Empresas Aeroespaciales. En el campo espacial se destaca la formación recibida en comunicaciones satelitales en la Pontificia Universidad Javeriana, en sistemas operativos en tiempo real durante su asignación a la misión Libertad I de la Universi-

dad Sergio Arboleda, en Administración Aeroespacial en la Escuela de Negocios de Toulouse (Francia), en Gestión de la Cadena de Suministros en EADS Astrium Satellites, en el Desarrollo de Programas Satelitales en el Instituto Coreano de Investigación Aeroespacial (KARI).

MY. Juan Camilo Núñez

Mayor de la Fuerza Aérea Colombiana. Piloto Militar y Administrador Aeronáutico de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”. Especialización en Gerencia de la Seguridad Aérea, Instructor Académico y de Vuelo con 4700 horas, Investigador de Accidentes Aéreos en la Fuerza Aérea Colombiana y de la Unidad Administrativa Especial Aeronáutica Civil. Instructor Invitado en el Western Hemisphere Institute for Security Cooperation del Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Candidato a Magíster en Ciencias Militares Aeronáuticas (MACMA) de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana “Capitán José Edmundo Sandoval”.

TC. Guillermo Alberto Poveda Zamora

Teniente Coronel de la Fuerza Aérea Colombiana. Administrador Aeronáutico de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”, Ingeniero de Telecomunicaciones de la Universidad Militar Nueva Granada, Becario y Magíster en Ciencias Militares y Aeronáuticas de la Escuela de Posgrados de la Fuerza Aérea Colombiana, Magíster en Ingeniería Aeroespacial de la Universidad del Valle. Ha trabajado en proyectos de investigación y desarrollo de alto impacto, como el FACSAT-1, puesto en órbita en el 2018. También ha formado parte de reconocidos grupos de investigación, como el TIGUM de la Universidad Militar Nueva Granada y el Grupo de Investigación Ciencia y Poder Aéreo CIPAER de la Escuela de Posgrado de la de la Fuerza Aérea Colombiana. Actualmente se desempeña como Jefe de la Oficina de Asuntos Espaciales de la Fuerza Aérea Colombiana, con la responsabilidad principal de dirigir y coordinar las actividades, programas y políticas del desarrollo espacial institucional y sectorial, para promover el desarrollo científico y tecnológico espacial del país.

CR. Robert Santiago Quiroga Cruz

Coronel de la Fuerza Aérea Colombiana. Piloto y Profesional en Administración Aeronáutica de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”. MBA en Negocios Aeroespaciales de Toulouse Business School. Maestría en Seguridad y Defensa Nacionales en la Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”. Programa de Educación Militar Profesional Air Command and Staff College de la Universidad del Aire de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. Programa de Desarrollo Directivo de Inalde Business School. Fue Jefe de la Oficina de Asuntos Espaciales de la Fuerza Aerea Colombiana y ha sido docente investigador en temas de tecnología y poder espacial. En la actualidad se desempeña como Subdirector de la Escuela de Posgrados de la Fuerza Aérea Colombiana “Capitán José Edmundo Sandoval”.

CT. Yuber Rico Venegas

Capitán de la Fuerza Aérea Colombiana. Licenciado en Educación Física de la Universidad Pedagógica Nacional. Director de la Maestría en Dirección y Gestión de la Seguridad Integral en la Escuela de Postgrados “Capitán José Edmundo Sandoval” de la Fuerza Aérea Colombiana. Candidato a Magíster en Ciencias Militares Aeronáuticas (MACMA) de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana “Capitán José Edmundo Sandoval”.

BG. Carlos Fernando Silva Rueda

Brigadier General de la Fuerza Aérea Colombiana. Piloto Militar con más de 8.000 horas de vuelo. Administrador Aeronáutico de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”, con Maestría en Seguridad y Defensa de la Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto” y Maestría en Estudios Estratégicos del Colegio de Guerra en la Universidad del Aire de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. Fue subdirector de la Aeronáutica Civil, Comandante del Comando Aéreo de Combate No. 5 y director de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”. Actualmente se desempeña como jefe de la Casa Militar de la Presidencia de la República de Colombia.

