



CIENCIAS ESPACIALES

Publicación Semestral de la Facultad de Ciencias Espaciales (FACES)

Volumen 15, Número 2, Otoño 2024

ISSN 2225-5249 (Impreso), ISSN 2521-5868 (en línea)



UNAH
UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE HONDURAS

Ciencias Espaciales

Facultad de Ciencias Espaciales (FACES)
Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH)
Tegucigalpa, M.D.C., Honduras

Volumen 15, Número 2 Otoño, 2024. ISSN 2225-5249 (impreso); ISSN 2521-5868 (en línea)

Portada

Fotografía en primer plano del edificio del Observatorio Astronómico Centroamericano de Suyapa (OACS/UNAH) y al fondo los edificios donde funciona la Facultad de Ciencias Espaciales, dentro de los predios de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras, campus Tegucigalpa, en su 15 aniversario de creación.

Director

Ph.D. FRAS Javier Mejuto González
(Facultad de Ciencias Espaciales, UNAH)

Editor en Jefe

Máster Eduardo Enrique Rodas-Quito
(Arqueoastronomía y Astronomía Cultural, UNAH)

Consejo Editorial

Máster Ricardo Antonio Pastrana
(Astronomía y Astrofísica, UNAH)
Máster Celina Michelle Sosa Caballero
(Ciencia y Tecnologías de la Información Geográfica, UNAH)
Máster Javier Enrique Meza Antúnez
(Ciencia y Tecnologías de la Información Geográfica, UNAH)
Máster Alex Matamoros
(Ciencias Aeronáuticas, UNAH)

Consejo Científico

Ph. D. Jacopo Fritz
(Universidad Nacional Autónoma de México, México)
Ph. D. Francisco Maza Vásquez
(Universidad de Alcalá, España)
Ph. D. Stanislaw Iwaniszewski
(Instituto Nacional de Antropología e Historia, México)
Profesor José Nicolás Balbi
(Colchester Archaeological Group, Reino Unido)

Edición, arte y diagramación

Máster Eduardo Enrique Rodas-Quito
(Arqueoastronomía y Astronomía Cultural, UNAH)
Will Fernando García Rivera
(Ciencias Aeronáuticas, UNAH)

Contacto

Ph.D FRAS Javier Mejuto González
javier.mejuto@unah.edu.hn
Máster Eduardo Enrique Rodas Quito
eduardo.rodas@unah.edu.hn

Para mayor información:

Página web:
<https://www.camjol.info/index.php/CE/index>

Correo electrónico:
revista.cespaciales@unah.edu.hn

*Facultad de Ciencias Espaciales.
El 17 de abril de 2009, mediante Acuerdo N° CU-O-043-03-2009, el Consejo Universitario de la UNAH creó la Facultad de Ciencias Espaciales en reconocimiento al funcionamiento del Observatorio Astronómico Centroamericano de Suyapa (OACS/UNAH).*

La Revista Ciencias Espaciales es una publicación semestral de la Facultad de Ciencias Espaciales y se publica en los meses de junio y diciembre de cada año. El contenido de cada artículo es responsabilidad de su(s) autor(es).

CONTENIDO

Volumen 15, Número 2 Otoño, 2024

ARTÍCULO DE FONDO	4
Facultad de Ciencias Espaciales: 15 años de aportes a la ciencia desde Honduras <i>Eduardo Enrique Rodas-Quito, Javier Mejuto</i>	5
CIENCIA Y TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	22
Aplicación SIG móvil para registro en la nube y visualización de daños en la red vial costarricense <i>Gabriel Jesús Corrales Jiménez</i>	23
CIENCIAS AERONÁUTICAS	48
Estudio de riesgo operacional por impacto con aves y vehículos aéreos no tripulados (VANT) en operaciones aéreas offshore en la sonda de Campeche, México <i>Roberto Sánchez Escobar</i>	49
CIENCIAS ASTRONÁUTICAS	66
Simbiosis entre hongos micorrízicos arbusculares y <i>Phaseolus vulgaris</i> bajo condiciones de microgravedad simulada: evaluación preliminar <i>María Nicole Gálvez Bailey, Sara Nicole Velez Giraldo, Andrea Gabriela Monzón Cosillo, Florence Bianchi Veliz, Juan De Dios López De León, Pietro Ernesto Ubico Ligorria, Patrizia Lupo, PhD</i>	67
NOTAS INFORMATIVAS	82
Política Editorial e Instrucciones a los Autores	83

ARTÍCULO DE FONDO

FACULTAD DE CIENCIAS ESPACIALES: 15 AÑOS DE APORTES A LA CIENCIA DESDE HONDURAS

Eduardo Enrique Rodas-Quito^{1,*}, Javier Mejuto^{1,†}

¹Departamento de Arqueoastronomía y Astronomía Cultural
Universidad Nacional Autónoma de Honduras

Recibido: 02-12-2024

Aceptado: 04-12-2024

DOI: <https://doi.org/10.5377/ce.v15i2.19629>

RESUMEN

En el presente artículo se hace una breve reseña de la trayectoria de la Facultad de Ciencias Espaciales, que en el año 2024 cumple su 15 aniversario de haber sido creada por la iniciativa de profesionales en los campos de la Astronomía, Astrofísica, Astronomía Cultural, Ciencia y Tecnologías de la Información Geográfica, con el paso de los años también se han unido a este proyecto profesionales de las Ciencias Aeronáuticas con muy buen suceso. Todos ellos trabajan con la meta común de aportar al desarrollo de sus disciplinas haciendo crecer sus cuerpos de conocimiento con trabajos de investigación innovadores, su apropiada difusión a la sociedad hondureña gracias a proyectos de vinculación que involucran a los principales actores de la sociedad hondureña y a través de la formación de nuevos profesionales, quienes tendrán la tarea de continuar con esta labor. Se hace una recopilación documental de sus logros a lo largo de su existencia, registrados en documentos oficiales de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras, institución a la que pertenece la facultad y se plantean los retos y desafíos que se deben vencer para alcanzar la meta de mantenerse vigente en los campos disciplinares involucrados, perfilándose como una de las facultades de mayor proyección e impacto en la sociedad hondureña.

Palabras clave: Ciencias Espaciales, Honduras, Astronomía, Astrofísica, Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, Arqueoastronomía, Astronáutica.

ABSTRACT

This article offers a brief review of the history of the Faculty of Space Sciences, which in 2024 celebrates its 15th anniversary of having been created by the initiative of professionals in the fields of Astronomy, Astrophysics, Cultural Astronomy, and Geographic Science and Information Technologies. Over the years professionals from Aeronautical Sciences have also joined this project with very good success. All of them work with the common goal of contributing to the development of their disciplines by growing their bodies of knowledge with innovative research work, its appropriate dissemination to Honduran society thanks to outreach projects that involve the main actors of Honduran society and through of the training of new professionals, who will have the task of continuing with this work. A documentary compilation is made of its achievements throughout its existence, recorded in official documents of the National Autonomous University of Honduras (UNAH), the institution to which the faculty belongs, and the challenges that must be overcome to achieve the goal of remaining current in the disciplinary fields involved, emerging as one of the UNAH faculties with the greatest projection and impact in Honduran society.

Keywords: Space Sciences, Honduras, Astronomy, Astrophysics, Science and Geographic Information Technologies, Archaeoastronomy, Astronautics.

*eduardo.rodas@unah.edu.hn  <https://orcid.org/0000-0001-6956-0987>

†javier.mejuto@unah.edu.hn  <https://orcid.org/0000-0001-8936-7236>

1 ANTECEDENTES

En el año 1986, el mundo se preparaba para una nueva visita del más famoso de los cometas, el Halley, el primero cuya aparición fue predicha. En ese entonces, la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH) no contaba con una entidad dentro de ella que se dedicara por entero al estudio de los cuerpos celestes. Este evento cósmico inspiró a algunos docentes del Departamento de Física de la UNAH para trabajar en la creación de un Observatorio Astronómico dentro de sus instalaciones. Es así que en el año 1991 se llevan a cabo las primeras actividades académicas formales en Astronomía en la UNAH, con el seminario “Temas Selectos de Astronomía”, dirigido a estudiantes y profesionales de todas las carreras de la UNAH.

En la última década del siglo XX se sucedieron una serie de hechos que sentaron las bases de la futura Facultad de Ciencias Espaciales ([Pineda de Carías, 2009b](#)):

- Especialización de una docente de Física en Astronomía en la Universidad Complutense de Madrid (1992),
- Organización de la Asamblea de Astrónomos de América Central (1993),
- Autorización por el Consejo Universitario del Observatorio Astronómico de la UNAH, OA/UNAH (1994), que en 1997 cambia su nombre a Observatorio Astronómico Centroamericano de Suyapa, OACS/UNAH,
- Organización del I Curso Centroamericano de Astronomía y Astrofísica, I-CURCAA llevado a cabo en Ciudad Universitaria y Copán Ruinas (1995), despertando el interés por el conocimiento astronómico de los antiguos mayas,
- Se empieza a impartir la primera asignatura en el campo de la astronomía “Introducción a la Astronomía” por el personal del OA/UNAH (1995),
- El Consejo Universitario aprueba el Plan de Estudios de la Maestría en Astronomía y Astrofísica (1996),
- Se llevan a cabo encuentros de astrónomos de la región centroamericana en conjunto con otras universidades de Centroamérica: II y III Asamblea de Astrónomos de América Central y se continúa con la realización de los CURCAA en su II y III edición (1995-1997),
- Apertura de nuevos campos de investigación dentro del OACS/UNAH: Arqueoastronomía y Percepción Remota (1998) y los Sistemas de Información Geográfica (1999).

En las postrimerías del siglo XX, las disciplinas de la Astronomía y Astrofísica estaban desarrollándose en el seno de la UNAH, con la participación activa del OACS/UNAH en eventos internacionales y formando profesionales conscientes de la importancia de conocer nuestra posición en el Universo. Asimismo, aparece la inquietud por incursionar en dos nuevas ramas del conocimiento: la Arqueoastronomía, disciplina que estudia cómo las culturas antiguas obtuvieron, practicaron y utilizaron el conocimiento relacionado con los cuerpos celestes, aportando “innovadoras interpretaciones al conocimiento de las sociedades antiguas” ([Montero García, 2022](#)) y la de los Sistemas de Información Geográfica, disciplina que estudia nuestro entorno espacial inmediato por medio de “herramientas para trabajar con información georreferenciada” ([Olaya, 2020](#)). En cuanto a infraestructura, en esta década se realizó la compra de un telescopio



Figura 1: Participantes del I Curso Centroamericano de Astronomía y Astrofísica (I-CURCAA, Febrero 1995). Tomado de [Pineda de Carías \(2009b\)](#)

Meade LX200 tipo Cassegrain-Schmidt, con un espejo primario de 16", computarizado y con su juego de oculares y cámaras CCD. Para albergar a este equipo, se construyó un edificio cilíndrico, cerrado en su parte superior con una cúpula de fibra de vidrio, la cual consta de una rendija de observación del cielo que se podía abrir y cerrar según los horarios de observación del cielo. También se construyó un pequeño edificio anexo para oficinas e instalar las computadoras necesarias para el procesamiento de datos. Su inauguración fue el 18 de junio de 1997, en el VII Taller de las Naciones Unidas y la Agencia Espacial Europea (ESA) sobre Ciencia Espacial Básica en Tegucigalpa, Honduras ([Pineda de Carías, 2009a](#)).

2 *NUEVO SIGLO, NUEVAS PERSPECTIVAS*

2.1 *Consolidación de las Ciencias Espaciales en Honduras*

En la primera década del siglo XXI, se consolidaron y expandieron las disciplinas servidas por el personal del OACS/UNAH, abriéndose nuevas secciones en Astronomía, Arqueoastronomía y en la Ciencia y Tecnologías de la Información Geográfica, como clases optativas para todos los estudiantes de la UNAH. Especialmente en esta última disciplina se dio un gran paso al crearse el primer programa académico de educación formal de posgrado, al crearse en 2005 por el Consejo Universitario, la Maestría en Ordenamiento y Gestión del Territorio – MOGT ([Ochoa López, 2009](#)). Al mismo tiempo, se fueron dando las condiciones para que ocurriese un Proceso de Reforma Universitario de la UNAH. Esto no provocó de inmediato la creación de una facultad que acogiera a estas disciplinas, sino que quedó como un asunto a retomar por parte del nuevo Consejo Universitario que surge con la nueva estructura organizacional de la UNAH, creada por la Comisión de Transición antes mencionada.



Figura 2: Instalación de la cúpula del Observatorio Astronómico de la UNAH.
Tomado de [Pineda de Carías \(2009b\)](#).

2.2 Facultad de Ciencias Espaciales

En la reunión del 17 de abril del 2009, el Consejo Universitario aprueba la creación de la Facultad de Ciencias Espaciales mediante el Acuerdo No. CU-O-043-03-2009, nombrándose como primera decana a la profesora María Cristina Pineda de Carías. En años posteriores, la Facultad ha incorporado dentro de su estructura un campo más del conocimiento, como lo son las Ciencias Aeronáuticas, al indentificar dentro de su campo de acción diversos elementos que son parte de dicha ciencia y le ayudan en el logro de sus objetivos, destacándose entre ellos el naciente campo de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS, por sus siglas en inglés), que han sido muy útiles para trabajos de levantamientos topográficos, fotogrametría y prospección arqueológica, aspectos que están íntimamente relacionados con el resto de disciplinas de la facultad. De esta forma, la Facultad ha quedado constituida por cuatro departamentos académicos que se ocupan de las disciplinas en que ha incursionado:

- Departamento de Astronomía y Astrofísica (creado en 2009),
- Departamento de Arqueoastronomía y Astronomía Cultural (creado en 2009),
- Departamento de Ciencia y Tecnologías de la Información Geográfica (creado en 2009),
- Departamento de Ciencias Aeronáuticas (creado en 2012).

En un principio, la facultad se ubicó físicamente en dos edificios dentro del campus de Ciudad Universitaria en Tegucigalpa, MDC: edificio K1, donde se alojaron la decanatura, jefaturas de departamento y salas de profesores y la cúpula y edificio anexo que sirvieron en un inicio para albergar el OACS/UNAH. La construcción de un segundo edificio (K2) se inició una vez creada la facultad y posteriormente fueron trasladadas a éste las oficinas de Decanatura, Secretaría Académica, y el departamento de Ciencia y Tecnologías de Información Geográfica, junto con dos laboratorios de cómputo para estudiantes. Al crearse el Departamento de Ciencias Aeronáuticas, también se alojó en este último edificio.

2.3 Oferta Académica

La segunda década del siglo XXI vio cómo la facultad fue consolidando su actividad a través del logro de la apertura de las carreras de Licenciatura en Astronomía y Astrofísica en el año 2012, la Licenciatura en Ciencia y Tecnologías de la Información Geográfica y Técnico Universitario en Sistemas de Información Geográfica con énfasis en Catastro en 2015 y terminando el decenio con la aprobación por el Consejo Universitario de la Licenciatura en Operaciones Aeronáuticas y el Técnico Universitario en Operaciones de Vuelo, ambas en el año 2019. De esta manera, la facultad de Ciencias Espaciales propone un total de cinco (5) carreras de grado y dos (2) de posgrado, dentro de su oferta académica.

2.4 Revista Ciencias Espaciales

Otra iniciativa exitosa que tuvo sus inicios en el año 2009, fue la creación de la Revista Ciencias Espaciales. A través de sus dos ediciones anuales, que coinciden con dos de las estaciones marcadas por el movimiento aparente anual del Sol: Edición de Primavera y Edición de Otoño, se cumplió con el objetivo de que los docentes de la facultad tuvieran un medio donde publicar los resultados de sus trabajos de investigación. Gracias a redes académicas de profesionales de las ciencias espaciales, la oferta de artículos publicados se ha ido ampliando, lo que unido a sus esfuerzos por cumplir con los estándares internacionales exigidos a revistas de prestigio, han hecho que la Revista Ciencias Espaciales haya logrado la indexación en el catálogo y directorio de revistas latinoamericanas Latindex, en las bases de datos Central American Journals Online (Camjol) y el Portal de Revistas de la UNAH. De esta forma, se puede decir que ya ha alcanzado la última etapa de desarrollo de la revista, según la clasificación de [Matamoros y Rivera Gutiérrez \(2019: 15\)](#), Posicionamiento en la Comunidad Científica. Con la edición que usted lee en este momento, la revista está publicando el número 2 del volumen No. 15, un total de 28 ediciones desde su creación en el año 2009.



Figura 3: Selección de portadas de la Revista Ciencias Espaciales.

2.5 Eventos científicos internacionales

En estos años se llevaron a cabo varios eventos que ayudaron a consolidar internacionalmente a FACES en los campos de conocimiento que desarrolla. Entre ellos podemos destacar aquí:

- XIV Conferencia Iberoamericana de SIG (CONFIBSIG), que se llevó a cabo en Tegucigalpa, Honduras del 3 al 5 de julio del 2013, con participación de conferencistas de Argentina, Brasil, Chile, Costa

Rica, Cuba, Ecuador, España, Estados Unidos, Holanda, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Perú y Puerto Rico.

- International School for Young Astronomers (ISYA 2015), que tuvo lugar en Tegucigalpa y Copán Ruinas, del 23 de noviembre al 11 de diciembre del 2015, con jóvenes astrónomos provenientes de la región latinoamericana.

FACES también forma parte de comités organizadores y científicos, tales como el I Congreso Mesoamericano de Astronomía Cultural, Jornadas y Escuelas de Astronomía Cultural de la Sociedad Interamericana de Astronomía cultural, I y II Congreso Espacial Centroamericano, entre otros.

3 LA FACULTAD DE CIENCIAS ESPACIALES EN EL AÑO DE SU 15 ANIVERSARIO

A partir de su creación, la Facultad de Ciencias Espaciales (FACES) ha hecho parte integral de su quehacer las 3 funciones sustantivas de la visión universitaria: Docencia, Investigación y Vinculación Universidad-Sociedad, obteniendo con este enfoque logros que han posicionado a la facultad como protagonista y líder de sus disciplinas dentro y fuera de la UNAH.



Figura 4: Equipo directivo de la Facultad de Ciencias Espaciales en el 15 aniversario de FACES: Decano, Secretario Académico, Jefes de Departamento, Coordinador General de Posgrado, Coordinadores de Carrera, y directores de Observatorios e Institutos adscritos a la Facultad.

3.1 Docencia

La Facultad de Ciencias Espaciales ha abierto desde su creación hasta su aniversario número 15, un total de cinco (5) carreras en los grados de Licenciatura y de Técnico Universitario:

- Licenciatura en Astronomía y Astrofísica,
- Licenciatura en Ciencias y Tecnologías de la Información Geográfica,
- Licenciatura en Operaciones Aeronáuticas,
- Técnico Universitario en Sistemas de Información Geográfica con énfasis en Catastro,
- Técnico Universitario en Operaciones de Vuelo.

Hacia finales del 2024, se logró la aprobación, por parte del Consejo Universitario de la UNAH, de la nueva carrera en Astronomía Cultural, que abarca a la anterior disciplina de la Arqueoastronomía, pero además agrega a la Etnoastronomía, Historia de la Astronomía y Socioastronomía (Iwaniszewski, 1991), primera carrera de su clase a nivel mundial, con lo cual la oferta académica de la facultad se amplía y aportará a la sociedad hondureña y mundial profesionales especialistas en el rescate y conservación del legado y conocimiento astronómico ancestral, que constituye un patrimonio material e inmaterial de nuestro país en lo particular y de la Humanidad en general.

En su 15 aniversario, FACES también ofrece dos programas de estudio a nivel de posgrado:

- Maestría Académica Regional en Astronomía y Astrofísica (MARCAA), que antes de su acreditación regional, se conoció como Maestría en Astronomía y Astrofísica (MAA),
- Maestría en Ordenamiento y Gestión del Territorio (MOGT).

Un total de once (11) promociones han concluido con éxito: cuatro (4) ediciones de la Maestría en Astronomía y Astrofísica (MAA) (Figura 5), dos (2) ediciones de la MARCAA y cinco (5) de la MOGT (Figura 6). La calidad de la formación impartida en estos programas de estudio ha sido internacionalmente reconocida a través de las capacidades de nuestros egresados, quienes han sido aceptados para continuar sus estudios a nivel de doctorado en el extranjero, con buen suceso.

En cuanto a su matrícula, FACES registró en el año 2024 un total de 2513 estudiantes de primer ingreso y reingreso, distribuidos en 118 secciones abiertas para las 5 carreras de grado. En cuanto a los posgrados, están en proceso de graduación los últimos estudiantes de la 5ª promoción del MOGT.

3.2 Investigación Científica

Desde su creación, la investigación científica ha sido un pilar dentro de FACES. Es por este motivo que todos los docentes incluyen dentro de su carga académica al menos un proyecto de investigación, el cual, una vez finalizado, puede ser publicado en un artículo científico en la Revista Ciencias Espaciales, después de pasar por un proceso de revisión por pares. Esto no limita a los docentes investigadores para que publiquen también en otras revistas científicas. Desde el 2017 al 2024, alrededor de cincuenta (50) artículos científicos han sido publicados por docentes de FACES, ya sea de forma individual por algunos



Figura 5: Estudiantes de la II Promoción de MARCAA junto al Dr. Ricardo González, profesor visitante de la Universidad Nacional Autónoma de México (primero de la izquierda).