REFERENCIAS

- Administración Nacional Oceánica y Atmosférica -NOAA (2018). WMO/UNEP *Scientific Assessments of Ozone Depletion*. Obtenido de <https://bit.ly/2klxRaY>
- Aerospace Education Foundation. (2001). *Effects-Based Operations: Change in the Nature of Warfare*. Obtenido de <https://secure.afa.org/Mitchell/reports/0901ebo.pdf>
- Aerospace Growth Partnership -AGP (2013). *Lifting Off – Implementing the Strategic Vision for UK Aerospace*. Obtenido de <https://bit.ly/2L8QZDJ>
- Alvarado, M. (2013). *Métodos interactivos aplicados a la Ecuación de Kepler*. Tesis doctoral (Matemáticas). Logroño-España: Universidad de La Rioja. Obtenido de [https:// bit.ly/2lOsuBs](https://bit.ly/2lOsuBs)
- Álvarez, C., Corredor, C. y Vanegas, O. (2018). Pensamiento y cultura estratégica en seguridad y defensa: bases para la construcción de una gran estrategia del Estado. En Álvarez, C. y Fernández, A. (Eds). *Ha-cia una gran estrategia en Colombia: Construcción de Política Pública en Seguridad y Defensa*. Bogotá, D.C.: Esmic. pp. 13-80.
- Alvarez, E. A. (29 de abril de 1994). *El Tiempo*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-108920>

- Amadeo, K. (2019). *NASA Budget: Current Funding, History, Economic Impact*. Obtenido de <https://bit.ly/2z3Xt18>
- Angulo, G. (2016). Cooperación internacional y emigración calificada: diáspora científica colombiana. *Revista Internacional de Cooperación y Desarrollo*, 3(1), 99-114.
- Aoki, S. y Kinoshita, H. (1982). The New Definition of Universal Time. *Astronomy and Astrophysics*, 105(2), 359-361.
- Arango, M. (4 de septiembre de 2019). El futuro luce incierto para los Vive Digital. *eltiempo.com* Obtenido de <https://bit.ly/2Cmzpal>
- Arenas Ceballos, J. (junio de 2011). *Un necesario marco jurídico para las actividades espaciales en Colombia*. Bogotá DC, Cundinamarca, Colombia. Obtenido de file:///C:/Users/USER/Downloads/art%-C3%ADculo_redalyc_100222636004.pdf
- Asamblea Nacional Constituyente (1991). *Constitución Política de Colombia*. Obtenido de <https://bit.ly/2kiD0jX>
- Baruh, H. (1999). *Analytical Dynamics*. Singapore: McGraw Hill.
- Battin, R. (1987). *An Introduction to the Mathematics and Methods of Astrodynamics*. New York: AIAA Education.
- Becerra, J. (2014). Colombias space policy: An analysis of six years of progress and challenges. *Acta Astronáutica*, 100(1), 94-100.
- Bodanis, D. (2001). *Biography of the World's Most Famous Equation*. New York: Berkley Books.
- Broniatowski, D., Faith, G. y Sabathier, V. (2006). The Case for Managed International Cooperation in Space Exploration. Obtenido de <https://bit.ly/2AIJv4o>
- Cancillería de Colombia. (s.f.). Cancillería de Colombia. *Comisión de Naciones Unidas para el uso pacífico del Espacio Ultraterrestre (CO-POUS)*. Obtenido de <https://www.cancilleria.gov.co/comision-naciones-unidas-uso-pacifico-del-espacio-ultraterrestre-copous>
- Capcom Space (2010). *Espace chinois*. Les installations de lancement. Obtenido de <https://bit.ly/2kngmqQ>
- Carriazo, F. (2018). Los costos de las lluvias torrenciales: el caso de Mo-coa. Obtenido de <https://bit.ly/337xCBb>

- Center for Strategic and International Studies. (agosto de 2009). Center for Strategic and International Studies. *Toward the Heavens, Latin America's Emerging Space Programs*. Washington DC. Obtenido de *Toward the Heavens, Latin America's Emerging Space Programs*: https://csis-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/legacy_files/files/publication/090730_Mendelson_TowardHeavens_Web.pdf
- Central Intelligence Agency (2016). *The World Factbook*. Obtenido de <https://bit.ly/1bgDiW9>
- Centro de Investigación de las Telecomunicaciones -CINTEL (2009). Generalidades del Proyecto SATCOL. *Revista Colombiana de Telecomunicaciones*, 16(52), 52-55.
- China Daily Mail (26 de diciembre de 2014). *A new Chinese anti-satellite test?* Obtenido de <https://bit.ly/2mfDW9n>
- Clarke, A. (1984). *Ascent to Orbit: a Scientific Autobiography*. New York: John Wiley & Sons.
- Cohen, B. (1987). *The 1986 Adjustments of the Fundamental Physical Constants*. Maryland: Rockwell International Science Center.
- Colombiann (2013). *El primer satélite de Sequoia Space*, el peruano UAPSAT, ya está en el espacio. Obtenido de <https://bit.ly/1dCRfja>
- Comisión Colombiana del Espacio. (2013). *Comisión Colombiana del Espacio*. Obtenido de https://www.cce.gov.co/sites/default/files/adjutnos_basic_page/Documento_Recomendaciones_Comite_Tecnico.pdf
- Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos. (junio de 2013). *Informe de la Subcomisión de Asuntos Jurídicos sobre su 52° período de sesiones*, celebrado del 8 al 19 de abril de 2013 en Viena. Obtenido de http://www.unoosa.org/pdf/reports/ac105/AC105_1045S.pdf
- Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos. (junio de 2012). *Informe de la Subcomisión de Asuntos Jurídicos sobre su 51° período de sesiones*, celebrado del 19 al 30 de marzo de 2012 en Viena. Obtenido de http://www.unoosa.org/pdf/reports/ac105/AC105_1003S.pdf

- Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos. (junio de 2013). *Informe de la Subcomisión de Asuntos Jurídicos sobre su 52º período de sesiones, celebrado del 8 al 19 de abril de 2013 en Viena*. Obtenido de http://www.unoosa.org/pdf/reports/ac105/AC105_1045S.pdf
- Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. (junio de 2017). *Space Science for global development*. Obtenido de http://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2017/aac_1052017crp/aac_1052017crp_25_0_html/AC105_2017_CRP25E.pdf
- Consejo Nacional de Política Económica y Social (24 de marzo de 1977). *CONPES 1421*. Proyecto de un Satélite Colombiano para Comunicaciones Domésticas. Obtenido de <https://bit.ly/2lRg5Ni>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social (25 de marzo de 2009). *CONPES 3579*. Lineamientos para implementar el Proyecto Satelital de Comunicaciones de Colombia. Obtenido de <https://bit.ly/2m79le2>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social (25 de septiembre de 2009). *CONPES 3613*. Complemento al CONPES 3579 del 25 de marzo de 2009: lineamientos para implementar el Proyecto Satelital de Comunicaciones de Colombia. Obtenido de <https://bit.ly/2lT-buK8>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social (6 de agosto de 2010). *CONPES 3683*. Lineamientos para la formulación del Programa Nacional de Observación de la Tierra que incluya el diseño de un Programa Satelital Colombiano. Obtenido de <https://bit.ly/2kcUIoY>
- Constitución Política de Colombia. (4 de Julio de 1991). *Sistema Único de Información Normativa*. Obtenido de <http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Constitucion/1687988>
- Correa, M. (2017). Estado actual del proceso de territorialización del espacio ultraterrestre por parte de Colombia y recomendaciones para su consolidación. *Perspectiva Geográfica*, 22(1), 147-160.
- Corredor, C. G. (2019). Colombia en el Espacio con FACSAT-1. *Revista Aeronáutica*, 8-13.

- Curtis, H. (2005). *Orbital Mechanics for Engineering Students*. Oxford: Elsevier.
- Davenport, C. (2018). *The space barons: Elon Musk, Jeff Bezos, and the quest to colonize the cosmos*. New York: PublicAffairs.
- De Orús, J., Català, M. y Núñez, J. (2007). *Astronomía esférica y mecánica celeste*. Universidad de Barcelona: Publicacions i Edicions. Obtenido de <https://bit.ly/2kzCZIK>
- Departamento Nacional de Planeación -DPN (2010). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014: Prosperidad para todos*. Obtenido de <https://bit.ly/1USpw9n>
- Departamento Nacional de Planeación -DPN (2014). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018: Todos por un nuevo país*. Obtenido de <https://bit.ly/2dTUHOD>
- Departamento Nacional de Planeación -DPN-. (2019). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022*. Obtenido de <https://bit.ly/2FmnCJO>
- Departamento Nacional de Planeación (2018). *Más conectividad a internet podrá aumentar el PIB de Colombia hasta en 1,6%*. Obtenido de <https://bit.ly/2OkOPPR>
- Departamento Nacional de Planeación. (15 de marzo de 2010). *Documento CONPES 3651*. Modificación al Documento CONPES 3579 del 25 de marzo de 2009 Lineamientos para Implementar el Proyecto Satelital de Bogotá. Bogotá, Colombia.
- Departamento Nacional de Planeación. (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022: Pacto por Colombia*. Bogotá DC, Cundinamarca, Colombia.
- Departamento Nacional de Planeación. (24 de marzo de 1977). *Proyecto de un Satélite Colombiano para Comunicaciones Domésticas*. Bogotá, Cundinamarca.
- Departamento Nacional de Planeación. (25 de marzo de 2009). *Documento CONPES 3579*. Lineamientos para Implementar el Proyecto Satelital de Comunicaciones de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Departamento Nacional de Planeación. (25 de septiembre de 2009). *Documento CONPES 3613*. Complemento al CONPES 3579 del 25 de