Figura 6: Estudiantes de la V Promoción de MOGT junto al Dr. Adolfo Dalda Mouron de la Universidad de Alcalá de Henares.

de ellos, como en conjunto con otros investigadores que forman parte de las redes académicas a las que pertenecen los docentes de la facultad. Además de la Revista Ciencias Espaciales, otras publicaciones en donde han aparecido los trabajos realizados por los docentes incluyen:

- Mediterranean Archaeology and Archaeometry,
- Astronomy and Geophysics,
- Astronomy and Astrophysics,
- Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica,
- Revista Fomento Social,
- Journal of Astronomical History and Heritage,
- Advances in Space Research,
- Revista Cosmovisiones,
- Revista Geográfica de América Central,
- Proceedings de varios Congresos a los que han asistido los docentes FACES.

Entre las más de 45 redes académicas en las que participan los investigadores de FACES, resaltamos la International Astronomical Union, en la que nuestros profesores de FACES propusieron la creación de la nueva comisión C5 Astronomy in Culture, la International Astronautical Federation (IAF), American Astronomical Society, African Astronomical Society, European Astronomical Society, Royal Astronomical Society, International Society for Archaeoastronomy and Astronomy in Culture (ISAAC), Sociedad Interamericana de Astronomía en la Cultura (SIAC), Sociedad Europea de Astronomía en la Cultura (SEAC), Red internacional de Etnomatemáticas, International Council on Monuments and Sites (ICOMOS), European Archaeologists Association (EAA), Asociación de Astrofísica Centroamericana y del Caribe (Alpha-Cen) y dos academias científicas: Caribbean Academy of Sciences (CAS) y la International Academy of Astronautics (IAA).

Con el propósito de apoyar en el desarrollo de las actividades de investigación en los diferentes campos que desarrolla la Facultad de Ciencias Espaciales, ésta acoge a dos observatorios y un instituto de investigación: el Observatorio Astronómico Centroamericano de Suyapa / UNAH (OACS/UNAH), el Observatorio Universitario de Ordenamiento Territorial (OUOT) y el Instituto de Arqueoastronomía y Patrimonio Cultural y Natural (IARPACUNA), habiendo promovido y apoyado en diversos proyectos de investigación en las áreas de Ciencia y Tecnologías de la Información Geográfica, la Arqueoastronomía y Astronomía cultural.

3.3 Vinculación Universidad – Sociedad

El trabajo que realizan los docentes investigadores de FACES permiten vincularse con la sociedad hondureña a través de proyectos que involucran, entre otros actores, a las comunidades con las que interactúan en sus trabajos de investigación, así como con centros educativos de nivel medio. De esta manera se logran estrechar vínculos con dichas comunidades y se motiva a que estudiantes aprendan sobre su entorno y a los docentes en los centros educativos a que repliquen los resultados de las investigaciones. Es así que FACES ha desarrollado más de 200 proyectos de vinculación Universidad-Sociedad a lo largo de sus 15



Figura 7: Participación de FACES en el CRISCA 2024 (Conference on Physics, Astronomy, Climate Change, and Mathematics), Copán Ruinas.

años de existencia, entre los cuales se pueden contar colaboraciones con municipalidades de Honduras, generando y facilitando información relacionada con zonas vulnerables a desastres naturales, distribución de espacios públicos en pueblos y ciudades, visitas a institutos de formación técnica y de educación media en los campamentos astronómicos, las muy exitosas Noches Astronómicas que se llevan a cabo todos los viernes por la tarde-noche, desde el año 1998, 26 años ininterrumpidos de divulgación astronómica; la presencia mediática de docentes de la facultad en los medios cuando ocurren eventos especiales, entre ellos eclipses solares y lunares, con gran cobertura por los medios escritos, audiovisuales y las redes sociales; y uno de los más recientes proyectos de la facultad que es la Olimpiada Hondureña de Astronomía y Astronáutica, que se llevó a cabo con gran suceso y una participación de estudiantes de 16 departamentos.

En cuanto a la Educación no formal, FACES se ha destacado en la preparación de profesionales en diversos campos que tienen un interés particular por las disciplinas en que está involucrada la facultad, entre ellas las que tienen que ver con el campo aeronáutico. Solo en el año 2024, se han realizado las siguientes capacitaciones en esta disciplina:

- Diplomado en Sistemas Aéreos de Pilotaje Remoto V Edición: 63 egresados,
- Diplomado en Sistemas Aéreos de Pilotaje Remoto VI Edición: en proceso,
- Diplomado en Sistemas Aéreos de Pilotaje Remoto VII Edición: 12 egresados,
- Diplomado en Sistemas Aéreos de Pilotaje Remoto VIII Edición: 17 egresados,
- Curso Drone Kids: 30 niños,
- Seminario de Navegación Aérea: 900 participantes en 6 conferencias.

En la enseñanza no formal de la Astronomía y Astrofísica y la Arqueoastronomía, se capacitaron docentes de educación media para que enseñen de la mejor forma este campo del conocimiento a estudiantes de



Figura 8: Charla a estudiantes del Instituto Polivalente de San Esteban, Olancho, Honduras ilustrándoles acerca del Eclipse Anular de Sol del 14 de octubre de 2023, a observarse el día siguiente en la localidad.



Figura 9: Estudiantes del Primer Diplomado en Gestión de Sistemas Aeroportuarios.

ese nivel educativo desarrollándose dos ediciones del Curso NASE: “Redes para la Educación de la Astronomía en la Escuela”, en julio y octubre de 2024 (No. 415 y 436 a nivel mundial, respectivamente), en el que se atendieron a un total de 47 maestros.



Figura 10: Docentes capacitándose para la enseñanza de la Astronomía en la Escuela a través del proyecto internacional IAU-NASE.

En la disciplina de la Ciencia y Tecnologías de la Información Geográfica, uno de los proyectos de vinculación de mayor alcance y difusión es el GIS Day, una actividad que se lleva a cabo a nivel mundial y que en el año 2024 presentó trabajos innovadores en este campo, en la modalidad de “Feria de Tecnologías de la Información Geográfica” (Figura 11). Otro proyecto en esta disciplina que ha sido de alto impacto en las comunidades donde se ha llevado a cabo es el de Cartografía Participativa (Figura 12).

3.3.1 Proyección internacional de FACES

FACES ha establecido lazos internacionales con varias universidades, lo que le ha permitido compartir experiencias con profesionales de otros países así como llevar a cabo trabajos colaborativos de investigación de nivel mundial. Entre estos podemos mencionar dos ediciones del Diplomado de Gestión de Tierras, realizado en conjunto con la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Colombia y la Universidad San Carlos de Guatemala, en los sitios arqueológicos de Quiriguá, Guatemala y Copán Ruinas, Honduras (Figura 13).

Es de destacar la participación de FACES en la misión del Proyecto Morazán, con el cual Honduras busca desarrollar y lanzar el primer satélite hondureño a la órbita baja de la Tierra, para lo cual ha sido necesaria la participación de la facultad en diversos congresos y encuentros internacionales de Astronáutica, gracias a los cuales se han obtenido contactos con varias agencias espaciales internacionales, entre ellas: NASA,



Figura 11: Celebración del GIS Day en la Facultad de Ciencias Espaciales a finales de noviembre del 2024.



Figura 12: Participantes de la edición 2019 de la actividad Cartografía Participativa.

ESA y la naciente Agencia Latinoamericana y Caribeña del Espacio, en la cual FACES trabaja por el ingreso de Honduras con su propia Agencia Espacial.



Figura 13: Participantes del I Diplomado Internacional de Gestión de Tierras, con la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Universidad San Carlos de Guatemala y la UNAH, año 2023.

Entre los congresos internacionales con participación con profesores de FACES, se pueden enumerar los siguientes:

- EAA 2024: Reunión anual de la European Archaeology Association en Roma, Italia,
- Le plus beau rêve_ICOMOS AeroSpace Heritage Conference,
- International Astronautical Congress 2024, Milán Italia,
- 12 Congreso Mayistas Ciudad de México,
- Alpha-Cen-GUASA 2023, Quetzaltenango (Guatemala),
- International Space Forum (ISF), Ciudad de Panamá,
- American Astronomical Society AAS 240 conference in Pasadena, California.
- VII Congreso Internacional de Ordenamiento Territorial y Tecnologías de la Información Geográfica, Acapulco, México



Figura 14: Participación de FACES en el Congreso Espacial Centroamericano en Septiembre del 2024, en la Universidad del Valle, Guatemala. Participación en el Comité Organizador por el decano de FACES y como asistentes al mismo los docentes Omri Amaya y Ana Ulloa del DCA.



Figura 15: Participación de FACES / UNAH en el VII Congreso Internacional de Ordenamiento Territorial y Tecnologías de la Información Geográfica (11 al 15 de noviembre de 2024), Acapulco, México, al que asistieron las docentes Celina Michelle Sosa y Yeny Castellanos, del Depto. de Ciencia y Tecnologías de la Información Geográfica.

4 UNA MIRADA AL FUTURO

La Facultad de Ciencias Espaciales se proyecta hacia el futuro de una forma extraordinaria, con la creación de dos nuevos programas de estudios: la Licenciatura en Astronomía Cultural, primera carrera en esta disciplina a nivel mundial, lo que coloca a la UNAH como pionera en este campo y liderando la formación académica en Astronomía cultural a nivel mundial; y la Especialidad en Aplicaciones de Sistemas de Aeronaves de Pilotaje a Distancia (RPAS), única a nivel nacional, estableciendo el estándar hondureño en la preparación de pilotos de RPAS. De esta forma, Honduras pasa a formar parte de este campo en desarrollo a nivel nacional, regional y mundial. Las investigaciones realizadas por los docentes investigadores de FACES han alcanzado reconocimiento nacional en sus respectivos campos, ayudando a desarrollar políticas públicas nacionales, regionales y globales. Esta proyección tiene un enorme impacto positivo en la solución de los problemas nacionales y el mejoramiento de las condiciones de vida de hondureñas y hondureños, a través del desarrollo del país por el cual FACES lleva a cabo su actividad académica.

5 Referencias

- Iwaniszewski, S. (1991). Astronomy as a Cultural System. *Interdisciplinarni Izsledovanja*, XVIII. ISSN: 0204-966X.
- Matamoros, A. y Rivera Gutiérrez, N. (2019). Revista Ciencias Espaciales, diez años de evolución. *Revista Ciencias Espaciales*, 12(1):5–16, doi: <https://doi.org/10.5377/ce.v12i1.9673>.
- Montero García, I. A. (2022). *La Astronomía en Mesoamérica*. iTío Ediciones. ISBN: 978-607-29-2792-6.
- Ochoa López, V. L. (2009). Maestría en Ordenamiento y Gestión del Territorio: Líneas de Investigación. *Revista Ciencias Espaciales*, 1(1):–,doi : <https://doi.org/10.5377/ce.v1i1.611>.
- Olaya, V. (2020). *Sistemas de Información Geográfica*. Recuperado de <https://volaya.github.io/libro-sig/>.
- Pineda de Carías, M. C. (2009a). El Observatorio Astronómico de Honduras: Un Proyecto de Cooperación Internacional. *Revista Ciencias Espaciales*, 2(1):81–91, doi : <https://doi.org/10.5377/ce.v2i1.618>.
- Pineda de Carías, M. C. (2009b). Una Década de Astronomía Centroamericana en Honduras. *Revista Ciencias Espaciales*, 2(1):17–65, doi : <https://doi.org/10.5377/ce.v2i1.616>.

CIENCIA Y TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

APLICACIÓN SIG MÓVIL PARA REGISTRO EN LA NUBE Y VISUALIZACIÓN DE DAÑOS EN LA RED VIAL COSTARRICENSE

Ing. Gabriel Jesús Corrales Jiménez^{1,*}

¹Universidad de Costa Rica

Recibido: 30-08-2024

Aceptado: 25-10-2024

DOI: <https://doi.org/10.5377/ce.v15i2.19630>

RESUMEN

Costa Rica se ubica en una zona de alta vulnerabilidad, afectada por el impacto de fenómenos naturales que ocasionan serios daños en la infraestructura vial. Este artículo explica el desarrollo de un Sistema de Información Geográfica que permite registrar y visualizar los daños en la infraestructura de la Red Vial Nacional ocasionados por fenómenos naturales, mediante software de acceso gratuito. El sistema cuenta con tres componentes: una aplicación móvil para el reporte en campo de los daños, un servicio en la nube para el almacenamiento de estos datos y una aplicación web para su visualización. La aplicación móvil se programó utilizando el paquete de desarrollo de software de código abierto *Flutter*, de *Google*; el almacenamiento de los datos obtenidos con la aplicación se implementó en la plataforma *Firebase* a un nivel gratuito de servicio; y la aplicación web de visualización fue desarrollada a partir de capas de puntos en formato *GeoJSON*, mediante el paquete *Shiny* de *R*. Este ejercicio permitió evidenciar algunas de las ventajas del formato *GeoJSON* frente a los *shapefile*, el formato vectorial de datos espaciales más utilizado tradicionalmente. Como resultado, se generaron nuevas herramientas para planificar la atención de daños causados por eventos naturales en la Red Vial Nacional y mejorar la eficiencia de las inversiones públicas, lo que beneficia a la sociedad costarricense en términos económicos y de seguridad vial.

Palabras clave: SIG, infraestructura vial, aplicación móvil, almacenamiento en la nube, visor web.

ABSTRACT

Costa Rica is located in a highly vulnerable area, affected by the impact of natural phenomena that cause serious damage to road infrastructure. This article explains the development of a Geographic Information System that allows recording and visualizing damages in the infrastructure of the National Road Network (Red Vial Nacional or RVN) caused by natural phenomena, by means of free software. The system has three components: a mobile application for field damage reporting, a cloud service for data storage and a web application for visualization. The mobile application was programmed using Google's open-source software development package *Flutter*; the storage of the data obtained with the application was implemented in the *Firebase* platform at a free service level; and the visualization web application was developed from *GeoJSON* points as layers, using the *R* package *Shiny*. This exercise made it possible to demonstrate some of the advantages of the *GeoJSON* format over *shapefiles*, the most traditionally used vector spatial data format. As a result, new tools were generated to plan the attention of damages caused by natural events in the National Road Network and to improve the efficiency of public investments, which benefits the Costa Rican society in terms of economy and road safety.

Keywords: GIS, road infrastructure, mobile application, cloud storage, web viewer.

*gcorralesj@gmail.com.

1 Introducción

La institución encargada de la construcción, rehabilitación y conservación de la Red Vial Nacional (RVN) en Costa Rica es el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI). Esta institución debe llevar a cabo una planificación tal que permita priorizar la atención de los numerosos daños en la infraestructura vial ocasionados por eventos naturales.

La base de dicha planificación es la obtención en campo de datos como el tipo de daño, su ubicación, el elemento dañado, la magnitud del daño y el evento que lo originó. A partir de esto surgió la necesidad de lograr un proceso eficiente y seguro para el registro y la visualización de estos datos que no implicara una inversión de los recursos del CONAVI, en una época de intensificación de las dificultades económicas del país por consecuencia de la pandemia de Covid-19.

Esa necesidad llevó al planteamiento de la posibilidad de implementación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) que permitiera al CONAVI el registro y almacenamiento de datos de los daños en la infraestructura vial que incluyera un proceso automatizado de publicación en un visor web de estos datos mediante software gratuito.

Al no existir una única definición de SIG, este término puede ser empleado para referirse a cuestiones esencialmente distintas entre sí: se tiene SIG como disciplina, SIG como proyecto (cada una de las implementaciones técnicas de la disciplina SIG) y SIG como software (los programas que permiten el desarrollo de esta disciplina y la implementación de sus proyectos) ([del Bosque González et al., 2012](#)).

Sin embargo, una definición completa y precisa es la de un SIG como un sistema integrador de tecnología informática, personas e información geográfica para capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados ([Olaya, 2020](#)).

Partiendo de esa definición, el objetivo del proyecto que se aborda en este artículo fue el desarrollo de un SIG que permita al CONAVI registrar y visualizar los daños causados por eventos naturales en la infraestructura de la RVN de Costa Rica sin necesidad de pagar por licencias de software.

Para alcanzar ese objetivo fue necesario programar una aplicación móvil que permitiera el reporte de los datos de campo, implementar una base de datos para el almacenamiento de esta información y desarrollar una aplicación web para visualizarla en su dimensión geoespacial.

Los usuarios del primer componente del SIG formarán parte del personal del CONAVI que cuente con la capacidad técnica y el criterio para realizar este tipo de reportes de campo a partir de una aplicación móvil. La administración de la base de datos corresponderá al personal de oficina que cuente con la formación necesaria para realizar esta función y los usuarios finales del sistema serán los funcionarios encargados de la planificación del CONAVI, quienes, para la toma de decisiones, se apoyarán en el visor web y en una capa de puntos *GeoJSON* generada por el sistema.

Este proyecto tiene un alcance físico de nivel nacional, ya que el SIG será utilizado para el registro de daños en la RVN, formada por el conjunto de vías administradas por el Estado a través del CONAVI. Por lo tanto, el sistema no contempla las rutas de administración municipal, que forman parte de la Red Vial Cantonal.

La aplicación móvil para el reporte de datos de campo se programó en *Flutter*, un paquete de desarrollo de software o *Software Development Kit* (SDK) de código abierto desarrollado por *Google* para la creación de aplicaciones móviles nativas multiplataforma, sin embargo, la aplicación desarrollada en este proyecto se encuentra disponible únicamente para dispositivos *Android*.

También se recurrió a un producto de Google para la implementación de la base de datos: *Firebase*, la plataforma para el desarrollo de aplicaciones, que permite la utilización de servicios de almacenamiento y bases de datos *NoSQL* en la nube (Younis, 2021).

La aplicación web de visualización, el tercer componente de este SIG, se implementó mediante el paquete *Shiny* de R, que utiliza la biblioteca *Leaflet* para incluir funcionalidades geoespaciales y consiste en un *dashboard* o tablero que permite la visualización de la ubicación e información actualizada de los reportes de daños realizados desde la aplicación móvil.

A continuación se presenta un resumen de la metodología del proyecto, los requerimientos del sistema, el desarrollo de la aplicación móvil utilizada en el registro de los datos de campo, el almacenamiento de esos datos, el desarrollo de la aplicación web de visualización y otras funcionalidades del sistema como la gestión de usuarios, un proceso de optimización de imágenes que se implementó para reducir los requerimientos de almacenamiento y el envío de los reportes por correo electrónico.

Para ampliar en cualquiera de esos puntos se recomienda revisar el Trabajo Final de Investigación Aplicada que se encuentra publicado en el siguiente enlace: <https://kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/90365>.

2 Metodología

La metodología de este proyecto se introduce a partir del esquema metodológico de la Figura 1, que inicia con los requerimientos del sistema y finaliza con la elaboración de las recomendaciones para su implementación.

2.1 Definición de los requerimientos del sistema

En el CONAVI el registro de los daños causados por eventos naturales consistía en un procedimiento que iniciaba cuando el personal de campo obtenía las coordenadas de cada punto a partir de dispositivos receptores GNSS (Sistema Global de Navegación Satelital) y posteriormente registraba estas coordenadas y los datos adicionales en hojas de cálculo para enviarlos por correo electrónico, junto con fotografías de los daños, al personal de oficina encargado de la recopilación de los registros de todo el país.

Con el fin de sistematizar estas tareas se llevó a cabo un proceso de etnografía, uno de los enfoques de la ingeniería de requerimientos de software que consiste en la inmersión del analista en el entorno laboral donde se utilizará el sistema (Sommerville, 2005), ya que el autor del proyecto abordado en este artículo en ese momento formaba parte de la unidad del CONAVI encargada de recibir y recopilar los datos registrados manualmente por el personal de campo.

Este proceso de definición de requerimientos comprendió la realización de visitas de campo para el levantamiento de datos en sitio y una serie de reuniones con el personal de campo y con los encargados de la toma de decisiones que eventualmente serían los usuarios finales del sistema.

De esa manera se definieron los requerimientos funcionales, que consisten en las declaraciones de los servicios que debía proporcionar el sistema y la forma como debe reaccionar o no en situaciones particulares (Sommerville, 2005); los requerimientos no funcionales, que se refieren a las restricciones de tiempo, del proceso de desarrollo y de estándares que se aplican a algunas características del sistema (Sommerville, 2005); y la descripción detallada de cada uno de los datos requeridos en el sistema desde su levantamiento en sitio hasta su visualización en una aplicación web.

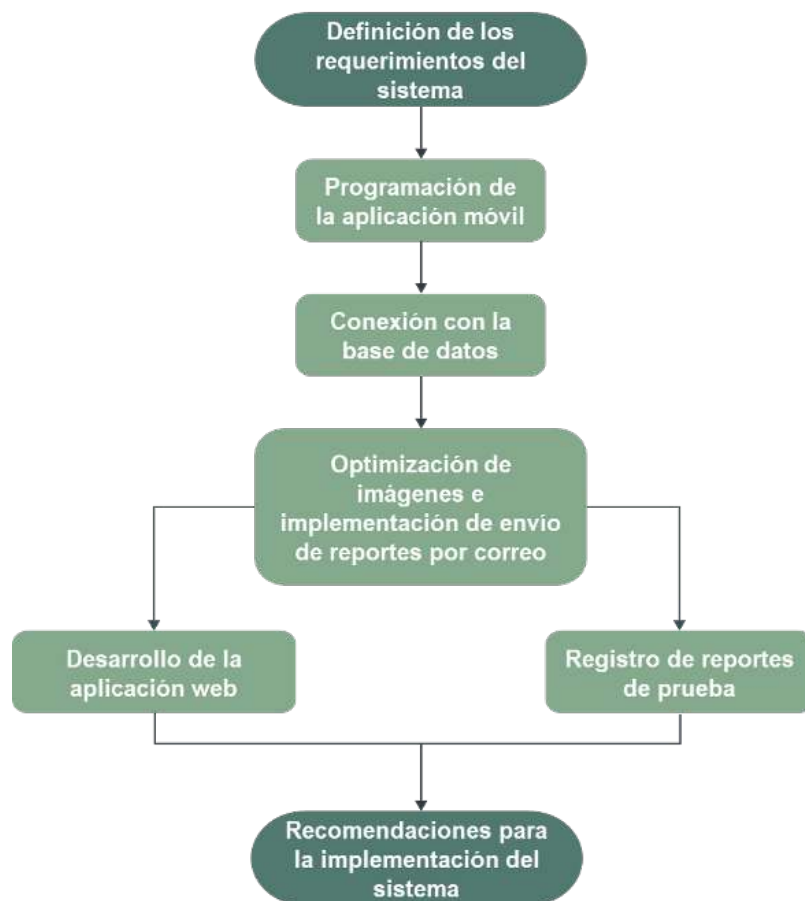


Figura 1: Esquema metodológico aplicado al desarrollo del sistema.