- marzo de 2009: Lineamientos para Implementar el Proyecto Satelital de Comunicaciones de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Departamento Nacional de Planeación. (6 de agosto de 2010). *Documento CONPES 3683*. Lineamientos para la Formulación del Programa Nacional de Observación de la Tierra que incluya el Diseño de un Programa Satelital Colombiano., Colombia.
- Depersio, G. (2019). *Why did oil prices drop so much in 2014?* Obtenido de <https://bit.ly/2GxWtTl>
- Díaz, V. (12 de julio de 2016). ¿Qué pasó con el satélite Pegaso? *El Comercio*. Obtenido de <https://bit.ly/2lNXbXs>
- Dolman, E. (1999). *Geostrategy in the Space Age: An Astropolitical Analysis*. *The Journal of Strategic Studies*, 22(2-3), 83-106.
- Douville, D., Faulkner, M. y Kittridge, A. (2012). *A Report on the Development of a National Space Infrastructure to support the Global Competitiveness of the Canadian Space Industry*. Ottawa: Lansdowne Technologies Inc. Obtenido de <https://bit.ly/2LNYDU4>
- Duque, J., y Griffin, A. (2009). Wordpress. Obtenido de https://bogotadeclaration.files.wordpress.com/2011/08/bogotadeclaration2011_lowres.pdf
- École Polytechnique Fédérale de Lausanne -EPFL (2018). *Space Mission Design and Operations*. Obtenido de <https://bit.ly/2kNviyt>
- El País. (1 de septiembre de 2010). *El Gobierno declara desierta la licitación para el primer satélite colombiano*. El País. Obtenido de <https://www.elpais.com.co/colombia/el-gobierno-declara-desierta-la-licitacion-para-el-primer-satelite-no.html>
- El Tiempo. (2010). Colombia no comprará satélite. *El Tiempo*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/politica/gobierno/colombia-no-comprara-satelite/14539258>
- Eltiempo.com (01 de septiembre de 2010). Declarada desierta la licitación del Satélite Colombiano (Satcol). *El tiempo*. Obtenido de <https://bit.ly/2lLeKrh>
- Eltiempo.com (14 de septiembre de 2014). Frenan compra de satélite que vale US\$250 millones. *El tiempo*. Obtenido de <https://bit.ly/2kHfm0E>

- Erdner, M. (2009). *Smaller Satellites Operations near Geostationary Orbit*. New York: Nova Science Publishers, Inc.
- Euroconsult (2016). *The satellite value chain satellite value chain: snapshot 2015 key trends and indicators on supply & demand of the world commercial satellite industry an extract*. Obtenido de <https://bit.ly/2tUcFez>
- Federal Aviation Administration (2014). *The Annual Compendium of Commercial Space transportation: 2013*. Obtenido de <https://bit.ly/2maqiEq>
- Federal Aviation Administration (2015). *The Annual Compendium of Commercial Space Transportation: 2014*. Obtenido de <https://bit.ly/2knjEKI>
- Federal Aviation Administration (2016). *The Annual Compendium of Commercial Space Transportation: 2016*. Obtenido de <https://bit.ly/2kmBQEE>
- Federal Aviation Administration (2017). *The Annual Compendium of Commercial Space Transportation: 2017*. Obtenido de <https://bit.ly/2IPVGYO>
- Federal Aviation Administration (2018). *The Annual Compendium of Commercial Space Transportation: 2018*. Obtenido de <https://bit.ly/2lRoKz4>
- Federal News Network Staff (21 de mayo de 2014). *Lindenmoyer taps private industry to fulfill NASA's space transportation needs*. Obtenido de <https://bit.ly/2miEGe1>
- Franceinfo (7 de enero de 2014). *Arianespace souhaite battre son record de lancement en 2014*. Obtenido de <https://bit.ly/2kgaJdO>
- Fuerza Aérea Colombiana -FAC (2019). *Plan Estratégico Institucional FAC 2011-2030*. Bogotá, D.C.: Exprecard's. Obtenido de <https://bit.ly/2lwHAeQ>
- Fuerza Aérea Colombiana. (10 de agosto de 2017). *Disposición 030 de 2017*. Bogotá, Colombia.
- Fuerza Aérea Colombiana. (13 de septiembre de 2019). *Resolución 725 de 2019. Por la cual se dispone la creación, conformación y funcionamiento del Comité de Asuntos Espaciales de la Fuerza Aérea Colombiana*. Bogotá, Colombia.

- Fuerza Aérea Colombiana. (15 de agosto de 2018). *Resolución 633 de 2018*. Por la cual se modifica la Resolución No. 126 de 2007. Bogotá, Colombia.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2011). *Plan Estratégico Institucional 2011-2030*. 21. Bogotá, Colombia.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2011). *Plan Estratégico Institucional 2011-2030*. 48. Bogotá, Colombia.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2013). *Manual de Doctrina Básica Aérea y Espacial MADBA*. Cuarta. Bogotá, Colombia.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2013). *Manual de Doctrina Básica Aérea y Espacial MADBA*. Cuarta, 17. Bogotá, Colombia.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2013). *Manual de Doctrina Básica Aérea y Espacial MADBA*. Cuarta, 86. Bogotá, Colombia.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2019). *Misión y Visión*. Bogotá, Colombia. Obtenido de <https://www.fac.mil.co/Misi%C3%B3n-y-Visi%C3%B3n-Fuerza-A%C3%A9rea-Colombiana>.
- Fuerza Aérea Colombiana. (4 de mayo de 2016). *Resolución 279 de 2016*. Por la cual se modifica la Resolución No. 126 de 2007. Bogotá, Colombia.
- Fuerza Aérea Colombiana. (4 de septiembre de 2013). *Disposición 603 de 2013*. Bogotá, Colombia.
- Fuerza Aérea Colombiana. (7 de marzo de 2007). *Resolución 126 de 2007*. Por la cual se crea el Comité de Asuntos Espaciales de la Fuerza Aérea Colombiana. Bogotá, Colombia.
- Futron Corporation. (2002). *Space Transportation Costs: Trends in Price Per Pound to Orbit 1990-2000*. Maryland, Wisconsin: Fultron Corporation.
- García, Á. (2010). *La forma de la Tierra*. Obtenido de <https://bit.ly/2kNXdOX>
- Godínez, A. (2012). *La defensa contra misiles balísticos*. Posible participación de las fragatas F-100. Madrid: Instituto Español de Estudios Estratégicos.
- Goldstein, C. (1980). *Classical Mechanics*. 3ª ed. New York: Addison Wesley.

- Gómez, A. (2010). *Taller de Astronomía*. Universidad Complutense de Madrid. Obtenido de <https://bit.ly/2lQTaS3>
- Harding, R. (2013). *Space Policy in Developing Countries: The Search for Security and Development on the Final Frontier*. New York: Routledge.
- Harding, R. (2013). *Space Policy in Developing Countries: The Search for Security and Development on the Final Frontier*. New York: Routledge.
- Harrison, G. (2012). The Commercial Space Industry And Launch Market. *Journal of Magnetohydrodynamics and Plasma Research*, 17(3), 183-206.
- Hoya, J. (016). *Efemérides astronómicas*. Obtenido de <https://bit.ly/2kAWwZl>
- Hufenbach, B., Reiter, T. y Sourgens, E. (2014). ESA strategic planning for space exploration. *Space Policy*, 30(3), 174-177.
- Indian Space Reserch Organisation -ISRO (2016). *ISRO To Build Third Launch Pad At Sriharikota*. Obtenido de <https://bit.ly/2miyfrm>
- Infoespacial. (29 de noviembre de 2018). *Colombia lanza hoy su FacSat-1*. Obtenido de <http://www.infoespacial.com/latam/2018/11/29/noticia-colombia-lanza-facsat1.html>
- iNNpuls Colombia (2017). *Las mejores startups colombianas para invertir*. Obtenido de <https://bit.ly/2lRYeWa>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1 de marzo de 2007). *Análisis Geográficos No.35. Acuerdo No. 4 Plan de Acción de la Comisión Colombiana del Espacio*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (23 de Julio de 2008). *Análisis Geográficos No. 43. Acuerdo N° 10. Ingreso y Mecanismos de Participación de Nuevos Miembros*. Bogotá DC, Cundinamarca, Colombia.
- Instituto Geográfico Nacional de España (2011). *Geoportal Astronomía*. Obtenido de <https://bit.ly/1r07lLa>
- International Space Exploration Coordination Group. (septiembre de 2013). *Benefits Stemming from Space Exploration*. Obtenido de <https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/Benefits-Stemming-from-Space-Exploration-2013-TAGGED.pdf>.