2.2 Programación de la aplicación móvil para registro de datos de campo

La aplicación móvil para el registro de datos de campo fue programada mediante el SDK de código abierto *Flutter*, que utiliza el lenguaje de programación *Dart* y permite la programación de los elementos de la aplicación móvil mediante el uso de aplicaciones de archivos livianos conocidas como *widgets*. Por estas características se le atribuye el alto rendimiento de sus productos y la reducción de complejidad en comparación con otras herramientas.

Las funciones más utilizadas y la información visual de la aplicación móvil fueron programadas utilizando *widgets* y su desarrollo se ligó a la estructura de la base de datos definida mediante los requerimientos del sistema y que almacenará los datos de campo. *Flutter* permite la conexión de manera sencilla con las bases de datos no relacionales de la plataforma *Firebase* (tanto *Flutter* como *Firebase* son productos de *Google*), a través de paquetes o bibliotecas de acceso libre.

El código fuente de esta aplicación se escribió en el IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) *Visual Studio Code* y en este proceso se utilizó *GitHub* como sistema de control de las distintas versiones del código para facilitar la recuperación de versiones anteriores y el respaldo de los archivos.

2.3 Conexión con la base de datos

En este proyecto se optó por la base de datos *Firestore Database* de la plataforma *Firebase*, una base de

datos no relacional o NoSQL, que significa “*Not Only SQL*” o “*No Solo SQL*”, ya que este tipo de bases de datos no hace uso del lenguaje de consultas SQL (Acens, 2014). *Firestore* es una base de datos con almacenamiento en la nube que no contiene tablas ni filas, sino que se orienta a documentos (Younis, 2021). Cada documento cuenta con un conjunto de pares clave-valor donde se almacenan los datos. Estos documentos a su vez se organizan en colecciones.

Adicionalmente, junto con *Firestore* se utilizó también el servicio *Firebase Storage* para el almacenamiento en la nube de las fotografías generadas por la aplicación móvil.

La conexión de la aplicación móvil con *Firestore* y *Storage* se realizó mediante el uso de paquetes de *Flutter* que permiten la ejecución de acciones desde el código fuente de la aplicación. Esta combinación dio como resultado la posibilidad de que los datos de los reportes de daños en la RVN se envíen desde la aplicación hasta la base de datos a través de una conexión a Internet.

2.4 Optimización de imágenes e implementación de envío de reportes por correo

Como parte de los requerimientos del sistema se definió la necesidad de que la aplicación permitiera la captura de dos a diez fotografías en cada reporte de daños. Con el fin de reducir los requerimientos de almacenamiento se implementó un proceso de optimización de estas imágenes que dio como resultado una importante reducción de su peso sin sacrificar su calidad.

Ese proceso fue posible mediante la utilización de la extensión *Resize Images* de *Firebase*, en combinación con ciertos ajustes en el código fuente de la aplicación de *Flutter*. De esta manera se logró reducir el peso de las fotografías a menos de 150 *kilobytes* (kB) en todos los casos, lo que se traduce en un aumento general en la eficiencia del sistema.

Adicionalmente, se implementó el envío de correos electrónicos con la información de los reportes de daños y los enlaces de descarga de las fotografías, que se muestra en la Figura 2. Este proceso se realiza de forma automática cuando se añade un documento a la colección de la base de datos *Firestore*, es decir, cada vez que se finaliza un reporte de daños en la aplicación móvil.

Esa implementación se llevó a cabo utilizando la extensión *Trigger Email from Firestore* de *Firebase*, junto con sencillos ajustes en el código fuente de la aplicación de *Flutter*. Los correos electrónicos pueden ser dirigidos a cada usuario de campo de la aplicación móvil, a sus superiores jerárquicos o al personal de oficina que administrará el sistema.

2.5 Desarrollo de aplicación web para la visualización de los datos

Esta aplicación consiste en una página web que se ejecuta desde los servidores en la nube del sitio *shinyapps.io* y da acceso a un tablero compuesto de herramientas para facilitar la visualización, lectura y filtrado de los datos de cada daño reportado en la RVN desde la aplicación móvil.

La implementación de esta aplicación web se llevó a cabo mediante el paquete *Shiny* de *R*. *R* es un lenguaje de programación enfocado en el análisis estadístico que, por tratarse de un proyecto de software libre, facilita el desarrollo de paquetes como *Shiny*, que es utilizado para la implementación de aplicaciones web interactivas con funcionalidades geoespaciales (Vargas, 2021).

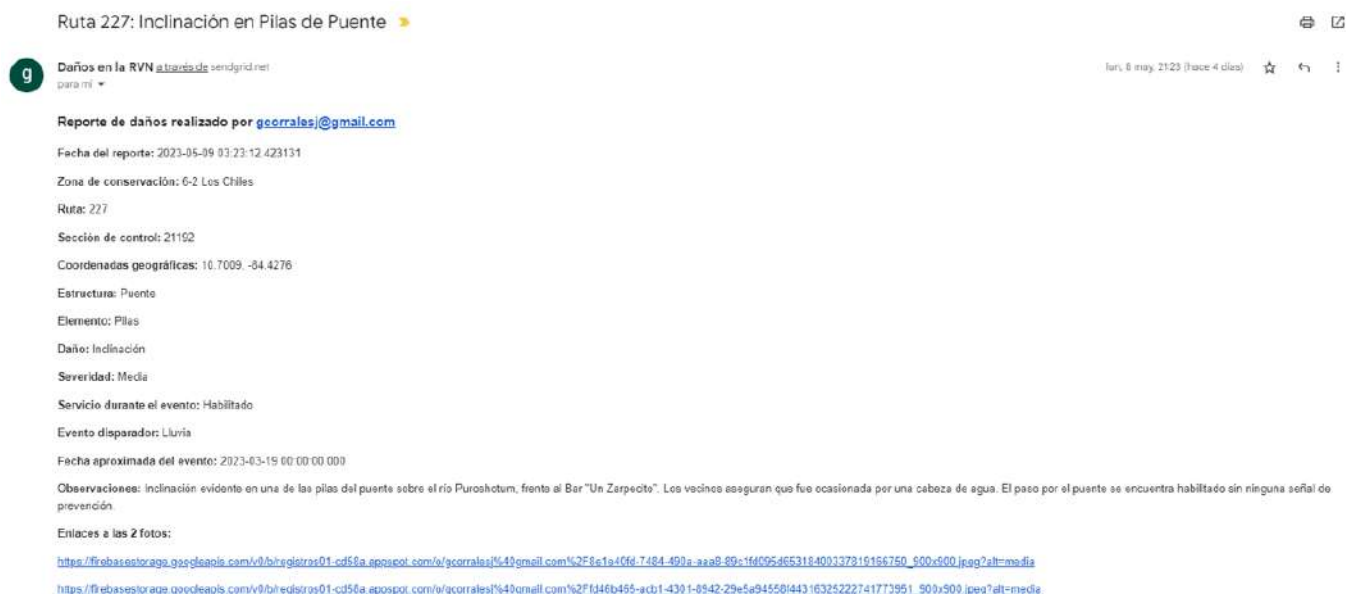


Figura 2: Ejemplo de envío de reportes por correo electrónico.

Una de las principales funcionalidades geoespaciales aprovechadas por esta aplicación web es el uso de mapas base de la plataforma *OpenStreetMap*, un proyecto de datos abiertos para crear y proveer gratuitamente mapas e información espacial (Bennett, 2010). En estos mapas se despliega una capa de puntos georreferenciada sobre el territorio nacional que se almacena en la base de datos *Firestore* en formato *GeoJSON*. Esta capa es la que permite la consulta y visualización de los daños reportados en la RVN.

2.6 Registro de reportes de prueba

Este proyecto pasó por una etapa de registro de reportes de daños ficticios para probar el funcionamiento del sistema, simulando las condiciones del uso de la aplicación móvil que experimentarían los eventuales usuarios en el campo.

Para realizar los reportes es necesario activar el sistema de ubicación de los dispositivos móviles y contar con acceso a Internet durante el proceso de obtención de coordenadas y el de la finalización del registro para su almacenamiento en la base de datos en la nube. El proceso de obtención de coordenadas debe realizarse de manera estática, es decir, no deben tomarse puntos mientras el dispositivo se esté desplazando de un lugar a otro.

Algunos de los reportes de prueba se realizaron en espacios cerrados a lo interno de edificaciones. Esta condición no se presentaría en la vida real para el reporte de daños en la RVN. Sin embargo, esto no debe considerarse un error metodológico, pues de esta manera se determinó que los resultados en estos casos fueron satisfactorios en términos de la exactitud en la ubicación.

Los dispositivos móviles no cuentan con la exactitud de los equipos especializados de navegación satelital, pero para la ubicación de los daños en la RVN, objetivo de este proyecto, no se requiere una mayor exactitud que la disponible en los dispositivos móviles con los estándares tecnológicos actuales.

Dado que los sistemas de ubicación de los dispositivos móviles se apoyan en redes satelitales, las condiciones en espacios abiertos que se presentarían en escenarios de reportes de daños reales contarán con una mayor exactitud en su ubicación.

3 Resultados

De los tres componentes del sistema desarrollado, se consideran en la sección de resultados la aplicación móvil y la aplicación web de visualización, dado que el servicio en la nube para el almacenamiento de datos no forma parte de la experiencia de usuario, sino que es un elemento de apoyo de los otros dos componentes, que se explicación a continuación.

3.1 Aplicación móvil

La aplicación móvil permite el registro en campo de los daños en la RVN causados por eventos naturales. Para cada uno de los datos requeridos en la realización de estos reportes existe una pantalla específica, como se explica a continuación.

3.1.1 Fotografías

La primera parte de los reportes en aplicación móvil es la que permite al usuario la captura de las fotografías del sitio donde se presentó el daño. Como parte de sus requerimientos funcionales, el sistema debe permitir la captura de entre dos y diez fotografías en cada reporte. Este rango se muestra como mensaje en la primera pantalla de la aplicación (Figura 3):



Figura 3: Pantalla de inicio del reporte antes de la toma de fotografías.

En cada oportunidad, la aplicación presentará una vista previa de la fotografía por tomar, de manera que el usuario pueda confirmarla o rechazarla.



Figura 4: Vista previa de la fotografía por tomar.

Una vez iniciado este proceso, la aplicación presentará en pantalla la cantidad de fotografías tomadas, así como una vista previa en miniatura de cada una (Figura 4). A partir de la segunda fotografía también presentará las opciones de avanzar hacia la siguiente pantalla o de reiniciar el proceso para eliminarlas y empezar la captura desde cero, como se muestra en la Figura 5.

Al finalizar el proceso de toma de fotografías, el usuario podrá avanzar presionando el botón "Siguiente" para continuar con la pantalla "Estructura".

3.1.2 Estructura

La pantalla "Estructura" permite al usuario el registro del tipo de estructura en la que se presenta el daño reportado de acuerdo con la clasificación utilizada por el CONAVI, mediante un menú desplegable donde se selecciona uno de cuatro diferentes tipos: carretera, puente, alcantarilla mayor y puente peatonal (Figura 6).

En las siguientes dos pantallas de la aplicación las opciones desplegadas en el menú se encuentran en función del tipo de estructura elegido, por tratarse de elementos de esta y el tipo de daño sufrido por ellos.

3.1.3 Elemento

La pantalla "Elemento" de la aplicación móvil es la que permite la selección del elemento dañado de la estructura seleccionada previamente, por tanto, los elementos que se muestran en la lista desplegable se encuentran en función del tipo de estructura.

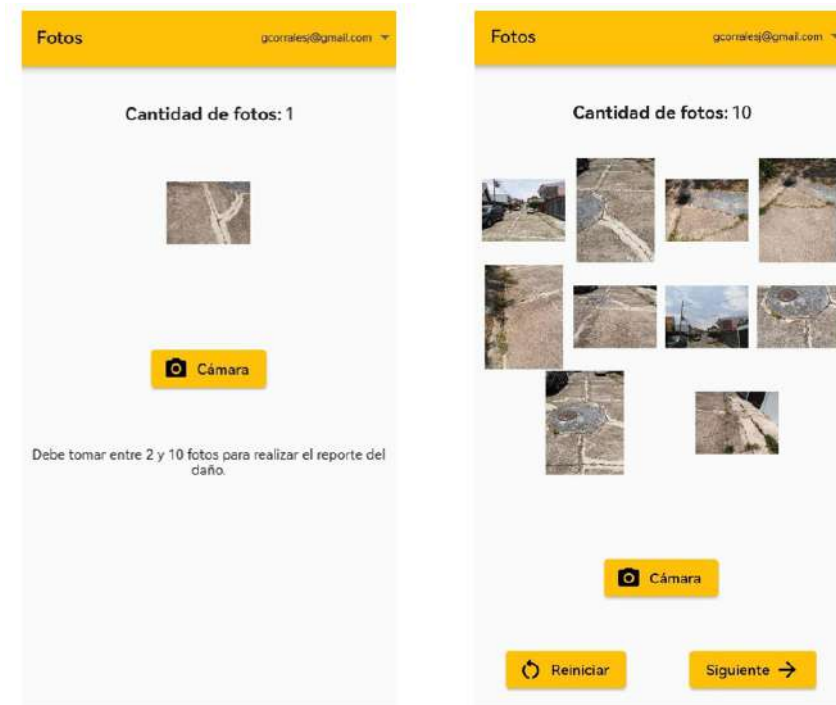


Figura 5: Pantallas del proceso de toma de fotografías.

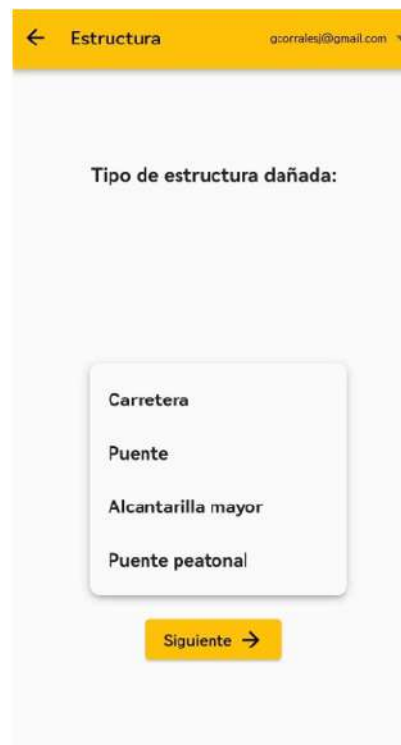


Figura 6: Pantalla de selección de la estructura dañada.

Esta es la primera de las pantallas en cuya sección superior se muestra un resumen de los datos obtenidos por la aplicación en las pantallas anteriores. Hasta este paso solo se ha seleccionado el tipo de estructura,

por lo que esta información se muestra en la esquina superior izquierda de la pantalla, como se muestra en la Figura 7:

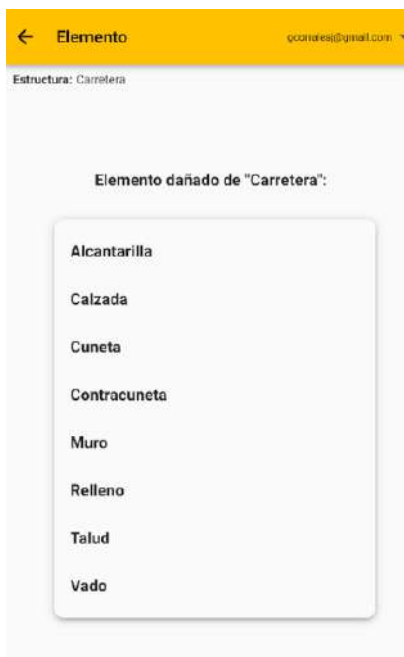


Figura 7: Pantalla de selección del elemento según la estructura.

De la misma manera en que el tipo de elemento se encuentra en función de cada estructura, el tipo de daño que puede sufrir un elemento es diferente en cada caso, como se explica a continuación.

3.1.4 Daño

En la pantalla "Daño" de la aplicación móvil se debe definir el tipo de daño del elemento de la estructura afectada por un evento natural en la RVN. Para esto, se debe seleccionar el tipo de daño de una lista desplegable que se muestra en función del tipo de elemento seleccionado previamente, según la clasificación de daños por elemento definida por el CONAVI (Figura 8).

Como se definió en los requerimientos funcionales, el sistema debe permitir el registro de la magnitud del daño registrado según el criterio del usuario, como se muestra en la siguiente pantalla.

3.1.5 Severidad

En la pantalla "Severidad" el usuario de la aplicación móvil debe realizar una valoración de la severidad del daño reportado como "Baja", "Media" o "Alta", seleccionando una de estas opciones, como se muestra en la Figura 9. Por lo tanto, es necesario que estos usuarios cuenten con formación técnica y experiencia en labores de atención de infraestructura vial, ingeniería civil o disciplinas similares, para realizar la evaluación preliminar de la magnitud de los daños que será registrada en estos reportes y así servirá como parte de los criterios de priorización en la atención de los daños.

Otro elemento de los criterios de priorización en la atención de los daños que se considera en esta aplicación, es la posible afectación en el servicio de la vía que pueda haber ocasionado el daño.



Figura 8: Pantalla de selección del daño según elemento.



Figura 9: Pantalla de selección de la severidad del daño.

3.1.6 Servicio

En la pantalla "Servicio" el usuario de la aplicación debe registrar la afectación ocasionada por el daño en el servicio de la vía. El menú de esta pantalla únicamente despliega las siguientes tres opciones: "Habilitado" (el servicio siempre estuvo habilitado), "Regulado" (se dieron cierres parciales o paso regulado) o "Cerrado" (el daño ocasionó el cierre de la vía en algún momento), como se aprecia en la Figura 10.

Otro de los requisitos funcionales de este sistema es registrar el elemento disparador del evento natural

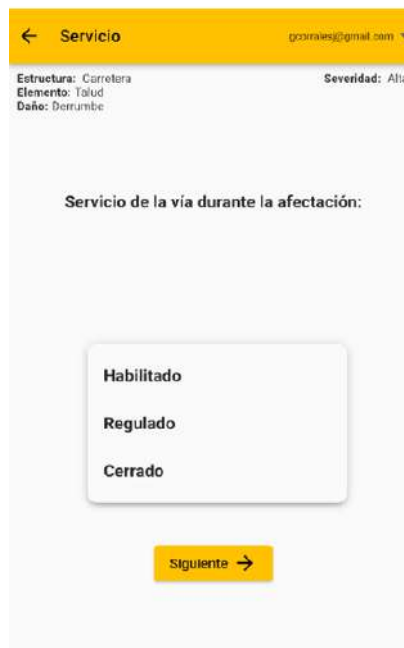


Figura 10: Pantalla de selección del estado del servicio de la vía.

que ocasionó el daño, para determinar su origen. Este requisito se aborda en la siguiente pantalla de la aplicación.

3.1.7 Evento

En la pantalla “Evento” el usuario de la aplicación debe seleccionar el tipo de evento natural desencadenante o disparador del daño reportado en la RVN, entre las siguientes cuatro categorías definidas por CONAVI: “Lluvia”, “Marea alta”, “Sismo” y “Vulcanismo”, que se muestran en la Figura 11.

Otro dato necesario para la realización de los futuros análisis sobre los daños en la RVN es la fecha en que se presentó el evento natural desencadenante de estos daños.

3.1.8 Fecha

En la pantalla “Fecha” el usuario de la aplicación móvil debe ingresar la fecha probable de la ocurrencia del daño en la estructura de la RVN. Es común que durante una visita de campo no se tenga certeza, sino un aproximado, de la fecha de ocurrencia del evento generador del daño, de ahí que esta pantalla solicite una fecha aproximada.

La fecha por defecto en la aplicación es la del día en que se realiza el reporte del daño y de esta manera aparece indicada en la pantalla (Figura 12). Para modificarla es necesario ingresar al calendario a través del botón del mismo nombre y seleccionar una fecha probable.

Además del tiempo, también se debe registrar el lugar en que se reporta el daño. El CONAVI divide al país en 22 zonas para facilitar la administración de la conservación vial de sus rutas nacionales. Este es el primer dato espacial que se registra en la aplicación, como se muestra a continuación.