- Issler, G. (2000). *The integration of space and information operations*. Alabama: Maxwell Air Force Base, Air Command and State College, Air University. Obtenido de <https://bit.ly/2kHbOvt>
- Japan Aerospace Agency -JAXA (2015). *Tanegashima Space Center*. Obtenido de <https://bit.ly/2lX0o6X>
- Jin, G., Jian, Q., Quiao, K. y Guo, L. (2012). On simulation of precise orbit determination of HY-2 with centimeter precision based on satellite-borne GPS technique. *Applied Geophysics*, 9(1), 95-107.
- Joint Chiefs of Staff (CJCS) of the Armed Forces of the United States. (10 de abril de 2018). Joint Publication 3-14 *Space Operations*.
- Kaku, M. (2018). *The future of humanity: terraforming Mars, interstellar travel, immortality, and our destiny beyond Earth*. New York: Doubleday, a division of Penguin Random House LLC.
- Lele, A. (2017). *50 Years of the Outer Space Treaty: Tracing the Journey*. Pentagon Press.
- Lele, A. y Arévalo, C. (2013). Prospects and opportunities for space collaboration with Latin America : What can India contribute and gain? *Space Policy*, 29(3), 190-196.
- Lin, L. y Yan, W. (2006). An Analytical Method For Satellite Orbit Prediction. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 30(1), 68-74.
- Marín, D. (2019). *Lanzamientos orbitales en 2018*. Obtenido de <https://bit.ly/2kxhazh>
- Martínez, R. (2009). *Tipos de órbitas*. Constelaciones de satélites. Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de <https://bit.ly/2kfUNFP>
- Martínez, R. y Calvo, M. (2010). *Comunicaciones por satélite*. Madrid: Universidad Pública de Madrid.
- MathLab Corporation (2014). *Mathlab Central*. Obtenido de <https://bit.ly/2kJcalj>
- Montenbruck, O y Gill, E. (2012). *Satellite Orbits: Models, Methods and Applications*. 4ª ed. New York: Springer.
- McKie, R. (5 de octubre de 2008). Nasa studies failures as guide to success. *The Guardian*. Obtenido de <https://bit.ly/2kA9Gpt>
- Metzger, P. T. (2016). P.T. Metzger, *Space development and space science together, an historic opportunity*, *Space*. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.spacepol.2016.08.004>

- Ministerio de Defensa Nacional. (6 de diciembre de 2018). *Decreto 2258 de 2018*. Por medio del cual se establecen normas y procedimientos para el Registro de Objetos Lanzados al Espacio Ultraterrestre. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Defensa Nacional. (enero de 2019). *Política de Defensa y Seguridad PDS*. Política de Defensa y Seguridad PDS para la legalidad, el emprendimiento y la equidad. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Relaciones Exteriores (18 de julio de 2006). *Decreto 2442*. Bogotá, Presidencia de la República de Colombia. Obtenido de <https://bit.ly/2kICJqQ>
- Monastersky, R. (2009). Shooting for the Moon. *Nature*, 460, 314–315.
- Mueller, I. (1969). *Spherical and Practical Astronomy as applied to Geodesy*. New York: Ungar Publication CO.
- Munsami, V. (2014). South Africa's national space policy: The dawn of a new space era. *Space Policy*, 30(3), 115-120.
- N2YO.com (2019). *Satellite details*. Obtenido de <https://bit.ly/2lUEsK0>
- National Aeronautics and Space Administration -NASA (2014). *Commercial Orbital Transportation Services. A New Era in Spaceflight*. Obtenido de <https://bit.ly/2kNfI5V>
- National Committee of the International Union of Geodesy and Geophysics -NCIGG (1971). IUGG General Assemblies. Moscú. Obtenido de <https://bit.ly/2kKCICK>
- National Research Council (2009). *America's future in space: Aligning the civil space program with national needs*. Washington, D.C.: National Academies Press.
- Neff, R. (1995). *Physics, Principles and Problems*. New York: Glencoe.
- Observatorio de Ciencia y Tecnología (2016). Indicadores de ciencia y tecnología para Colombia. 2016. Bogotá, D.C.: *Ántropos*. Obtenido de <https://bit.ly/2Vkw6Je>
- Organización de las Naciones Unidas -ONU (2017). *COPUOS 60th session*. Report of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. Obtenido de <https://bit.ly/2lRnBI0>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos -OCDE (2016). *Space and Innovation*. París: OCDE Publishing. Obtenido de <https://bit.ly/2u0OcCx>