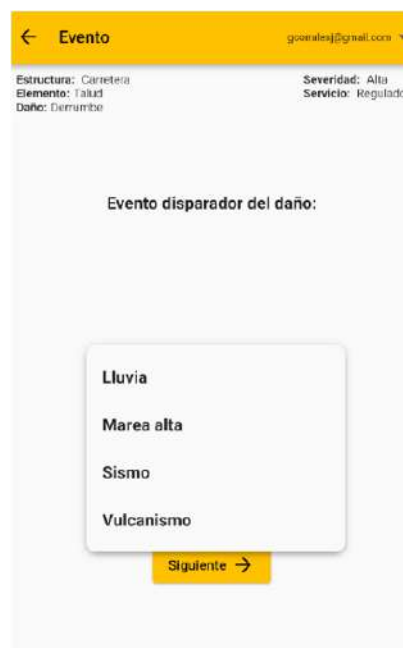


Figura 11: Pantalla de selección del evento disparador del daño.

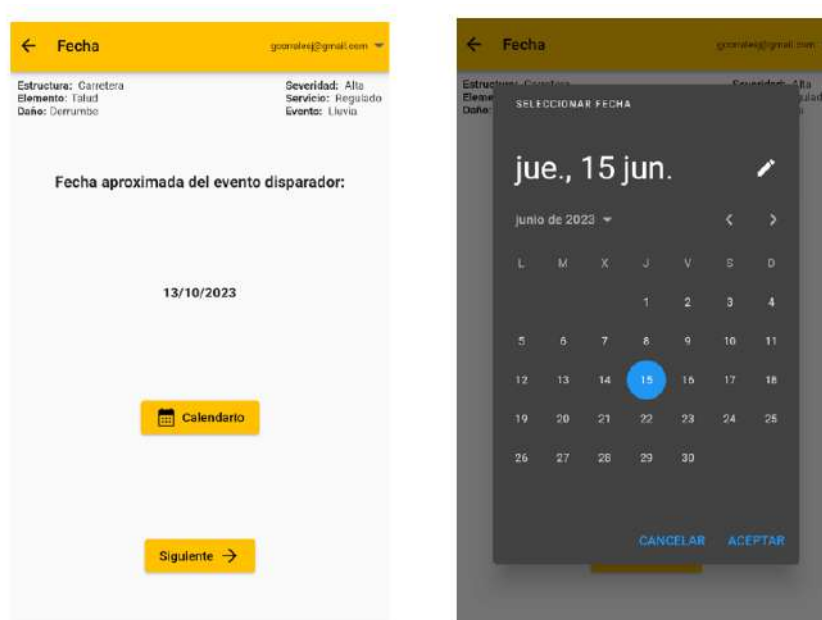


Figura 12: Pantalla de selección de la fecha aproximada del evento disparador.

3.1.9 Zona

En la pantalla "Zona" el usuario de la aplicación móvil debe seleccionar del menú desplegable la zona de conservación vial donde se ubica el daño reportado. Este menú presenta una lista con la numeración y el nombre de cada una de las 22 zonas de conservación del país. En la Figura 13 se muestra el menú con parte de estas zonas, al resto se accede mediante la barra de desplazamiento.

Dentro de estas zonas hay rutas nacionales locales y otras que atraviesan diferentes zonas, por lo que hay

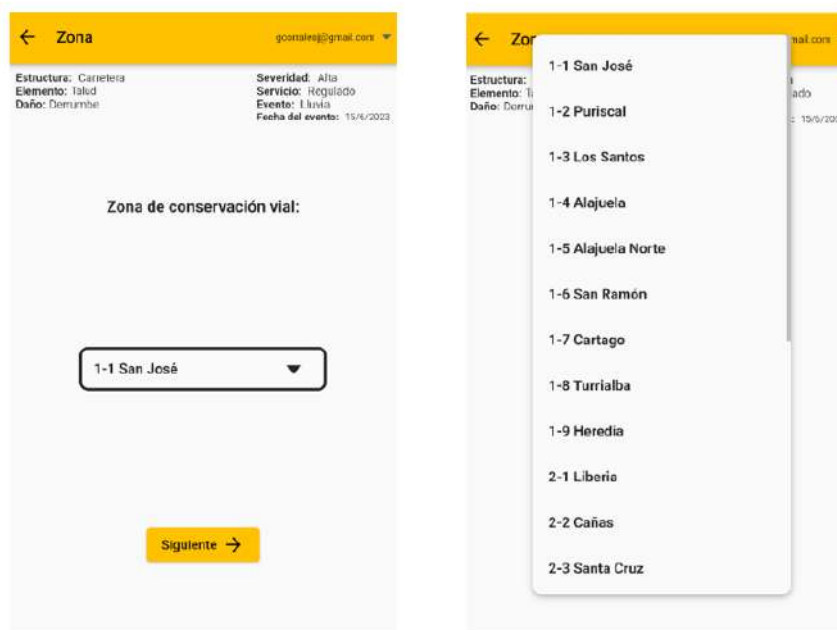


Figura 13: Pantalla de selección de la zona de conservación vial.

rutas compuestas por secciones que pertenecen a diferentes zonas de conservación. La ruta nacional es el siguiente registro en la aplicación.

3.1.10 Ruta

En la pantalla "Ruta" el usuario de la aplicación móvil debe seleccionar la ruta de la RVN donde se ubica el daño reportado de un menú desplegable con las rutas pertenecientes a la zona previamente seleccionada, como se muestra en la Figura 14.

El filtro de rutas por zona se programó en *Flutter* mediante la capa de la RVN utilizada por el CONAVI en su versión actualizada a noviembre de 2022. Esta capa cuenta con 1331 secciones de control, que son las unidades en las que se divide cada ruta y las cuales se registran en la siguiente pantalla de la aplicación.

3.1.11 Sección

En la pantalla "Sección" el usuario de la aplicación móvil debe seleccionar del menú la sección de control de la ruta de la RVN donde se ubica el daño reportado (Figura 15). La lista del menú se encuentra en función de la zona de conservación y de la ruta seleccionadas en las dos pantallas anteriores de la aplicación.

3.1.12 Ubicación

En la pantalla "Ubicación" de la aplicación móvil se obtienen las coordenadas del daño en el sistema de referencia de coordenadas WGS84 (EPSG: 4326). El usuario debe activar los servicios de ubicación del dispositivo móvil, asegurarse de que este cuente con una conexión a Internet y mantenerse en un punto fijo para solicitar esta acción mediante el botón "Coordenadas". Una vez llevado a cabo este paso la aplicación muestra en pantalla los datos separados en latitud y longitud, como se aprecia en la Figura 16.

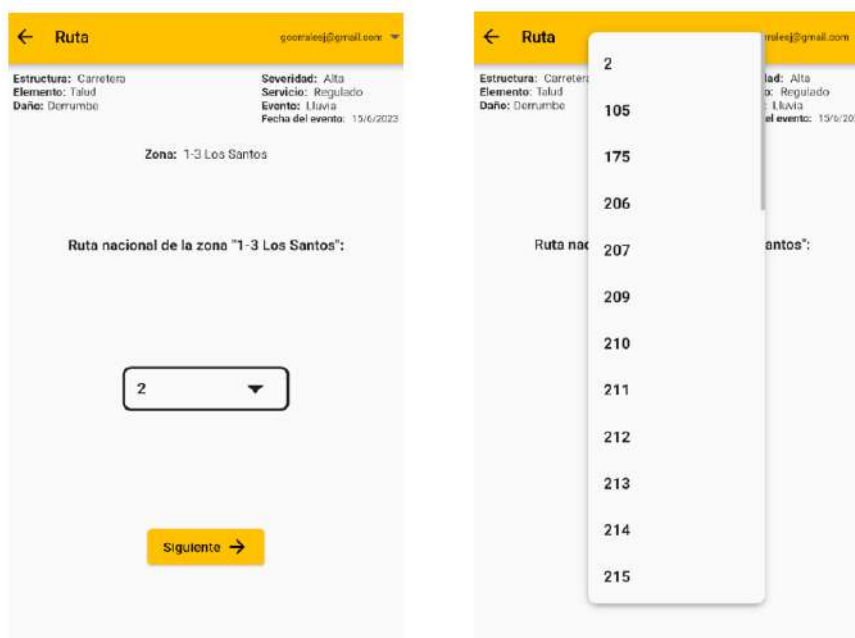


Figura 14: Pantalla de selección de la ruta nacional según la zona de conservación vial.

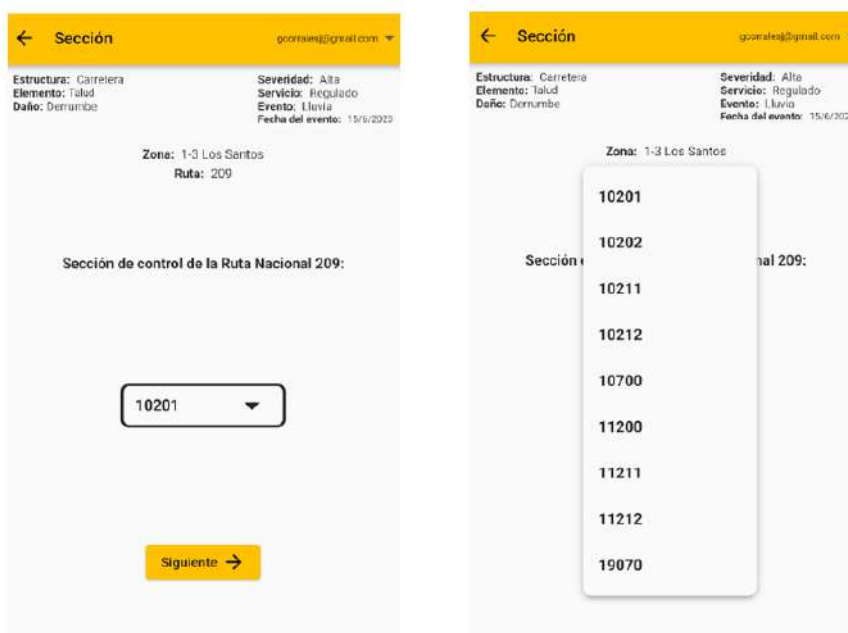


Figura 15: Pantalla de selección de la sección de control según la ruta nacional.

La exactitud de esta ubicación dependerá de la conexión a Internet y de elementos de la tecnología propia de cada dispositivo móvil. La aplicación permite repetir este paso en caso de ser necesario, antes de avanzar a la última pantalla donde se tiene la opción de realizar observaciones generales y guardar el reporte, para lo cual también es necesaria la conexión a Internet del dispositivo móvil.

← Ubicación gcorralesj@gmail.com

Estructura: Carretera
Elemento: Talud
Daño: Derrumbe

Severidad: Alta
Servicio: Regulado
Evento: Lluvia
Fecha del evento: 15/6/2023

Zona: 1-3 Los Santos
Ruta: 209
Sección: 19070

Ubicación:

Sin datos

Coordenadas 📍

Debe activar los servicios de ubicación y mantenerse en un punto fijo para obtener sus coordenadas.

De aquí en adelante se requiere conexión a Internet

← Ubicación gcorralesj@gmail.com

Estructura: Carretera
Elemento: Talud
Daño: Derrumbe

Severidad: Alta
Servicio: Regulado
Evento: Lluvia
Fecha del evento: 15/6/2023

Zona: 1-3 Los Santos
Ruta: 209
Sección: 19070

Ubicación:

Latitud: 10.7009, Longitud: -84.4276

Coordenadas 📍

Siguiente →

De aquí en adelante se requiere conexión a Internet

Figura 16: Pantalla del proceso de ubicación con coordenadas geográficas.

3.1.13 Observaciones

La pantalla “Observaciones” es la última de la aplicación móvil (Figura 17). Cuenta con un espacio donde se puede introducir como máximo 254 caracteres de texto para que el usuario realice observaciones y comentarios generales como la descripción del daño, particularidades del evento, complicaciones de la visita de campo o la descripción coloquial de la ubicación del sitio. Estas observaciones son opcionales, no necesariamente deben ser completadas en todos los casos, sino que se deja a criterio del usuario.

← Observaciones gcorralesj@gmail.com

Estructura: Carretera
Elemento: Talud
Daño: Derrumbe

Severidad: Alta
Servicio: Regulado
Evento: Lluvia
Fecha del evento: 15/6/2023

Zona: 1-3 Los Santos
Ruta: 209
Sección: 19070
Latitud: 10.7009, Longitud: -84.4276

Observaciones y comentarios generales:

Máximo 254 caracteres

Nombre coloquial del sitio 254 caracter(es)

Cantidad de fotos: 2

Guardar

← Observaciones gcorralesj@gmail.com

Estructura: Carretera
Elemento: Talud
Daño: Derrumbe

Severidad: Alta
Servicio: Regulado
Evento: Lluvia
Fecha del evento: 15/6/2023

Zona: 1-3 Los Santos
Ruta: 209
Sección: 19070
Latitud: 10.7009, Longitud: -84.4276

Observaciones y comentarios generales:

Derrumbe de material rocoso a la altura de Tarbaca, cerca del río Puroshotum, frente al Bar "Un Zarpecito". Paso regulado por oficiales.

Nombre coloquial del sitio 118 caracter(es)

Cantidad de fotos: 2

Guardar

Figura 17: Pantalla para el ingreso de observaciones del reporte.

Por tratarse de la última pantalla de la aplicación, en ella se incluye el botón de "Guardar", mediante el cual se finaliza el reporte. La aplicación entonces consulta al usuario si desea realizar otro reporte o salir de la aplicación.

Al finalizar cada reporte la información es almacenada en la nube mediante los servicios de *Firebase* y se actualiza la aplicación web de visualización, que se explica a continuación.

3.2 Aplicación web de visualización

La aplicación web de visualización de los daños reportados en la RVN consiste en un tablero de control desarrollado a partir de *Shiny*, el paquete de *R* que incluye funcionalidades espaciales a través de la biblioteca *Leaflet*.

A esta aplicación se accede desde un enlace URL y está diseñada para su uso en computadoras, por las dimensiones de pantalla requeridas y por la necesidad de manejo desde un *mouse* o ratón para aprovechar de manera óptima sus funcionalidades. Por lo tanto, no se recomienda su utilización en dispositivos con pantallas de tamaños similares a los disponibles en los teléfonos móviles de uso convencional actual.

El tablero o *dashboard* de esta aplicación cuenta con un mapa de ubicación donde los daños se representan como puntos, una tabla de registros de los daños y un menú de selección de filtros que se encuentran en función de datos de los reportes de daños, como muestra la Figura 18. Estos tres componentes son consistentes entre sí, es decir, cuando se aplica uno de los filtros, el resultado se refleja mediante la modificación de los puntos mostrados en el mapa de ubicación y en la tabla de registros.

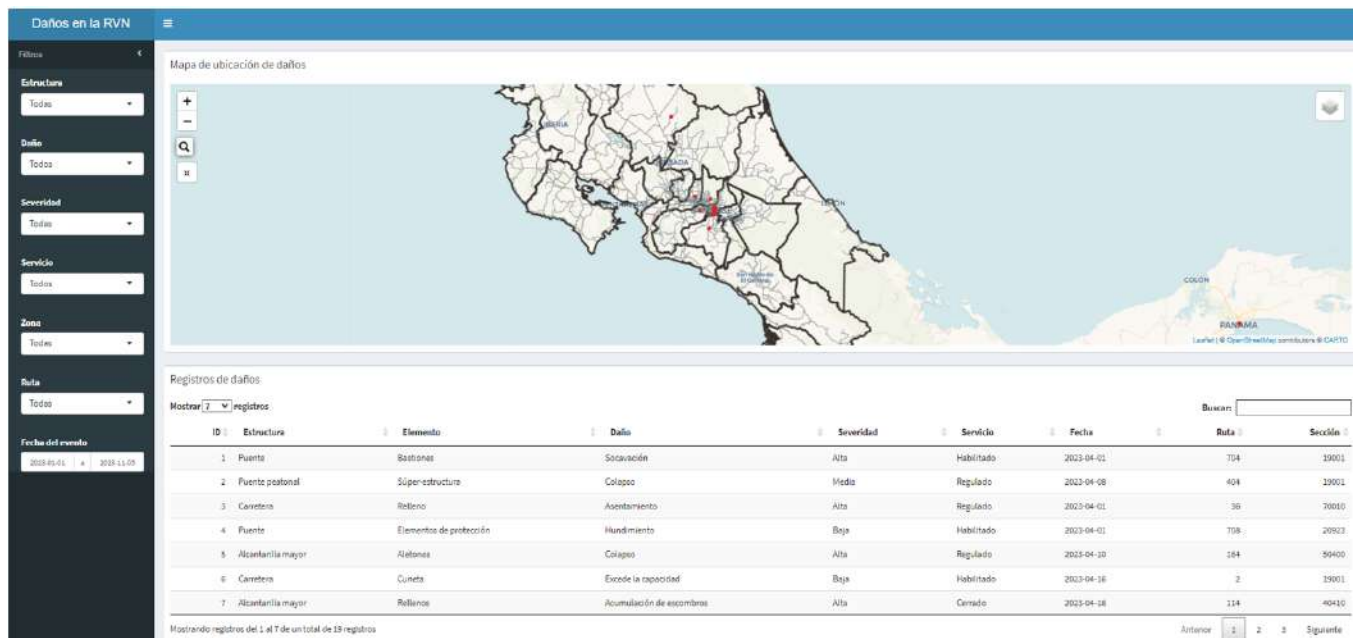


Figura 18: Tablero de control de daños en la RVN.

3.2.1 Mapa de ubicación de los daños

El mapa de ubicación de los daños consiste en un mapa base cuyo sistema de referencia de coordenadas es el WGS84 (EPSG: 4326), sobre el cual se superponen las tres capas vectoriales: la capa de polígonos de

las zonas de conservación vial, la capa de líneas de la RVN y la capa de puntos con los daños reportados en la RVN.

La capa de polígonos se utiliza para resaltar en el mapa los límites de las zonas de conservación vial; la de líneas para resaltar las rutas que forman parte de la RVN y cuyo número de ruta se despliega en una etiqueta personalizada al colocar el cursor sobre la línea; y la capa de puntos para representar los daños reportados desde la aplicación móvil.

En la Figura 19 se puede apreciar un punto cercano al límite entre dos zonas de conservación vial (la 1-1 y la 1-3), la etiqueta desplegada con el número de ruta (en este ejemplo la Ruta Nacional 2) y de fondo la información geográfica aportada por el mapa base *Voyager* del proveedor *CartoDB* (plataforma que provee mapas en línea y otras herramientas geográficas), al cual se tiene acceso gratuitamente mediante el uso del paquete *leaflet*.

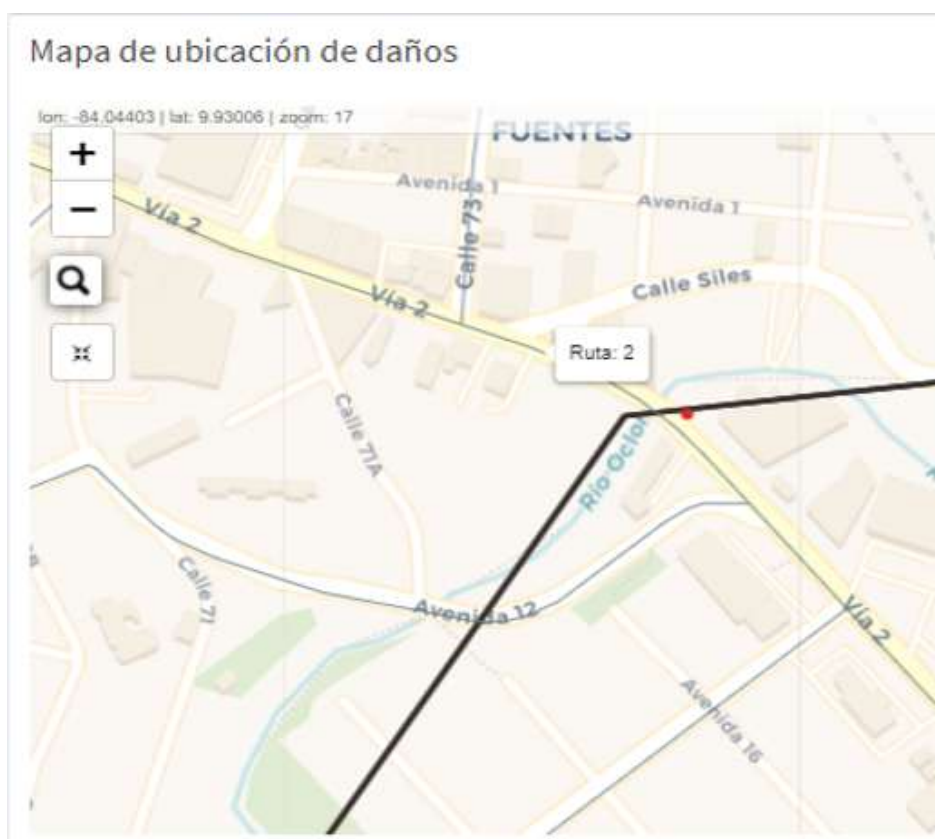


Figura 19: Ubicación de daños sobre mapa base *Voyager*.

En la esquina superior izquierda del mapa de ubicación de daños se indican las coordenadas geográficas de los puntos por donde se desplaza el cursor del ratón. Adicionalmente, cuenta con distintos botones como los de *zoom*, que permiten acercarse o alejarse del mapa; el botón para regresar a la vista inicial del mapa con el nivel de *zoom* y la ubicación inicial definidos previamente (en este caso el punto de coordenadas con longitud -84.08 y latitud 9.83, en el centro de Costa Rica, y un nivel de *zoom* igual a 8); y el botón de búsqueda que permite el ingreso de ubicaciones o direcciones de referencia para su búsqueda en las bases de datos de OpenStreetMap.

Voyager se utilizó como mapa base predeterminado en el tablero, dada la legibilidad y comprensión de los datos que le aporta su estilo moderno y limpio. Sin embargo, en el tablero se implementó un control de

combinaciones de filtros, cuyos resultados en todos los casos se actualizan y se ven reflejados en la cantidad de puntos rojos del mapa de ubicación de daños y en la cantidad de registros de la tabla de daños. Esta tabla de registros se explica a continuación.

3.2.3 Tabla de registros de los daños

La tabla de registros de los daños es una herramienta de apoyo en el tablero de la aplicación web (ver Figura 18). Esta tabla está compuesta por nueve columnas: ID, Estructura, Elemento, Daño, Severidad, Servicio, Fecha, Ruta y Sección. Ocho de estas variables corresponden a datos de los daños reportados en la aplicación móvil, mientras que la primera de ellas, ID, corresponde a un número consecutivo generado por el sistema en cada reporte.

El usuario del tablero puede ordenar los registros de la tabla por columna de manera ascendente o descendente y solo por una de sus columnas a la vez. De manera predeterminada la tabla de registros de daños se agrupa en un máximo de 7 registros. Sin embargo, este número máximo puede aumentar a 10, 25, 50 o 100 registros, según las preferencias del usuario del tablero.

La tabla de registro es una herramienta de complemento para la visualización de daños, ya que no puede ser descargada por el usuario para gestionar, analizar o manipular los datos en procesos posteriores.

Sin embargo, el SIG desarrollado en este proyecto permite la descarga de la capa geográfica de puntos en formato *GeoJSON* generada a partir del reporte de los daños en la aplicación móvil.

3.2.4 Descarga del archivo *GeoJSON*

El archivo *GeoJSON* generado del reporte de los daños se almacena en la carpeta "capa" de *Firebase Storage* y puede ser descargado de su enlace URL en el sistema de referencia de coordenadas WGS84 (EPSG: 4326).

De esa manera es posible para el usuario el manejo de la capa de puntos en un software de información geográfica como *QGIS* y con ello el aprovechamiento de todas sus funcionalidades en el manejo de datos. La tabla de atributos de esta capa cuenta con una mayor cantidad de información que la tabla de registros de daños de la aplicación web de visualización.

Adicionalmente, la descarga de la capa hace posible la exportación a otros formatos de archivo para su uso y manipulación en diferentes tipos de software, como los de hojas de cálculo, en formatos con extensiones *.xlsx* o *.ods*, lo cual facilita la generación de gráficos a partir de la información de los daños en la RVN, por ejemplo.

4 Discusión

Esta discusión abordará tres puntos importantes en el desarrollo del sistema: 1) el mejoramiento de procesos, 2) la comparación con otras herramientas existentes y 3) las limitaciones del sistema.

4.1 Mejoramiento de procesos

Luego de detectada la necesidad del registro, por parte del CONAVI, de los daños en la Red Vial Nacional producto de eventos naturales, se inició en la Institución un proceso de registro dividido en tres etapas: 1) las visitas de campo, 2) la digitalización y agrupación de la información, y 3) la creación o actualización de capas de información geográfica.

En la primera etapa, la toma de datos de campo consistía en la toma de fotografías de los daños y su entorno; la ubicación de los puntos en coordenadas geográficas, mediante el uso de dispositivos GNSS (Sistemas Globales de navegación satelital, por sus siglas en inglés); y la elaboración de notas en papel con los datos que se consideraban necesarios.

En una segunda etapa del proceso, los datos en papel posteriormente se digitalizaban, haciendo uso de tablas creadas en hojas de cálculo. De esta manera era posible integrar la información de cada reporte de daños: fotografías, ubicación y datos de texto.

Una vez se disponía de la información integrada, en la tercera y última etapa era posible generar o actualizar capas de información geográfica. Estas capas se manejaban en formato *shapefile*, el más tradicional en el ámbito SIG.

El proceso descrito no solamente es ineficiente e implica retrabajo para el personal, sino que es susceptible a errores humanos en cualquiera de sus etapas. Esta situación permitió identificar la necesidad de contar con un proceso automatizado que mejorara eficacia y eficiencia, y, por lo tanto, dio origen al desarrollo del sistema expuesto en este artículo.

Como resultado del desarrollo de este sistema, las tres etapas en que se dividía el proceso de registro de daños fueron automatizadas en una sola actividad consistente en la visita al sitio y el uso de un dispositivo con la aplicación móvil instalada, mediante la cual se realiza todo el proceso, pero que además añadió una cuarta etapa, también automatizada, para publicar la información en un visor web.

Por lo tanto, el proceso se simplificó considerablemente y los objetivos de eficacia y eficiencia se alcanzaron en el desarrollo de este sistema, el cual está planteado para dos tipos distintos de usuarios: los usuarios de la aplicación móvil que toman datos de campo y los usuarios del visor web, que por lo general realizan trabajo de oficina.

Lo anterior no implica que los usuarios de campo no puedan serlo también del visor web, ya que el acceso a este puede ser inclusive de uso público. Este es un asunto que quedará a criterio de la Institución. Sin embargo, en este artículo se incluye el siguiente enlace, a manera de ejemplo, de un visor con los datos obtenidos en la etapa de registro de reportes de prueba (ver Sección 2.6):

<https://gabriel-corrales.shinyapps.io/danosRVN/>

Adicionalmente, se comparte otro enlace que permite la descarga de la capa de puntos en formato GeoJSON utilizada en el visor web de muestra:

https://firebasestorage.googleapis.com/v0/b/registros01-cd58a.appspot.com/o/capa%2Fdanos_wgs84.geojson?alt=media

De manera análoga el CONAVI podrá realizar la descarga de la capa con los datos oficiales. Esta capa puede ser manipulada en software de información geográfica como *QGIS*, lo que permite la consulta de la tabla de atributos y además su exportación a archivos de hojas de cálculo con formato *.xlsx* o *.ods* (típicamente para ejecutarse en *Microsoft Excel*), de manera que posteriormente es posible un fácil filtrado de la información, la generación de estadísticas, gráficos y otras funcionalidades disponibles en las hojas de cálculo.

Por lo tanto, el sistema brinda herramientas adicionales al personal del CONAVI involucrado en diferentes niveles con la planificación institucional, desde los analistas hasta los tomadores de decisiones, esto mediante el uso de software gratuito.

Llegado a cierto nivel de almacenamiento, los servicios en la nube dejan de ser gratuitos, sin embargo, y como se menciona en las conclusiones, los cobros son completamente accesibles una vez superado ese límite, para lo cual será necesario realizar primero alrededor de 3000 registros de daños de manera gratuita.

4.2 Otras herramientas existentes

Actualmente existe software que permite la creación de formularios para la toma de datos de campo que tienen características similares al sistema desarrollado en este proyecto, algunos en software gratuito como *QField*. Sin embargo, en todos los casos se requiere personal con cierto grado de especialización, tanto para generar los formularios como para manipular sus resultados.

Adicionalmente, los ejemplos más completos y que permiten llegar hasta la etapa en que se genera un visor web de manera automatizada, como *Survey123* o *ArcGIS Collector* de *ESRI*, que permiten la recopilación y actualización de información en el campo con o sin conexión ([Morales, 2020](#)), son aplicaciones con licencias comerciales que requieren una inversión considerable por parte de las instituciones y adicionalmente presentan desventajas en relación con el sistema desarrollado para el caso de estudio, como un número limitado de usuarios, cobros proporcionales a su utilización y la necesidad de instalación de aplicaciones pesadas en los dispositivos móviles para ejecutar los formularios.

El SIG presentado en este artículo fue desarrollado para ajustarse de manera personalizada a las necesidades de registro de daños en la institución y, además de ser gratuito, cuenta con las siguientes ventajas o características:

- Una interfaz de usuario sencilla y amigable.
- No existe un límite de cantidad de usuarios y permite la trazabilidad, ya que en cada reporte se identifica su autor.
- Las fotografías generadas por la aplicación son optimizadas mediante un proceso que reduce el peso de los archivos, pero conserva la calidad de las imágenes.
- Cuenta con un mecanismo automatizado de envíos por correo al crear cada reporte con todos los datos y fotografías, para informar tanto al usuario de campo como al personal de oficina sobre el nuevo punto registrado.
- La aplicación es liviana, tiene un peso aproximado de 8 MB.
- La capa de puntos puede descargarse de una manera sencilla a través de una URL.
- El formato de la capa de puntos *GeoJSON* cuenta con ventajas sobre los *shapefile*, como se explica en las conclusiones.

4.3 Limitaciones

La principal limitación en el uso de este sistema es que la aplicación móvil puede ser instalada únicamente en dispositivos que funcionen sobre la base del sistema operativo *Android* que deben tener conexión a Internet.

5 Conclusiones

- Se programó una aplicación móvil para el registro en campo de los daños en la RVN causados por eventos naturales, siguiendo una estructura de datos de acuerdo con los requerimientos del sistema definidos por el CONAVI y la información de la capa geográfica de la RVN actualizada por esa institución en noviembre de 2022.
- El almacenamiento de los datos registrados en la aplicación móvil de registro de datos de campo se llevó a cabo mediante el servicio en la nube de la plataforma *Firebase*, que ofrece un nivel gratuito de utilización de sus servicios, así como también planes de pago para acceder a características adicionales y capacidades avanzadas. En relación con el almacenamiento de datos, *Firebase* pone a disposición de sus usuarios el servicio *Storage* sin costo hasta los 5 GB. A manera de comparación, la aplicación gratuita para levantamiento de datos de campo *Input*, permite solamente 100 MB sin costo en su servicio de almacenamiento en la nube
- Con el fin de aumentar el aprovechamiento del uso gratuito del *Storage*, así como de reducir los costos por almacenamiento una vez superados los 5 GB, se implementó un proceso de optimización de las imágenes capturadas en la aplicación móvil de registro de daños en la RVN, a través de la extensión *Resize Images* de *Firebase*. De acuerdo con los resultados de la etapa de registro de reportes de prueba, descrita en la metodología (ver Sección 2.6), las imágenes optimizadas se reducen a menos de 150 kB.
- El máximo espacio requerido en *Storage* por cada reporte de daños, considerando el límite de 10 fotografías permitidas por la aplicación móvil, sería de alrededor de 1,5 MB. Por lo tanto, se puede estimar de manera conservadora que este SIG podría llegar a los 3000 registros sin superar los 5 GB de almacenamiento, que es el límite del nivel gratuito, a partir del cual se debe pagar 0.026 dólares estadounidenses por cada GB adicional.
- Para la visualización de la información obtenida en campo de los daños en la infraestructura de la RVN causados por eventos naturales, se implementó una aplicación web mediante el paquete *Shiny* de R. Esta aplicación consiste en un *dashboard* o tablero que se ejecuta desde servidores del sitio *shinyapps.io* de manera gratuita, y que se compone de tres elementos: un mapa de ubicación de los daños, un menú de selección de filtros y una tabla de registro de los daños.
- El mapa de ubicación de los daños de la aplicación web de visualización cumple con los requisitos cartográficos básicos y de calidad como sencillez, contenido, exactitud, optimización, objetividad, estética, simbología y dinamismo que debe satisfacer la información geográfica publicada en Internet
- La utilización de la capa de puntos en formato *GeoJSON* en este sistema permitió evidenciar algunas de sus ventajas frente al *shapefile*, el formato vectorial de datos espaciales más utilizado tradicionalmente, tales como su facilidad para la publicación de información geográfica en Internet, dado que requiere solamente la manipulación de un único archivo, a diferencia del *shapefile* que consiste en un mínimo de 5 archivos, así como la longitud de las cadenas de texto que pueden ser ingresadas en los campos de atributos, dado que el *shapefile* cuenta con un límite de 254 caracteres por campo, mientras que *GeoJSON* no tiene un máximo establecido.
- Como una función adicional a los requerimientos del sistema definidos previamente por el CONAVI, se implementó el envío por correo electrónico de los reportes de los daños en la RVN realizados en la aplicación móvil.

- El resultado de este proyecto fue el desarrollo de un Sistema de Información Geográfica (visto como tal desde el enfoque de SIG como proyecto) para registrar y visualizar los daños causados por eventos naturales en la infraestructura de la Red Vial Nacional de Costa Rica sin necesidad de pagar por licencias de software.
- El SIG desarrollado en este proyecto funcionará como una herramienta a disposición del CONAVI para la planificación de las intervenciones en la RVN, que facilitará la toma de decisiones enfocadas en evitar la reconstrucción de las vulnerabilidades físicas a partir de la identificación los daños reportados, su magnitud y sus causas, y de esta manera procurar la inversión de los recursos públicos de manera eficiente, priorizada y segura, así como la ejecución de soluciones reales que reduzcan la necesidad de acciones correctivas a futuro, lo que representa un beneficio económico y en términos de seguridad vial para toda la sociedad.

6 Referencias

Acens (2014). Base de datos NoSQL. Qué son y tipos que nos podemos encontrar. Technical report, Acens. Recuperado de: <http://www.acens.com/wp-content/images/2014/02/bbdd-nosql-wp-acens.pdf>.

Bennett, J. (2010). *OpenStreetMap: Be Your Own Cartographer*. Packt Publishing. ISBN: 1847197507, 9781847197504.

del Bosque González, I., Fernández Freire, C., Martín-Forero Morente, L., y Pérez Asensio, E. (2012). *Los Sistemas de Información Geográfica y la Investigación en Ciencias Humanas y Sociales*. Confederación Española de Centros de Estudios Locales.

Morales, A. (2020). Las mejores aplicaciones SIG para Android en 2020. Obtenido de: <https://mappinggis.com/2012/08/las-mejores-aplicaciones-sig-para-android/>.

Olaya, V. (2020). *Sistemas de Información Geográfica*. Recuperado de: <https://volaya.github.io/libro-sig/>.

Sommerville, I. (2005). *Ingeniería del software*. Pearson Educación. ISBN: 8478290745, 9788478290741.

Vargas, M. (2021). Programación de Aplicaciones Geoespaciales en R. Obtenido de: <https://tpb728o-programaciongeoespacialr.github.io/2021ii/>.

Younis, W. (2021). What is Firebase? Firebase Tutorials. Obtenido de: <https://firebase.tutorials.com/what-is-firebase/>.

CIENCIAS AERONÁUTICAS

ESTUDIO DE RIESGO OPERACIONAL POR IMPACTO CON AVES Y VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT) EN OPERACIONES AÉREAS OFFSHORE EN LA SONDA DE CAMPECHE, MÉXICO

M.E. Roberto Sánchez Escobar^{1,*}

¹Escuela Nacional de Protección Civil Campus Chiapas

Recibido: 01/Julio/2024

Aceptado: 28/Octubre/2024

DOI: <https://doi.org/10.5377/ce.v15i2.19631>

RESUMEN

Dentro de las operaciones aéreas con helicópteros encontramos las denominadas *Offshore*, que son aquellas que se realizan en altamar, principalmente desde y hacia las plataformas marinas sin olvidar aquellas misiones de rescate o vigilancia en mar adentro o bordeando las costas. En lo relacionado con la seguridad aérea, este tipo de vuelos *Offshore* en la sonda de Campeche, México, son vulnerables ante la presencia de aves y vehículos aéreos no tripulados por lo que es necesario contar con un estudio de riesgo operacional profundo que ponga de manifiesto su ocurrencia y causalidad para la toma de decisiones organizacionales como medida preventiva. Bajo un análisis de las condiciones actuales en la zona se aborda el fenómeno mediante un proceso de investigación cuantitativa y cualitativa tomando como referencia a los actores principales del peligro detectado, por lo que contando con la colaboración de una aerolínea mexicana con operaciones *Offshore* se ha acordado mantener confidencial su razón social para contar con un grado de objetividad de los datos obtenidos y poder sugerir alternativas de solución efectivas. A lo largo del estudio se ofrecen datos que han sido obtenidos tanto del operador como por el Estado mexicano a través de su autoridad nacional de aviación civil y, el análisis de los datos recabados permiten dimensionar el peligro que representan los vehículos aéreos no tripulados, a menudo desconocido por paradigmas tradicionales de la industria nacional; sin embargo, de la información obtenida, también se deduce que es la presencia de aves es la que representa el mayor riesgo por impacto en las operaciones aéreas *Offshore* en la sonda de Campeche, México, con cierto grado de aplicabilidad a otras zonas bajo las mismas características y condiciones ambientales.

Palabras clave: Riesgos operacionales, *Offshore*, Impacto con aves, Vehículo aéreo no tripulado, VANT, Dron, AFAC.

ABSTRACT

Within aerial operations with helicopters, we find those called *Offshore*, which are those that are carried out on the high seas, mainly to and from marine platforms without forgetting those rescue or surveillance missions offshore or along the coasts. In relation to air safety, this type of *Offshore* flights in the Campeche probe, Mexico, are vulnerable to the presence of birds and unmanned aerial vehicles, so it is necessary to have an in-depth operational risk study that reveals its occurrence and causality for organizational decision making as a preventive measure. Under an analysis of the current conditions in the area, the phenomenon is addressed through a quantitative and qualitative research process taking as reference the main actors of the danger detected, which is why, with the collaboration of a

*sanchezescobarroberto@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0001-6059-0338>

Mexican airline with Offshore operations, it has been agreed keep your company name confidential to have a degree of objectivity of the data obtained and to be able to suggest effective alternative solutions. Throughout the study, data is offered that has been obtained both from the operator and by the Mexican State through its national civil aviation authority, and the analysis of the data collected allows us to measure the danger posed by unmanned aerial vehicles, to often unknown by traditional paradigms of the national industry; However, from the information obtained, it is also deduced that it is the presence of birds that represents the greatest risk due to impact on Offshore air operations in the Campeche probe, Mexico, with a certain degree of applicability to other areas with the same characteristics. and environmental conditions.

Keywords: Operational risks, Offshore, Bird strike, Unmanned aerial vehicle, UAV, Drone, AFAC.

1 Introducción

“El proceso teórico en el que se fundamenta la gestión de seguridad: identificación de peligros, evaluación de riesgos y la posterior emisión de medidas de mitigación” (De Santis, 2023) es un proceso que no solo permite tener elevados niveles de seguridad y bajos índices de siniestralidad dentro de la organización, sino que también contribuye en mantener a salvo la vida de tripulantes y pasajeros; conservar la reputación de la empresa; reducir los gastos por altas pólizas de seguros y recuperación de equipos perdidos a consecuencia de accidentes o incidentes sin contabilizar los daños a terceros en su persona y/o propiedad privada.

Para el presente estudio se ha recopilado información directa y fidedigna de las tripulaciones de una aerolínea mexicana con operaciones aéreas *offshore* en la sonda de Campeche, México; con respecto a los riesgos operacionales que pueden vulnerar sus vuelos en helicóptero por la simple presencia de aves o vehículos aéreos no tripulados (VANT), mejor conocidos como drones.

Dado al crecimiento en el gasto de inversión a finales del 2022 en la cadena de producción de petróleo, de acuerdo con información del Banco de México (Pineda, 2023), se determina la sonda de Campeche como zona de estudio dado al número de empresas que operan en la zona y utilizan aeronaves de ala rotativa para diversas actividades de logística y suministros de personal, equipos, insumos, entre otras (Figura 1) y pueden representar alto interés en la utilización de drones para los mismos fines.

En contrate con los datos públicos de la Agencia Federal de Aviación Civil (AFAC) se analiza el riesgo que representa para las operaciones aéreas la presencia de aves y VANT bajo la perspectiva de dicha autoridad de aviación civil mexicana. El estudio se realiza con orientación en Gestión de la Seguridad Operacional (SMS por sus siglas en inglés) y metodología de gestión de riesgos para sugerir alternativas objetivas de solución en la mitigación de riesgos frente a este peligro por la operación en tierra firme, alta mar y zona costera del Golfo de México.

2 Metodología

Durante el proceso de investigación, se ha empleado una metodología mixta que incluye tanto investigación cualitativa como cuantitativa, así como investigación documental. Se utilizaron diversos instrumentos para la recolección de información, como cuestionarios en línea, entrevistas, documentos de archivo de fuentes gubernamentales y análisis de contenido.