- Ostrander, N. (1970). *Mapping By Computer Graphics Satellite Antenna Coverage*. Santa Mónica: National Aeronautics and Space Administration -NASA-.
- Özalp, T. (2009). Space as a strategic vision for Turkey and its people. *Space Policy*, 25(4), 224–235.
- Paikowsky, D., Reichard, A., Baram, G. y Ben, I. (2016). *Space 2015: A Year In Review*. Tel Avid University. Obtenido de <https://bit.ly/2O-jz1jH>
- Pérez, R. (02 de junio de 2019). Chile comprará nuevo satélite que reemplace al Fasat-Charlie. *La Nación*. Obtenido de <https://bit.ly/2kg-m4KW>
- PijamSurf (2011). *Equinoccio de primavera 2011: el equilibrio de la luz*. Obtenido de <https://bit.ly/2kMqVDZ>
- Pinilla, G. (06 de febrero de 2013). *Fuerza Aérea Colombiana*. Obtenido de [https:// bit.ly/2lPE8w1](https://bit.ly/2lPE8w1)
- Piskunov, N. (2009). *Cálculo diferencial e integral*. Madrid: Limusa.
- Poveda, G. (2016). *Propuesta de órbita geoestacionaria para el satélite artificial FACSAT01 simulación*. TFM (Ingeniería Aeroespacial) Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Poveda, G., Rodríguez, A., Vallejo, C., y Ocampo, S. (2018). *Misiles balísticos de corto y mediano alcance*. Bogotá, D.C.: Escuela Superior de Guerra.
- Presidencia de la República (02 de mayo de 2016). *Decreto 724*. Por el cual se modifica la estructura del Departamento Administrativo de la Presidencia de la República. Obtenido de <https://bit.ly/346MBg1>
- Presidencia de la República. (15 de noviembre de 2013). *Decreto 2516 de 2013*. Por medio del cual se crea un Programa Presidencial. Bogotá, Colombia.
- Presidencia de la República. (17 de marzo de 2015). *Decreto 0470 de 2015*. Por medio del cual se modifica y adiciona el Decreto 1649 de 2014. Bogotá, Colombia.
- Presidencia de la República. (18 de Julio de 2006). *Decreto 2442 de 2006*. Creación de la Comisión Colombiana del Espacio. Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia.

- Presidencia de la República. (2 de mayo de 2016). *Decreto 724 de 2016*. Por el cual se modifica la estructura del Departamento Administrativo de la Presidencia de la República. Bogotá, Colombia.
- Presidencia de la República. (2 de septiembre de 2014). *Decreto 1649 de 2014*. Por medio del cual se modifica la estructura del Departamento Administrativo de la Presidencia de la República. Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia.
- Presidencia de la República. (26 de abril de 2017). *Decreto 672 de 2017*. Por el cual se modifica la estructura del Departamento Administrativo de la Presidencia de la República. Bogotá, Colombia.
- Presidencia de la República. (5 de septiembre de 2018). *Decreto 1714 de 2018*. Por el cual se confía a la vicepresidenta de la República unas misiones. Bogotá, Colombia.
- Princeton University (2010). *Space Transportation Demand and Costs*. New Jersey: Princeton University.
- QuimiNet.com (2016). *Precios de oxígeno líquido*. Obtenido de <https://bit.ly/2md0Uhj>
- Quiroga, R. (2014). *El desarrollo espacial: una oportunidad invaluable para el Ministerio de Defensa*. Bogotá, D.C.: Escuela Superior de Guerra.
- Ramírez, C. y Mendoza, L. (2013). *Perfil Migratorio de Colombia 2012*. Bogotá, D.C.: Organización Internacional para las Migraciones. Obtenido de <https://bit.ly/2VbzXI0>
- Ramírez, S. y Cárdenas, J. (2006). *Colombia-Venezuela: retos de la convivencia*. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Estudios Políticos y Relaciones Internacionales. Obtenido de <https://bit.ly/2kkKPps>
- Range Commanders Council-Telemetric Group (2008). *Telemetry (TM) Systems Radio Frequency (RF) Handbook*. New Mexico: Range Commanders Council U.S. Army White Sands Missile Range. Obtenido de <https://bit.ly/2kihLie>
- Registraduría Nacional del Estado Civil. (2014. Junio, 22). Informe de preconteo. Elecciones presidenciales 2014. Recuperado de http://www3.registraduria.gov.co/presidente2014/preconteo/2v/99PR2/DPR9999999_L1.htm