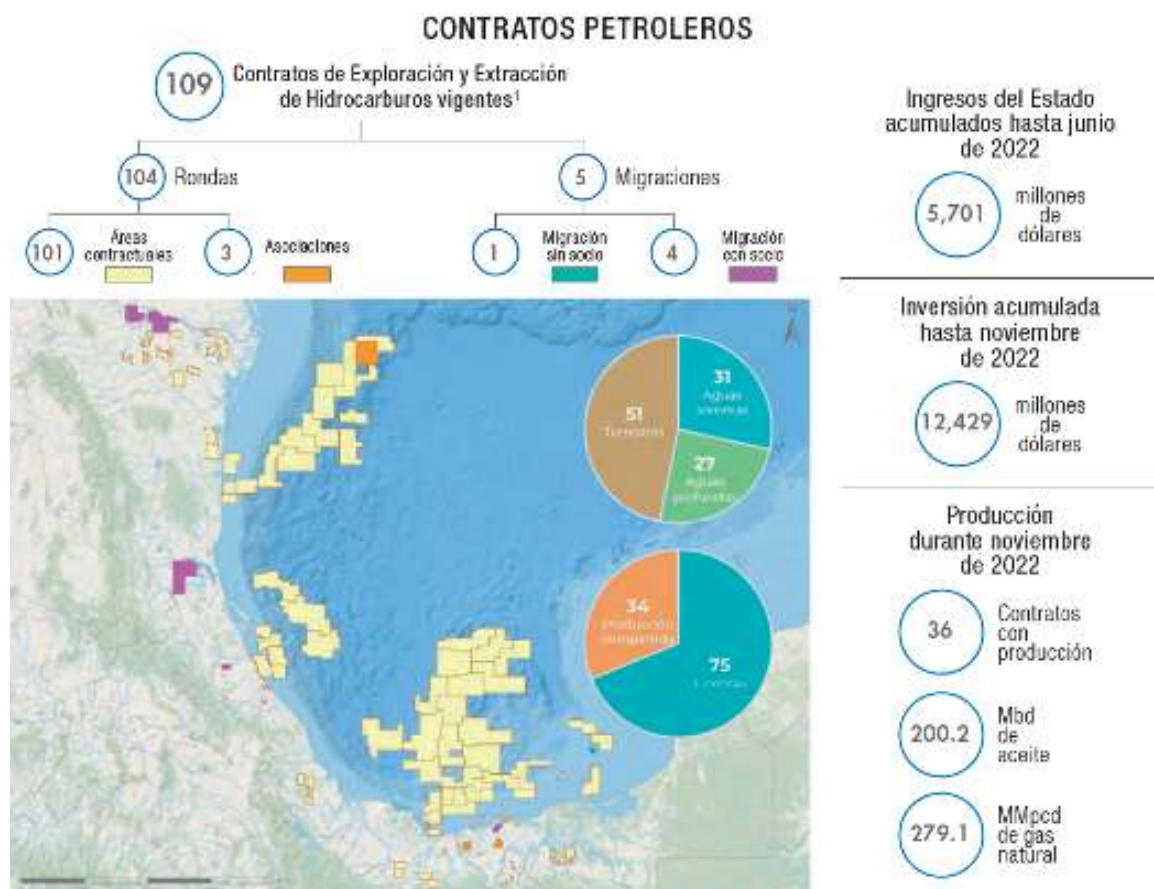


Figura 1: Contratos petroleros en México. Fuente: Oportunidades para la cadena de valor de la industria petrolera en México. Modern Machine Shop México.

Esto permitió determinar mediante la sistematización de procesos si los vehículos aéreos no tripulados (drones) o las aves representan riesgos para la seguridad operacional y en qué grado, considerando la ocurrencia de incidentes o accidentes relacionados con estos peligros. Los resultados se compararon con los estándares de la autoridad de aviación civil en México y se contrastaron con las estadísticas emitidas por la Agencia Federal de Aviación Civil (AFAC).

Se han obtenido datos a través de la plataforma nacional de transparencia de México de su sitio web: <https://www.plataformadetransparencia.org.mx/> como fuente de información pública de datos abiertos.

3 Resultados

La aerolínea mexicana en estudio mantiene operaciones *Offshore* y cuenta con 70 pilotos para estas. Un total de 26 de ellos han participado en el proceso del cuestionario *on line* por lo que se tiene que el universo en análisis corresponde al 37.14 % de su plantilla total y quienes son poseedores de las licencias de: a) piloto comercial ala rotativa (24), b) piloto privado ala rotativa (uno) y c) piloto aviador privado ala fija (uno).

Con base en la población de pilotos de helicóptero que integran la aerolínea y en relación con el total de participantes que contestaron el cuestionario es que podremos obtener la tasa de respuesta a través de

una simple regla de tres, siendo esta:

$$T_R = \frac{(Población\ participante)(100\ %)}{(Población\ total)}$$

$$T_R = \frac{(26)(100\ %)}{(70)}$$

$$T_R = 37.14\ \%$$

En este estudio cuantitativo, se aplicó una encuesta a un universo de 70 individuos. De estos, 26 respondieron, lo que representa una tasa de respuesta del 37.14 %. La muestra de 26 individuos fue evaluada para asegurarse de que es representativa del universo total en términos de la variable clave como el control del vuelo de la aeronave (primero o segundo al mando), lo que nos hace considerar ser adecuado para obtener estimaciones razonables con mayor nivel de confianza y resultados significativos para la investigación. De las 26 personas que dieron respuesta a la encuesta, 23 de ellos llevaban el control de la aeronave.

La tasa de respuesta y el tamaño de muestra fueron considerados suficientes para los objetivos de este estudio, con un nivel de confianza del 95 % y un margen de error del 10 %. Se reconocen las limitaciones potenciales debidas al error de muestreo y se toman en consideración para posteriores estudios.

La autoridad de aviación civil en México señala haber emitido desde 2010 al 15 de febrero de 2024 un total de 4,222 licencias de piloto comercial ala rotativa (Figura 2) de las que actualmente se tiene un total de 506 licencias vigentes que, comparado con las licencias de piloto de VANT (622) en categorías pequeño y grande se puede apreciar que existen más pilotos de VANT para 2023 que pilotos comerciales de ala rotativa (Figura 3).

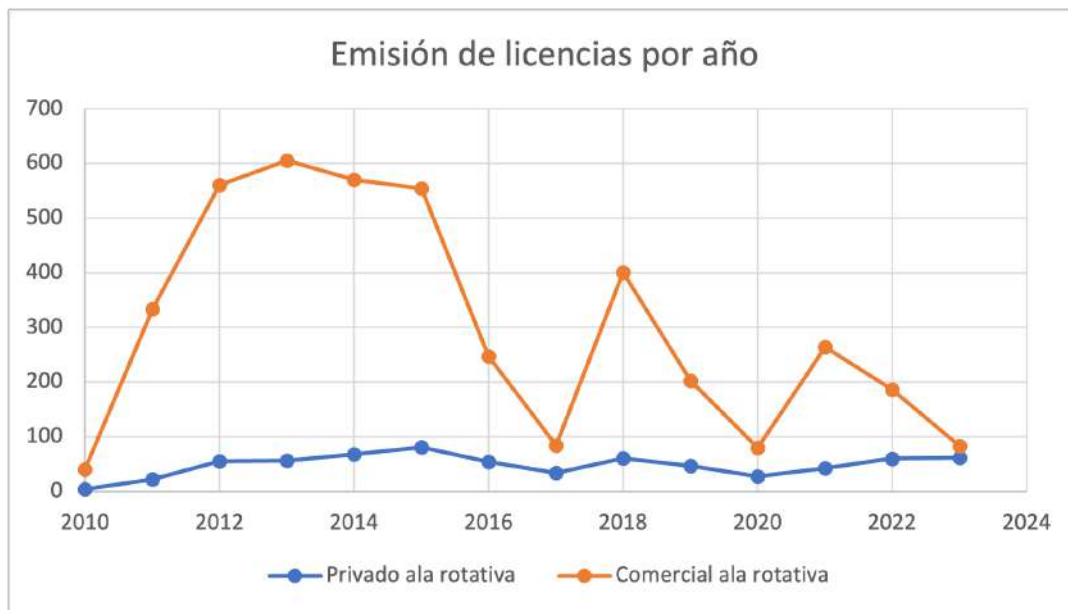


Figura 2: Emisión de licencias de ala rotativa según datos de la AFAC en el periodo 2010-2024

Con estos datos podemos determinar que el 88 % de las licencias de piloto comercial ala rotativa emitidas desde el 2010 a 2023 no fueron renovadas por sus titulares, sin profundizar en este análisis los motivos

que tuvieron sus poseedores para ello. Esta condición es alarmante para el desarrollo de la aviación de helicópteros en México, crecimiento de las empresas actuales y creación de nuevos emprendimientos en donde esta aeronave pueda contribuir en diversas tareas.

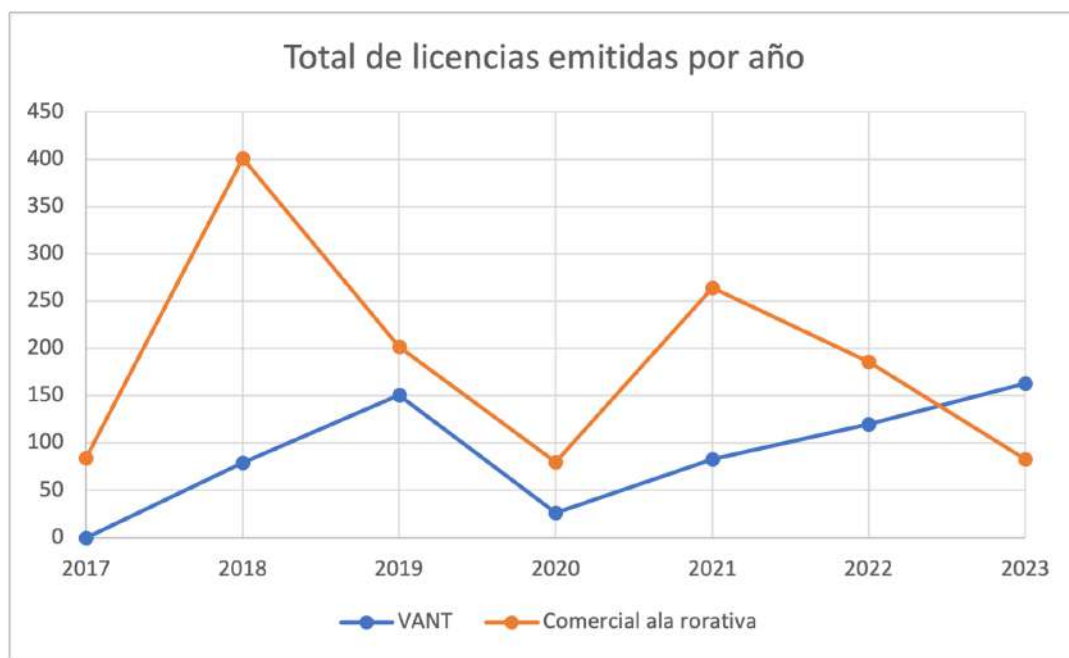


Figura 3: Comparación de licencias emitidas por año de ala rotativa y VANT según datos de la AFAC en el periodo 2017-2023 sin considerar la cantidad de licencias vigentes de ambos tipos.

De acuerdo con datos obtenidos de licencias de piloto comercial de ala rotativa contra la cantidad de pilotos de la Aerolínea mexicana con operaciones *Offshore* bajo estudio y que han contribuido en la resolución del cuestionario *on line*, tenemos que estos representan un 5.13 % del universo de pilotos comerciales de helicóptero activos en México.

A partir de 2017 el fenómeno VANT tuvo un crecimiento importante el cual se vio mermado con la irrupción de la declaratoria de pandemia de marzo de 2020 generada por el virus SARS-CoV2 (COVID-19) como se aprecia en las Figuras 2 y 3, pero fue recuperado a partir del 2020. Este efecto representó una pausa en diversas actividades comerciales, técnicas, políticas y sociales pero que se han ido recuperando al paso del tiempo.

El uso de VANT entre la población civil presenta un ligero crecimiento como se puede apreciar en la Figura 4 en la que se considera única y exclusivamente aquellos que fueron registrados ante la autoridad de aviación civil en México (AFAC) pero posterior a la pandemia este ha ido disminuyendo, por el contrario, los VANT para uso comercial presentan un repunte para el 2022, teniendo en el espacio aéreo un universo de 5,189 registros en sus tres categorías, siendo la de uso comercial la de mayor cantidad de registros al llegar a los 2,840 vehículos aéreos no tripulados (Figura 4).

Mediante entrevista en tiendas y centros comerciales a los proveedores de VANT en México (conocidos popularmente como drones) se obtienen resultados de coincidencia en que esta disminución de ventas en aquellos para uso recreativo se da principalmente por la poca duración de sus baterías lo que los lleva a poco tiempo de vuelo que pueden disfrutar contra los altos precios de comercialización en el mercado.

De los 26 pilotos de la Aerolínea mexicana con operaciones *Offshore* que ofrecen respuesta al cuestionario se tiene que 23 de ellos realizan funciones como piloto al mando (PIC por sus siglas en inglés), mientras que tres de ellos actúan como segundo al mando (SIC por sus siglas en inglés), lo que ofrece un mayor grado de objetividad frente a los riesgos en estudio.

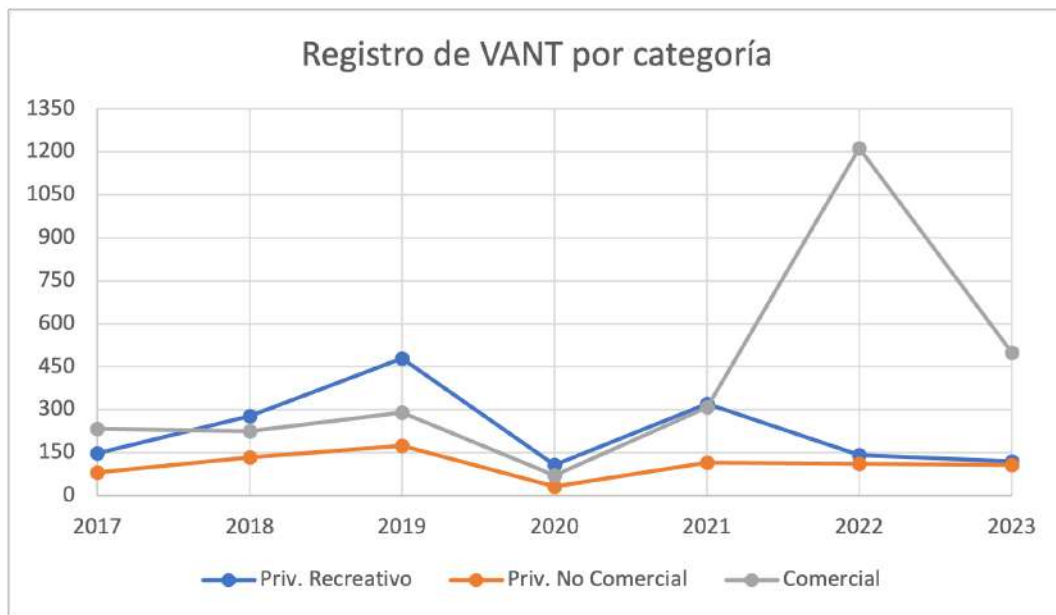


Figura 4: Registro de vehículos aéreos no tripulados por categoría de 2017 a 2023 de acuerdo con datos de la AFAC.

Durante los vuelos asignados en los últimos cinco años, estas tripulaciones en 15 ocasiones han observado algún tipo de VANT volar cerca de su aeronave en las diversas fases del vuelo que comprende una operación aérea¹ y que no han sido objeto de algún incidente con estos más que la cercanía entre aeronaves (Figura 5).



Figura 5: Avistamiento de VANT por tripulaciones de la Aerolínea en diferentes fases de vuelo en porcentaje.

¹Para este análisis las fases de vuelo que han sido consideradas como objeto de estudio son: despegue, ascenso, vuelo recto y nivelado, durante la operación designada, descenso, aproximación, aterrizaje, rodaje y en plataforma.

Dentro de estos avistamientos presenciados por las tripulaciones de la Aerolínea se cita el desarrollo de ejercicios con drones por parte de la Secretaría armada de México en las costas de Veracruz y en otro evento en la toma de fotografías cercano al aeropuerto. Cinco pilotos de la Compañía reconocen que colegas han tenido algún incidente con VANT.

La AFAC registra un total de 304 accidentes y 964 incidentes en el periodo comprendido entre 2015 y 2019 (Figura 6). De estos accidentes 269 se encuentran en proceso de dictaminar sus causas y factores contribuyentes (Figura 7).

Mientras que los registros señalan haberse presentado 964 incidentes, solamente se cuenta con dos registros por impacto contra VANT y, en lo concerniente a impactos con fauna (aves) se cuentan 112 entre 2015 y 2019 (Figura 8) de acuerdo con la autoridad de aviación civil mexicana.

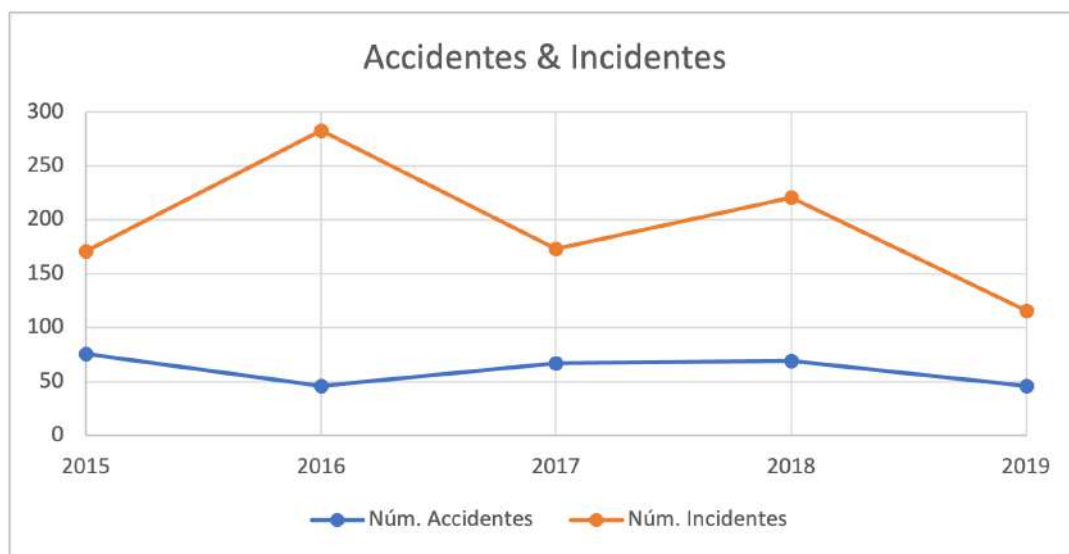


Figura 6: Registro de accidentes e incidentes de aviación del periodo con base en datos proporcionados por AFAC.



Figura 7: Avances en la dictaminación de accidentes y emisión de reportes finales con base en datos proporcionados por la autoridad de aviación civil en México (AFAC).

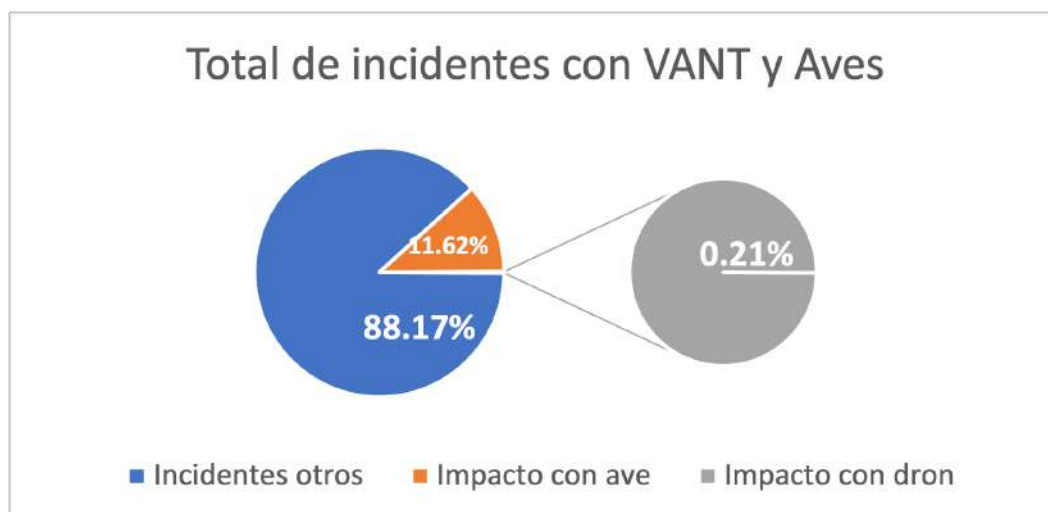


Figura 8: Incidentes del periodo 2015-2019 registrados en los que se involucran impactos contra ave y VANT con base en datos proporcionados por la AFAC.

Respecto de estos registros, para el mejor entendimiento de las condiciones en que se presentaron se tiene que el mayor índice es en las operaciones de transporte público regular (Figura 9), mientras que para el caso de helicópteros única y exclusivamente se cuenta con el registro de dos eventos, uno como transporte público regular y otro como taxi aéreo, desconociéndose la fase en la que se presentaron tal como se describen en la Tabla 1.

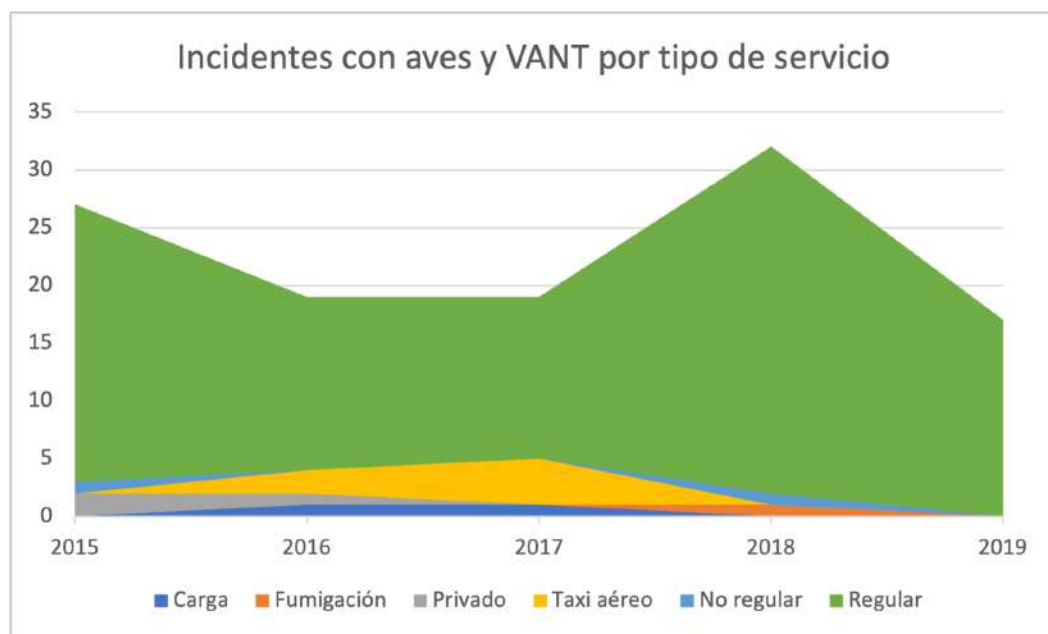


Figura 9: Incidentes del periodo 2015-2019 registrados por tipo de servicio en los que se involucran impactos contra ave y VANT con base en datos proporcionados por la AFAC.