- Revelo, R. (15 de septiembre de 2014). El Tiempo. Obtenido de Colombia sin satélite: ¿un paso atrás del país en su carrera espacial?: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-14539258>
- Rincón, S. R. (septiembre de 2019). *Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales* CITAE. (R. S. Quiroga Cruz, Entrevistador)
- Sánchez, L. R., y Cardenas, Y. (2010). Información meteorológica satelital herramienta poderosa y decisiva en el planeamiento de las operaciones militares.
- Schmitt, M. (2006). International Law and Military Operations in Space. *Max Planck Yearbook of United Nations Law*, 10(1), 89-125.
- Senovilla, J. (2012). *Historia de la medición del tiempo*: astronómico, físico, atómico... Bilbao: UPV/EHU.
- Space Exploration (2014). *What is the current cost per kg to send something into GSO/GEO?* Obtenido de <https://bit.ly/2lX1oYL>
- Space Security ORG. (2012). *Space Security Index*. Waterloo, Ontario, Canada: Pandora Print Shop, Kitchener, Ontario.
- Space Security. (septiembre de 2012). *Space Security Index 2012*. Waterloo, Ontario, Canadá.
- Spaceflight (2016). *Schedule & Pricing*. Obtenido de <https://bit.ly/2kN-5lz0>
- Spacex (2019). *Falcon Heavy*. Obtenido de <https://bit.ly/2zMXaYm>
- The International Astronomical Union (1964). *XIIth General Assembly Hamburg, Germany*, 1964. Obtenido de <https://bit.ly/2lPU2X4>
- The World Bank. (2019a). *GDP ranking* (GDP). Obtenido de <https://bit.ly/2SQ2vJD>
- The World Bank. (2019b). *The Global Economy*: Heightened Tensions, Subdued Growth. Obtenido de <https://bit.ly/2LIF7sk>
- United Nations Office for Outer Space Affairs -UNOOSA (s.f.). *World Space Agencies*. Obtenido de <https://bit.ly/31L333J>
- United Nations Office for Outer Space Affairs. (2012). *United Nations Office for Outer Space Affairs*. Obtenido de International cooperation in the peaceful uses of outer space: http://www.unoosa.org/oosa/oosadoc/data/resolutions/2012/general_assembly_67th_session/ares67113.html

- Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (2012). *Introducción al cálculo de órbitas*. Obtenido de <https://bit.ly/2kMrM7F>
- Universidad de Los Andes (2016). *Proyecto Uniandino Aeroespacial*. Obtenido de <https://bit.ly/2maydSc>
- Universidad de Sevilla (2002). *Velocidad de un punto en la superficie de la Tierra (G.I.A.)*. Obtenido de <https://bit.ly/2kisbhQ>
- Universidad Politécnica de Madrid -UPM (2013). *Ingeniería Técnica Aeronáutica*. Obtenido de <https://bit.ly/2lOQRio>
- Universidad Sergio Arboleda. (s.f.). *El equipo humano*. Obtenido de <https://www.usergioarboleda.edu.co/satelite-libertad-1/#equipo>
- Universidad Sergio Arboleda. (s.f.). *El primer satélite colombiano*. Obtenido de <https://www.usergioarboleda.edu.co/el-primer-satelite-colombiano/>
- Universidad Sergio Arboleda. (s.f.). *Satélite libertad 1*. Obtenido de <https://www.usergioarboleda.edu.co/satelite-libertad-1/>
- Universidad Sergio Arboleda. (s.f.). Universidad Sergio Arboleda. Obtenido de <https://www.usergioarboleda.edu.co/satelite-libertad-1/#-satelite>
- Vallado, D. (2006). *Perturbed Motion*. En Gurfil, P. (Ed.). *Modern Astrodynamics*. Oxford: Elsevier, pp. 1-22.
- Velásquez, R. (2017). *Conferencias de clase Políticas Públicas*. Bogotá. Escuela Superior de Guerra.
- Von Clausewitz, C., Howard, M., Paret, P., y Brodie, B. (1989). *On war*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- Wade, M. (1980). *Astronautix*. Obtenido de <https://bit.ly/2kgvkyE>
- Webinfomil. (20 de noviembre de 2009). *Webinfomil*. Obtenido de Gobierno no aceptó propuesta rusa para el satélite colombiano: <http://www.webinfomil.com/2009/11/novedades-sobre-el-satelite-colombiano.html>
- Weeden, B. (2017). *Handbook for New Actors in Space*. Broomfield: Secure World Foundation. Obtenido de <https://bit.ly/2McHMcT>
- White, F. (1998). *The overview effect: Space exploration and human evolution*. Reston: American Institute of Aeronautic & Astronautic.

- Widnal, S. y Peraire, J. (2008). *Orbit Transfers and interplanetary Trajectories*. Obtenido de <https://bit.ly/2kLV71R>
- Zare, R. (1988). *Momento angular*: comprensión de los aspectos espaciales en química y física. Nueva York.: Research Gate.
- Zhao, Y. (2016). The Role of bilateral and multilateral agreements in international space cooperation. *Space Policy*, 36, 12-18.



ESCUELA SUPERIOR
DE GUERRA
"General Rafael Reyes Prieto"
Colombia

ISBN 978-958-42-8890-5



9 789584 288905 >