Las entidades federativas de México con mayor registro en el número de impactos con ave son los Estados de Chiapas, Guanajuato, Quintana Roo y Zacatecas, lo que representa un 52.68 % del total en la República mexicana, convirtiéndose en un gran foco de atención por parte de la industria y autoridad de aviación civil mexicana.

Tabla 1: Eventos por impacto contra ave en helicópteros que cuentan con reporte final derivado del proceso de investigación de accidentes e incidentes de aviación de acuerdo con información de la AFAC para el periodo 2015-2019.

Fecha	Matrícula	Marca de la aeronave	Razón social	Entidad federativa	Causas probables
01/05/2016	XA-TVP	Airbus Helicopter	Transportes aéreos Pegasus S.A. de C.V.	Tamaulipas	Regreso a estación de origen (MAM) debido a que una parvada impactó contra una aeronave dañando la cubierta de la transmisión principal
06/10/2016	XA-BFA	Bell Helicopter	Aeroservicios Especializados S.A. de C.V.	Morelos	Impacto de ave contra parabrisas ocasionando la fractura de las micas de parabrisas de la cabina de pilotos

Por su parte, el Estado de Campeche como área de injerencia para el estudio, mantiene el 0.89 % del total de eventos registrados por impacto contra ave, siendo la entidad en donde la Aerolínea con operaciones *Offshore* conduce sus operaciones aéreas (Figura 10).

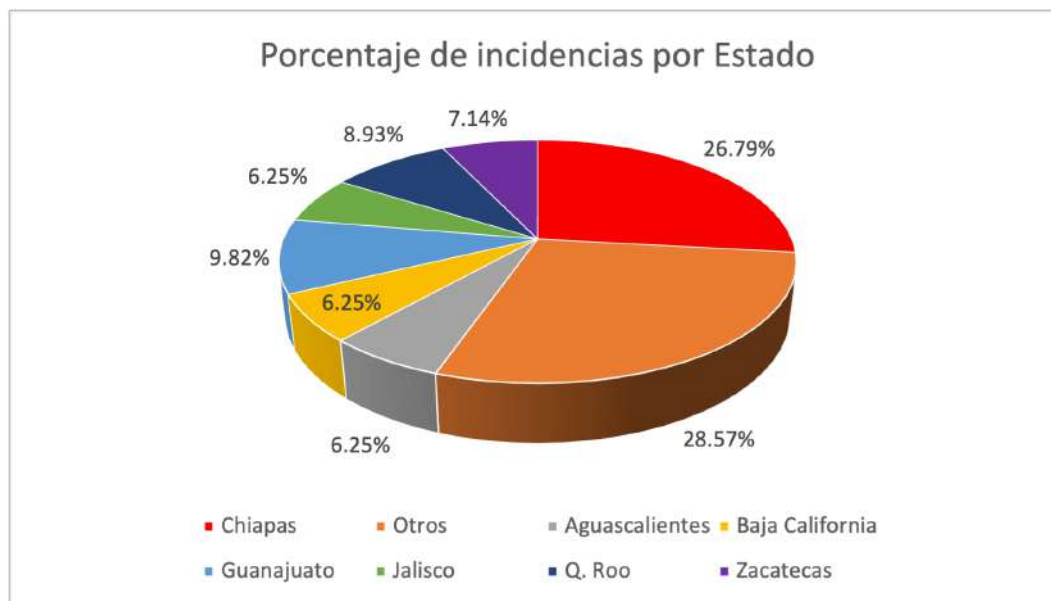


Figura 10: Incidentes con aves por entidad federativa del periodo 2015-2019 de acuerdo con datos de la AFAC.

En lo relacionado con la presencia de aves, el 96.15 % de los pilotos que respondieron el cuestionario *on line* manifiesta haberse encontrado estas cerca de su aeronave durante las operaciones aéreas *Offshore*, siendo la mayor incidencia durante la operación designada (Figura 11).

De 25 pilotos de la empresa que manifiestan haberse encontrado con aves durante sus vuelos, ocho de ellos se han visto involucrados en incidente con estas, principalmente en plataformas petroleras de acuerdo a la temporalidad de presencia de aves.



Figura 11: Avistamiento de aves por tripulaciones de la Aerolínea en diferentes fases de vuelo en porcentaje.

De 26 pilotos que respondieron el cuestionario *on line*, 20 de ellos manifiestan conocer de buena fuente que colegas suyos han tenido incidentes que involucran la presencia de una o varias aves por lo que la percepción del riesgo entre este gremio puede considerarse alta. No es la misma percepción del riesgo que un piloto de tendría contra la de un piloto de VANT por lo que de acuerdo con [Berger y Luckmann \(1995\)](#), el cómo se presenta esta realidad y su interpretación desde diferentes perspectivas teóricas dentro del contexto de los especialistas en aviación civil para conducir un análisis sociológico nos ofrecerá aportes diversos.

En lo que refiere al marco normativo que regula la operación de aeronaves pilotadas a distancia, el 50 % de los pilotos que respondieron el cuestionario *on line* manifiesta conocer la existencia de una norma oficial mexicana al respecto (13 de 26), pero solamente siete de ellos señalan conocer su contenido.

De 26 pilotos que responden el cuestionario *on line*, 57.69 % de ellos manifiestan conocer la existencia de una circular obligatoria que establezca las reglas generales para la operación de aeronaves pilotadas a distancia (15 de 26), pero solamente nueve de ellos manifiestan conocer su contenido.

4 Discusión

Se realizó cuestionario *on line* a pilotos comerciales de ala rotativa adscritos en la Aerolínea mexicana con operaciones *Offshore*, dando respuesta el 37.14 % del total de su plantilla, lo que representa el 5.13 % del total de pilotos comerciales de ala rotativa en México con licencia vigente, según datos de la AFAC.

En el año 2013 se registra el mayor número de emisión de licencias (662) y para el año 2015 se presenta una reducción significativa de emisión de estas (84) con un repunte en 2018 para llegar a emitir 401 licencias y nuevamente una caída de 2021 a 2023.

Se aprecia que en 2013 se emitieron más licencias de las que la AFAC menciona tener vigentes en 2024 (655 entre privado y comercial de ala rotativa) como se observa en la Figura 12.



Figura 12: Comparativa entre licencias ala rotativa y ala fija por tipo, privado y comercial vigentes al 2024.

Como se puede valorar en la Figura 12, existe una gran diferencia entre las emisiones de licencias de ala fija contra las de ala rotativa en sus categorías privado y comercial.

Como se mencionó, el 88 % de las licencias de piloto comercial ala rotativa emitidas entre 2010 y 2023 no fueron renovadas por sus titulares, situación similar entre las licencias de ala fija que tampoco fueron renovadas según informa la AFAC (16,616 privadas y 14,817 comerciales), lo que nos hace reflexionar que las condiciones y recursos para la formación, obtención de capacidades, capacitación continua y acreditación de exámenes médicos son una gran área de oportunidad para ser abordado por la autoridad de aviación civil e industria dentro de la política aeronáutica que México demanda.

Se presenta una clara disminución a partir del 2015 en las del tipo comercial de ala rotativa como pudo apreciarse en la Figura 2.

Por su parte, la obtención de licencias como piloto de VANT ha ido en aumento desde 2017, fecha en que se presenta el auge de los drones tanto por su fácil adquisición como por su gran campo de aplicación. Se presenta una ligera disminución por efecto pandemia, pero recupera su incremento para 2020. Aún así, el número rebasa a la cantidad de licencias de piloto comercial de ala rotativa vigentes a marzo 2024.

A partir del 2022 se aprecia una disminución de registros de VANT, particularmente para el caso de la categoría comercial, se comenta por la parte de comercialización que los clientes señalan no querer pagar los precios del mercado por considerarlos altos, aunado a que solamente disfrutarían lapsos de alrededor de 30 minutos de vuelo con estos y su productividad operativa y comercial se ven afectadas.

Otra consideración de esta disminución de registros de VANT ante la AFAC puede derivarse del marco regulatorio que establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano ([Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, 2019](#)).

Las tripulaciones de la Aerolínea en 15 ocasiones han observado algún tipo de VANT volar cerca de su aeronave, lo que en contraste con el número de operaciones que se realizan por año, se puede determinar que la incidencia es baja y por no haber sido objeto de algún incidente en avistamientos.

Analizando bajo la matriz del método Mosler, dado que se trata de una metodología o procedimiento que se utiliza para identificar, analizar y evaluar cada uno de los factores de riesgo y contribuye a discernir tanto la probabilidad como el impacto del riesgo², se puede determinar que en cuanto a la probabilidad de ocurrencia del evento este es improbable pero, es posible que ocurra (al menos en un periodo de un año), lo que puede sustentarse en que las plataformas marinas utilicen estos VANT como herramienta por temas de seguridad o para la observación de actividades en su área de trabajo, incluso el transporte de artículos, herramientas u otros objetos, lo que de acuerdo al método mencionado correspondería un valor de 3 puntos que es considerado como de probabilidad moderada e impacto bajo.

Por su parte, el impacto del evento puede llegar a presentar una interferencia, limitaciones operativas o el uso de procedimientos de emergencia, derivando en ligeras pérdidas materiales o daños, obteniendo un valor de 2 puntos (Tabla 2) y, a consecuencia de la sumatoria, el valor total sería de 5 puntos con acciones de mitigación en la gestión de riesgos operacionales.

Tabla 2: Resultado de matriz 5X5 para evaluación de riesgo por presencia de VANT.

Probabilidad	Impacto				
	Muy baja (1)	Baja (2)	Moderada (3)	Alta (4)	Muy alta (5)
Muy alta (5)					
Alta (4)					
Moderada (3)					
Baja (2)					
Muy baja (1)					

La AFAC presenta un gran atraso en la emisión de reportes finales de los accidentes de aviación por lo que se encuentra limitada en la propuesta de recomendaciones hacia la industria sobre las medidas sistémicas y ordenadas a adoptar respecto al análisis por impactos contra VANT y aves en la República mexicana.

En la actualidad, la investigación de accidentes e incidentes de aviación es facultad de la Comisión Investigadora y Dictaminadora de Accidentes e Incidentes de Aviación (CIDAIA) dependiente de la Subsecretaría de Transporte de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes según ACUERDO publicado en el Diario Oficial de la Federación el 24 de agosto del 2021 ([ACUERDO, 2021](#)).

De los 964 incidentes registrados ante AFAC, se contabilizan dos registros por impacto contra VANT y 112 por impactos con fauna (aves) en el periodo 2015 y 2019, por lo que se considera la presencia de aves durante las operaciones de la Aerolínea como peligro con mayor grado de probabilidad de ocurrencia, principalmente en plataformas petroleras.

Aunque el mayor registro de impactos contra ave se encuentra en la aviación comercial (transporte público de pasajeros regular), el 96.15 % de los pilotos de la Aerolínea mexicana con operaciones *Offshore* manifiestan haberse encontrado aves cercanas a las aeronaves y el 60 % de estos señala que fueron durante las operaciones en plataformas petroleras (operación designada), seguido por la fase de ascenso de los vuelos con un 16 % y un 12 % en vuelo recto y nivelado hacia la misión.

²De acuerdo con el Doctorado en Ciencias Empresariales de la Universidad Panamericana la metodología Mosler cuenta con cuatro fases para su desarrollo: Definición, análisis, evaluación y cálculo del riesgo ([Doctorado en Ciencias Empresariales, 2023](#)).

Pilotos de la Aerolínea manifiestan haberse encontrado con aves durante sus vuelos en los que se mencionan ocho incidentes, especialmente en plataformas petroleras y de acuerdo con la temporalidad de presencia de aves, por lo que en contraste con el número de operaciones que se realizan por año, se puede determinar que la incidencia es alta y al haber sido objeto de incidentes, analizando bajo la matriz del método Mosler para el análisis de riesgos, se puede determinar que en cuanto a la probabilidad de ocurrencia del evento es probable que ocurra algunas veces (al menos en un periodo de una semana), lo que se puede respaldar en la producción desperdicios de alimentos en su área de trabajo en las plataformas marinas que atraigan a las aves o, las embarcaciones en sus cercanías, lo que propicia un ambiente idóneo para su estacionalidad, lo que de acuerdo al método Mosler correspondería un valor de 4 puntos considerado de alta probabilidad.

Tabla 3: Resultado de matriz 5X5 para evaluación de riesgo por presencia de aves.

Probabilidad	Impacto				
	Muy baja (1)	Baja (2)	Moderada (3)	Alta (4)	Muy alta (5)
Muy alta (5)					
Alta (4)					
Moderada (3)					
Baja (2)					
Muy baja (1)					

Por su parte, el impacto del evento por presencia de aves puede llegar a ser peligroso y presentar una reducción importante de los márgenes de seguridad, daño físico o una carga de trabajo tal que los pilotos no puedan desempeñar sus funciones en forma precisa y derive en procedimientos de emergencia, particularmente durante las aproximaciones a plataformas petroleras, daños mayores a los helicópteros, pérdidas materiales y financieras, obteniendo un valor de 4 puntos (Tabla 3) considerado como de alto impacto y, a consecuencia de la sumatoria, el valor total sería de 8 puntos con un nivel de riesgo alto.

Cada organización es responsable de establecer sus matrices de evaluación de riesgo que incluyan la prioridad de atención y las medidas de mitigación (Reyes López, 2022) por lo que de acuerdo con los resultados de la matriz para evaluación de riesgos por presencia de aves deben establecerse objetivos específicos para mitigar la vulnerabilidad a niveles de riesgos moderados en la gestión de riesgos operacionales.

La AFAC mantiene reuniones con la industria a través de Subcomités de seguridad operacional³ contando con varios subcomités para abordar temas de acuerdo a su especialidad. Para los propósitos de la investigación los favorables son el Subcomité de helicópteros y el Subcomité de drones. Adicionalmente pueden considerarse el Subcomité de aeródromos por temas de control de fauna y el Subcomité de investigación de accidentes e incidentes de aviación para conocer aquellos eventos en que las causales o factores contribuyentes de incidentes sean por impactos contra VANT o aves.

El 50 % de los pilotos de la Aerolínea manifestaron conocer la existencia de una norma oficial mexicana respecto de los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano, pero solo la mitad de ellos señalan conocer su contenido.

³En el portal de acciones y programas de la AFAC se relacionan los Subcomités de seguridad operacional existentes, en los que la industria puede registrarse para participar activamente en ellos y ofrecer alternativas de solución a la problemática prevaiente con propósitos de actualizar o promover el marco normativo. El registro puede realizarse en la siguiente liga: <https://www.gob.mx/afac/acciones-y-programas/modulo-comite-y-subcomites-de-seguridad-operacional>

El 57.69 % de los pilotos de la Aerolínea manifiestan conocer la existencia de una circular obligatoria que establece las reglas generales para la operación de aeronaves pilotadas a distancia (15 de 26), pero poco menos de la mitad de ellos manifiestan conocer su contenido.

5 Conclusiones

Una vez analizados los resultados del cuestionario *on line*, bases de datos y estadísticas de la AFAC; documentos de archivo de fuentes gubernamentales y experiencias de vuelo en la empresa, se puede aseverar que los vehículos aéreos no tripulados representan un bajo nivel de riesgo para la Aerolínea mexicana con operaciones *Offshore* en su seguridad operacional, ello con base en registros oficiales y el grado de ocurrencia de incidentes en la industria por este peligro latente, así como por los bajos avistamientos durante sus operaciones de vuelo.

Por su parte, la presencia de aves en plataformas petroleras, costa del Golfo de México y área de injerencia de aeródromos en la sonda de Campeche representa un alto nivel de riesgo para la Aerolínea en su seguridad operacional de acuerdo con registros oficiales y el grado de ocurrencia de incidentes en la industria por este peligro latente, así como por los avistamientos e impactos con aves sufridos durante sus operaciones de vuelo.

Esto nos conduce a determinar que el mayor peligro para las operaciones *Offshore* es la presencia de aves por sobre la de los VANT.

Considerando que se realizó un promedio de 16,500 hrs. de vuelo y ocho incidentes por impacto contra aves en los últimos cinco años, se puede aseverar que se cuenta con un índice de siniestralidad del 0.0228 con base en el número de horas de vuelo, periodo en estudio y total de pilotos expuestos al riesgo de acuerdo con la siguiente expresión matemática:

$$Is = \frac{(NiR)(Tva)}{(TVp)(Pp)}$$

En donde *Is* es el índice de siniestralidad; *NiR* el número de incidentes reportados; *Tva* corresponde al promedio de horas de vuelo al año; *TVp* el promedio de horas de vuelo del periodo en estudio y *Pp* el personal de vuelo de la Compañía, por lo que de manera subjetiva bajo el proceso de sustitución simple se tiene que:

$$Is = \frac{(8)(16,500)}{(16,500 \times 5)(70)} \quad Is = \frac{312,000}{(82,500)(70)} \quad Is = \frac{312,000}{5,775,000} \quad \mathbf{Is = 0.0228}$$

El peligro ubicado para las operaciones de la Aerolínea que requiere mitigación es el presentado por la presencia de fauna silvestre (aves marinas) más que por la presencia de VANT; sin embargo, prestadores de servicio externos a las plataformas marinas pueden considerar en un futuro cercano el uso de estos VANT para mayor eficiencia y reducción de costos en ciertas actividades en plataformas u operaciones de fotografía, suministro, entre otras, por lo que bajo la perspectiva proactiva se debe anticipar medidas para mitigar los riesgos que pudiesen presentarse derivado de esta inclusión de drones en la ecuación por la operación en el mismo espacio aéreo de trabajo.

El incremento de licencias de pilotos de VANT en México va en aumento mientras que los registros de estos van disminuyendo; sin embargo, esto no quiere decir que el número de VANT disminuya toda vez que estos datos refieren exclusivamente a aquellos que son registrados ante la autoridad de aviación civil

pudiendo desencadenar un incremento de aquellos destinados a actividades recreativas que pueden no llegar a requerir registros oficiales ni ser operador por personas poseedoras de una licencia específica para ello.

Las licencias de piloto comercial de ala rotativa vigentes mantienen bajos números de registro, lo que pone en riesgo competitivo a la Aerolínea en el mercado frente a otras organizaciones que desarrollan vuelos comerciales con este tipo de aeronaves ante el supuesto de ofrecer mejoras en las condiciones laborales y/o salariales, lo que significaría una posible renuncia de pilotos hacia estas empresas con ofertas competitivas ubicadas en la misma localidad, entidades federativas de México e incluso hacia el extranjero.

Existe un marco normativo respecto a la operación de VANT en México, mismo que por su corto periodo de implementación se considera joven ante las necesidades y requerimientos de la industria, particularmente por vuelos de helicópteros y en materia de protección civil (propósito de la circular obligatoria [CO AV-58/19 \(2019\)](#)) requiere involucramiento por parte de los operadores aéreos para mantener sus márgenes de seguridad operacional en niveles aceptables.

Son oportunos el conocimiento y difusión de este marco normativo entre las tripulaciones de la Aerolínea para alcanzar un mejor entendimiento de la situación y la visión de una perspectiva futura frente a la diversidad de aplicaciones y usos en lo comercial y civil de los VANT.

Dado que el peligro ubicado en el estudio que ofrece mayor grado de vulnerabilidad a las operaciones aéreas de la Aerolínea es la presencia de aves, deben implementarse acciones encaminadas a la mitigación del riesgo de impacto contra estas en primer lugar, seguido de acciones para la prevención del uso indiscriminado de VANT en el área que ofrece menor riesgo y, por último, considerar talleres o cursos respecto a las normativas de control de fauna y operaciones con VANT, por lo que entre las posibles sugerencias se citan las siguientes:

- Solicitar ante la autoridad de aviación civil local las estadísticas oficiales de accidentes e incidentes por impacto contra aves y VANT dado la diferencia de registros encontrados para conducir un profundo análisis y por otra parte, en contraste con la información que puedan proporcionar los tripulantes de las compañías presentes en la zona bajo el sustento de que se ha detectado que no todos los eventos son notificados por las tripulaciones ante la autoridad y poder contar con información objetiva y precisa de la ponderación actual de la situación.
- Gestionar un informe zootécnico en la zona y plataformas marinas para ubicar alternativas sostenibles bajo un contexto ambiental y preservación de las especies.
- Analizar la posibilidad de implementar equipos sonoros a bordo de las aeronaves considerando que el enemigo natural de las gaviotas son el búho y el águila, principalmente durante las aproximaciones a plataformas marinas. Respecto a los pelícanos estos son sensibles a los cambios de temperatura, efectos causados por las corrientes del “niño” y la “niña”, así como la marea roja fuera del control de la Aerolínea.
- Promover en la zona la cultura del uso regulado de VANT entre la población civil y proveedores externos de las plataformas marinas puntualizando el riesgo que estos ofrecen a las operaciones aéreas para reducir el uso indiscriminado y ordenar su uso.
- Promover talleres del marco normativo entre las tripulaciones de la Aerolínea respecto al control de fauna y regulación por el uso de VANT.

De acuerdo con la OACI, la gestión de la seguridad operacional es “el estado en el que los riesgos asociados con actividades de aviación, relacionadas con, o en apoyo directo de la operación de las aeronaves, es reducido y controlado a un nivel aceptable”, por lo que con las acciones que pudieran derivarse del presente estudio de riesgo operacional y estudios futuros que del presente se desprendieran, así como de la promoción y difusión de las mejores prácticas que se crearan a raíz de la implementación de estas, se estaría en mayor grado de cumplimiento con las actividades de aviación en las operaciones aéreas *Offshore* en la sonda de Campeche, México, para aquellos eventos por impacto de aves.

De igual forma, de utilizar los VANT como método alternativo en ciertas tareas que pudieran ser sustituidas del helicóptero, se deberá realizar un análisis profundo de sus impactos para con la seguridad operacional por su integración al mismo espacio aéreo.

6 Referencias

ACUERDO (24/08/2021). Por el que se establece que las actividades relativas a la búsqueda y salvamento, así como la investigación de accidentes e incidentes sufridos por aeronaves civiles a que se refieren los artículos 80 y 81 de la Ley de Aviación Civil serán realizadas por la Subsecretaría de Transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Obtenido de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5627430&fecha=24/08/2021#gsc.tab=0.

Berger, P. L. y Luckmann, T. (1995). *La construcción social de la realidad*. Amorrortu Editores, S.A. ISBN: 950-518-009-8.

CO AV-58/19 (19/07/2019). Reglas generales para la operación de RPAS de Estado y Civiles (Registrados como Grupo Voluntario) en casos de emergencia y/o desastres causados por fenómenos naturales y/o antrópicos. Dirección General de Aeronáutica Civil. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/598488/co-av-48-19_27082019.pdf.

De Santis, A. J. (2023). *Deficiencias de seguridad en el transporte aéreo y su relación con la ciencia*. Independiente.

Doctorado en Ciencias Empresariales (26/06/2023). ¿En qué consiste el método Mosler en el análisis de riesgos? *Consejos Doctorado en Ciencias Empresariales aprendizaje analíticos Doctorado en Administración*. Obtenido de: <https://blog.up.edu.mx/doctorado-en-ciencias-empresariales/en-que-consiste-el-metodo-mosler-analisis-de-riesgos>.

Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019 (14/11/2019). Que establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Obtenido de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5627430&fecha=24/08/2021#gsc.tab=0.

Pineda, M. (2023). Oportunidades para la cadena de valor de la industria petrolera en México. *Modern Machine Shop México*. <https://www.mms-mexico.com/articulos/oportunidades-para-la-cadena-de-valor-de-la-industria-petrolera-en-mexico>.

Reyes López, E. (2022). *Seguridad Integral en las Empresas: Sistema de gestión de seguridad integral*. Alfaomega Grupo Editor. ISBN: 978-607-538-844-1.

CIENCIAS ASTRONÁUTICAS

SIMBIOSIS ENTRE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES Y *PHASEOLUS VULGARIS* BAJO CONDICIONES DE MICROGRAVEDAD SIMULADA: EVALUACIÓN PRELIMINAR

María Nicole Gálvez Bailey^{1,2*}, Sara Nicole Velez Giraldo^{1,2†}, Andrea Gabriela Monzón Cosillo^{1,2‡}, Florence Bianchi Veliz^{1,3§}, Juan De Dios López De León^{1,3¶}, Pietro Ernesto Ubico Ligorria^{1,3||}, Patrizia Lupo, PhD^{1,**}

¹Departamento de Bioquímica y Microbiología

²Estudiante de la Licenciatura en Bioquímica y Microbiología

³Estudiante de la Licenciatura en Biotecnología Molecular

Universidad del Valle de Guatemala

Recibido: 1/noviembre/2024

Aceptado: 28/noviembre/2024

DOI: <https://doi.org/10.5377/ce.v15i2.19633>

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la microgravedad simulada en la simbiosis entre *Phaseolus vulgaris* y hongos micorrízicos arbusculares, enfocándose en el crecimiento vegetal, la colonización radicular y el contenido proteico. La relevancia de este estudio radica en comprender cómo las plantas podrían adaptarse a entornos espaciales, lo cual es esencial para el desarrollo de sistemas agrícolas sostenibles en misiones de larga duración. Las plantas fueron cultivadas por 27 días bajo condiciones de microgravedad simulada utilizando un clinostato 2D y gravedad terrestre, con y sin inoculación de hongos micorrízicos. A través de un análisis microscópico, se observó un aumento en la colonización micorrízica en condiciones de microgravedad simulada, con una mayor presencia de hifas y vesículas; lo que indicó un incremento en la actividad simbiótica. Asimismo, mediante el método de Bradford, se registró una disminución significativa en la concentración proteica de las raíces bajo microgravedad, posiblemente como una adaptación metabólica frente al estrés. Aunque no se observaron diferencias significativas en la longitud radicular entre los tratamientos, se identificó una tendencia a un menor crecimiento en condiciones de microgravedad, probablemente vinculada a alteraciones hormonales. Estos resultados destacan el potencial de optimizar la simbiosis micorrízica en condiciones de microgravedad simulada para mejorar el crecimiento de cultivos en diversos entornos, con aplicaciones tanto en la agricultura terrestre como espacial; lo que constituye el primer análisis de esta simbiosis en microgravedad simulada en Centroamérica.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris*, simbiosis micorrízica, microgravedad simulada, clinostato 2D.

*Gal22868@uvg.edu.gt

†Vel22505@uvg.edu.gt

‡Mon22658@uvg.edu.gt

§Bia22040@uvg.edu.gt

¶Lop221175@uvg.edu.gt

||Ubi22068@uvg.edu.gt

**plupo@uvg.edu.gt  <https://orcid.org/0000-0003-0896-6531>

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of simulated microgravity on the symbiosis between *Phaseolus vulgaris* and arbuscular mycorrhizal fungi, focusing on plant growth, root colonization, and protein content. The significance of this study lies in understanding how plants might adapt to space environments, which is essential for developing sustainable agricultural systems on long-duration missions. Plants were grown for 27 days under simulated microgravity conditions using a 2D clinostat and terrestrial gravity, with and without mycorrhizal fungi inoculation. Microscopic analysis revealed an increase in mycorrhizal colonization under simulated microgravity, with a greater presence of hyphae and vesicles, indicating enhanced symbiotic activity. Additionally, the Bradford method recorded a significant decrease in root protein concentration under microgravity, possibly as a metabolic adaptation to stress. Although no significant differences in root length were observed between treatments, a trend toward reduced growth in microgravity conditions was identified, potentially linked to hormonal alterations. These results highlight the potential for optimizing mycorrhizal symbiosis in simulated microgravity conditions to improve crop growth in various environments, with applications in both terrestrial and space agriculture. This study represents the first analysis of this symbiosis under simulated microgravity in Central America.

Keywords: *Phaseolus vulgaris*, mycorrhizal symbiosis, simulated microgravity, 2D clinostat.

1 Introducción

Phaseolus vulgaris, comúnmente conocido como frijol, es una leguminosa esencial tanto a nivel agrícola como nutricional debido a su alto contenido en proteínas, fibra, vitaminas y minerales; lo que lo convierte en un alimento fundamental en diversas dietas alrededor del mundo (Romero-Felix *et al.*, 2023; FIRA, 2022). Con un contenido proteico que oscila entre el 12-15 %, el frijol representa una fuente importante de nutrientes; especialmente en la dieta de los astronautas durante extensas misiones espaciales, ayudando a mitigar la pérdida de masa muscular y ósea provocada por la microgravedad (Erbersdobler *et al.*, 2017). En este contexto, explorar la viabilidad de cultivar *P. vulgaris* en entornos espaciales puede ayudar a desarrollar sistemas agrícolas autosostenibles durante misiones de larga duración.

En entornos espaciales, la microgravedad altera significativamente los procesos biológicos de las plantas; incluyendo la orientación del crecimiento, la absorción de agua y nutrientes, y el rendimiento general. Sin embargo, la interacción simbiótica con hongos micorrízicos arbusculares (AMF) ayuda a mejorar la absorción de nutrientes esenciales como fósforo y nitrógeno; y puede ser un componente fundamental para mitigar los efectos negativos de la microgravedad en el crecimiento vegetal (Baba *et al.*, 2022). Las AMF, que se encuentran en más del 80 % de las plantas vasculares, forman arbusculos y vesículas en las raíces; los cuales facilitan el intercambio de nutrientes y suele ser relevante en cultivos agrícolas como el frijol (Carrillo-Saucedo *et al.*, 2022; Honrubia, 2009).

Estudios previos han analizado cómo las condiciones de estrés, como la microgravedad, influyen en la dinámica de la simbiosis micorrízica y el crecimiento de las plantas. Por ejemplo, en el estudio de Ruiz Sánchez *et al.* (2015) se observó que la colonización micorrízica sigue promoviendo el desarrollo vegetal, incluso en condiciones subóptimas como suelos inundados. Otras investigaciones, como la de Hayes *et al.* (2014), muestran que hongos como *Piriformospora indica* pueden incrementar el crecimiento radicular y mejorar la tolerancia al estrés abiótico bajo microgravedad simulada. Sin embargo, queda por investigar cómo estas interacciones simbióticas podrían optimizarse en condiciones espaciales para maximizar el crecimiento y productividad de plantas como el frijol.

En experimentos terrestres se utiliza un clinostato 2D como análogo de la microgravedad para sistemas biológicos (Eiermann *et al.*, 2013). Este tipo de rotación horizontal a través de vectores gravitacionales crea un cambio continuo en la orientación, lo que induce un estrés que se asemeja mucho al cambio constante de orientación que experimentan los organismos en condiciones de gravedad (Wang *et al.*, 2015). Al rotar las muestras a lo largo de dos ejes perpendiculares, el clinostato 2D minimiza el efecto de la gravedad terrestre, lo que proporciona un entorno simulado para estudiar las respuestas gravitacionales en diversos organismos y procesos biológicos (Eiermann *et al.*, 2013), en este caso la relación simbiótica entre hongos micorrízicos arbusculares y *Phaseolus vulgaris*.

La idea de este estudio surgió en el contexto de un curso de micología, con el objetivo de evaluar el impacto de la microgravedad simulada en la simbiosis entre *P. vulgaris* (frijol) y hongos micorrízicos arbusculares; y determinar su influencia en la colonización radicular. La comprensión de estas interacciones simbióticas en condiciones de microgravedad simulada es relevante para el desarrollo de sistemas agrícolas sostenibles en el espacio, además de ofrecer conocimientos aplicables a la agricultura en la Tierra; principalmente en suelos de baja fertilidad o en entornos adversos (Carrillo-Saucedo *et al.*, 2022). Este estudio busca contribuir a este campo emergente, proporcionando información que podría optimizar las estrategias agrícolas tanto en misiones espaciales como en aplicaciones terrestres.

2 Metodología

2.1 Selección de semillas

Se utilizaron semillas de frijol (*Phaseolus vulgaris*) comerciales y se colocaron en agua estéril por 5 min. Después de este tiempo, se descartaron las semillas que flotaron a la superficie del agua. Se seleccionaron 30 de las semillas que no fueron descartadas y sometieron a un proceso de desinfección. Para ello, se sumergieron en una solución de cloro al 0.4 % durante 2 minutos, seguido de varios lavados con agua estéril para eliminar cualquier residuo de cloro (Hayes *et al.*, 2014; Dauzart *et al.*, 2016).

2.2 Pregerminación de semillas

Luego, las semillas previamente desinfectadas se colocaron en algodón húmedo dentro de un recipiente transparente, evitando la saturación del mismo. El recipiente se situó en un invernadero durante 7 días, proporcionando una temperatura cálida y luz indirecta. Durante este período, se regaron las semillas una vez al día para asegurar una humedad constante.

2.3 Recuento de esporas

Se utilizó una solución stock de esporas micorrízicas que contenía una mezcla de diversas especies, predominando principalmente *Glomus intraradices* marca Itapollina (*Aegis irriga*). Después de homogenizar esta solución stock, se tomó una alícuota de 5 μL y se colocó en una cámara de Neubauer. Posteriormente se observó en un microscopio y se realizó el recuento de esporas (Arkhipov, 2016). En el recuento se identificó una concentración inicial de esporas de 2.57×10^7 /mL. Se tomó una alícuota de 1 mL de esta solución stock y se diluyó en 49 mL de agua desmineralizada estéril, para alcanzar una concentración final de 5.14×10^5 esporas/mL.

2.4 Inoculación de plantas

Una vez finalizados los 7 días de pregerminación, las raíces de 10 plántulas se sumergieron rápidamente en agua oxigenada para su desinfección. Posteriormente, se remojaron en 100 μL de la solución final de

esporas (~51400 esporas) por 5 horas dentro de una campana de flujo laminar (Hayes *et al.*, 2014; Dautart *et al.*, 2016). Tanto las plantas inoculadas, como las no inoculadas, se transfirieron a tubos Falcon estériles con 20 mL de medio MS; dejando las tapas ligeramente abiertas para permitir el intercambio gaseoso.

2.5 Condiciones de crecimiento

Para evitar la contaminación y permitir la entrada de luz, se preparó un ambiente estéril utilizando una caja cubierta con plástico transparente. Posteriormente, para simular condiciones de microgravedad, siete tubos Falcon (tres controles y cuatro inoculados con esporas micorrízicas) se colocaron en un clinostato 2D (VERNE) para simular condiciones de microgravedad y reducir la influencia de la gravedad terrestre. Dicho clinostato se operó a una velocidad de 10 rpm durante 27 días. Simultáneamente, otros siete tubos (tres controles y cuatro inoculados) se colocaron en el costado del simulador para asegurar que las muestras estuvieran expuestas a condiciones de vibración similares (Figura 1). Se monitoreó el crecimiento de las raíces durante este periodo, y se registraron las mediciones de longitud inicial y final mediante el software *Tracker Video Analysis and Modeling Tool*.

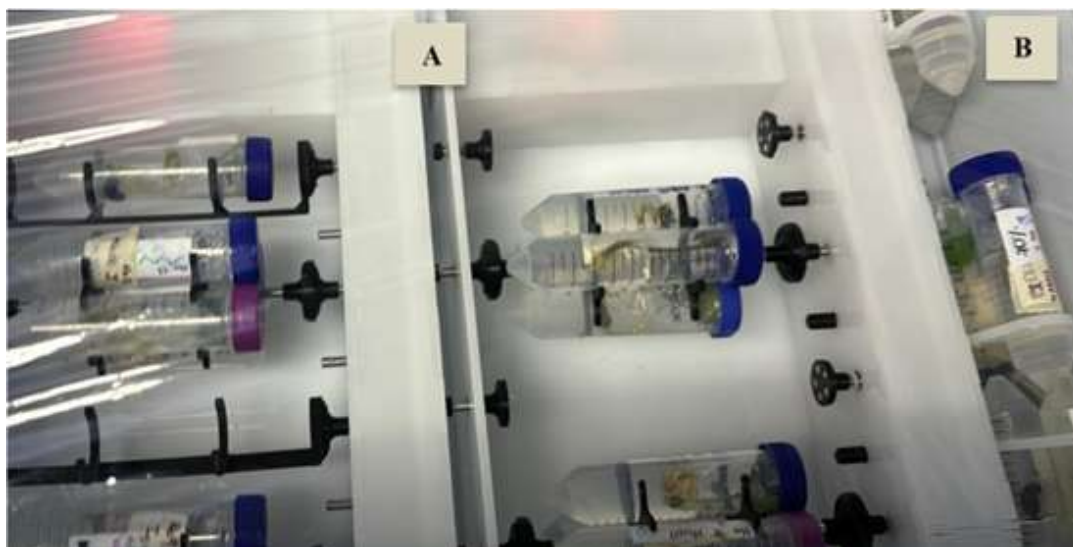


Figura 1: Configuración experimental del clinostato 2D y controles. (A) Tubos Falcon con muestras en el simulador de microgravedad. (B) Tubos de control adyacentes al simulador para mantener condiciones similares de vibración.

2.6 Análisis microscópico

Pasados los 27 días, se extrajeron las raíces de todas las plantas. Se cortaron en segmentos de 3-5 cm, se colocaron en una solución de KOH (10 % p/v) y se calentaron durante 5 min, asegurándose de evitar la ebullición. Después de lavar las raíces con agua desmineralizada estéril, para eliminar el KOH, se sumergieron en una solución que contenía azul de lactofenol (5 % v/v) y ácido acético (5 % v/v); calentando los segmentos nuevamente durante 3 min. Se dejaron enfriar y se destiñeron con agua desmineralizada y unas gotas de la solución de ácido acético. Las raíces teñidas se cortaron en segmentos de aproximadamente 0.5 mm y se colocaron sobre un portaobjetos con unas gotas de agua. Finalmente, las muestras se observaron al microscopio óptico (LW Scientific) a 40X y 100X, para identificar las estructuras micorrízicas.

2.7 Cuantificación mediante el método de Bradford

Para la extracción de proteínas, se colocaron las raíces de las plántulas en un mortero frío, al que se le añadieron 50 mL de buffer de extracción (Tris-HCl 10 mM, pH 7,4, 2-mercaptoetanol 1 mM y EDTA 1 mM). El tejido se maceró junto con el buffer hasta obtener una mezcla homogénea. Después, se transfirieron 40 mL del extracto a tubos Falcon de 50 mL, asegurando que los tubos estuvieran equilibrados en peso. Las muestras fueron centrifugadas a 24.000 g durante 20 minutos a 4°C, utilizando una centrifugadora Eppendorf 5804R. Tras la centrifugación, se recolectaron 20 mL del sobrenadante en nuevos tubos Falcon y el extracto se mantuvo en hielo para conservar su integridad. Luego, se agregó gradualmente sulfato de amonio hasta alcanzar una concentración final del 45 % (p/v), agitando durante 30 minutos para facilitar la precipitación de proteínas. Las muestras se centrifugaron nuevamente a 24.000g durante 20 minutos a 4°C. Finalmente, se descartó el sobrenadante y el pellet resultante se resuspendió en 15 mL de buffer PBS (Isaacson *et al.*, 2006).

Posterior a la extracción de proteínas, se prepararon estándares de albúmina sérica bovina (BSA) utilizando el buffer PBS y el reactivo de Bradford 1X a diferentes concentraciones (0.125 mg/mL, 0.25 mg/mL, 0.5 mg/mL, 1 mg/mL y 2 mg/mL). Por otra parte, las muestras se prepararon agregando 20 µL de la muestra a analizar y 1 mL de reactivo de Bradford 1X. Tanto los estándares como las muestras fueron incubados en condiciones de oscuridad durante cinco minutos. Posteriormente, se midió la absorbancia a 595 nm empleando un espectrofotómetro UV-Vis marca UNICO (Gold Technologies, 2019).

2.8 Análisis estadístico

Los resultados cuantitativos de este estudio exploratorio consistieron en el análisis de dos elementos principales, la longitud de la raíz y la concentración promedio de proteínas a partir de extracciones de las plántulas.

La investigación fue realizada con 3 y 4 repeticiones, de forma que se analizaron 3 muestras inoculadas en condiciones de microgravedad simulada, 4 muestras inoculadas en condiciones de gravedad terrestre, 3 muestras no inoculadas en condiciones de microgravedad simulada y 4 muestras no inoculadas en condiciones de gravedad terrestre. En cuanto a las pruebas empleadas, se utilizó la Prueba T de *Student*, realizando la distinción entre pareada y no pareada según el elemento evaluado. Para la comparación de la longitud de raíz antes y después del período de crecimiento, es decir 27 días, se utilizó la Prueba T pareada. Mientras tanto, la concentración promedio de proteínas en las muestras se analizó utilizando la Prueba T no pareada. En ambos casos se utilizó un nivel de confianza del 95 %. Para la manipulación y análisis de datos, se utilizó RStudio (versión 2024.09.0-375) como interfaz de desarrollo para R (versión 4.4.1, R Foundation for Statistical Computing, 2024).

3 Resultados

Se realizó un estudio previo al presente en donde se evaluó la longitud de las raíces inoculadas sometidas a efectos de gravedad terrestre (Tierra) y microgravedad simulada (MicroG) luego de los 10, 12 y 15 días de inoculación con esporas. A través de ello se demostró una disminución del largo de la raíz a lo largo de los días para las plantas sometidas a microgravedad simulada; mientras que aquellas sometidas a gravedad terrestre presentó una disminución a los 12 días y un incremento de longitud a los 15 días. Como control se determinó la longitud de la raíz de frijoles sometidos a ambas condiciones, pero sin inoculación de esporas.

Adicionalmente, también se le proporcionó un enfoque a la colonización micorrízica para ambas condiciones luego de los 15 días posterior a la inoculación. Se determinó a través de las micrografías (Figura 2C y 2D), un mayor desarrollo de estructuras micorrízicas como esporas e hifas en aquellas plantas sometidas a efectos de microgravedad, además de que bajo estos efectos se observaron estructuras micorrízicas no identificadas. En las micrografías recolectadas para las plantas sometidas a efectos de gravedad terrestre, se observó una baja proporción de esporas e hifas y una ausencia de estructuras micorrízicas.

En este estudio se evaluó la influencia de la microgravedad simulada y la gravedad terrestre sobre la colonización micorrízica de las raíces de *P. vulgaris*, enfocándose en tres aspectos: visualización de estructuras micorrízicas, concentración de proteínas y longitud de las raíces. Se analizaron las condiciones de microgravedad simulada y gravedad terrestre, cada una con y sin inoculación de esporas micorrízicas (I y SI, respectivamente). Estos parámetros permitieron evaluar la respuesta diferencial en la colonización y desarrollo radicular bajo estas condiciones contrastantes.

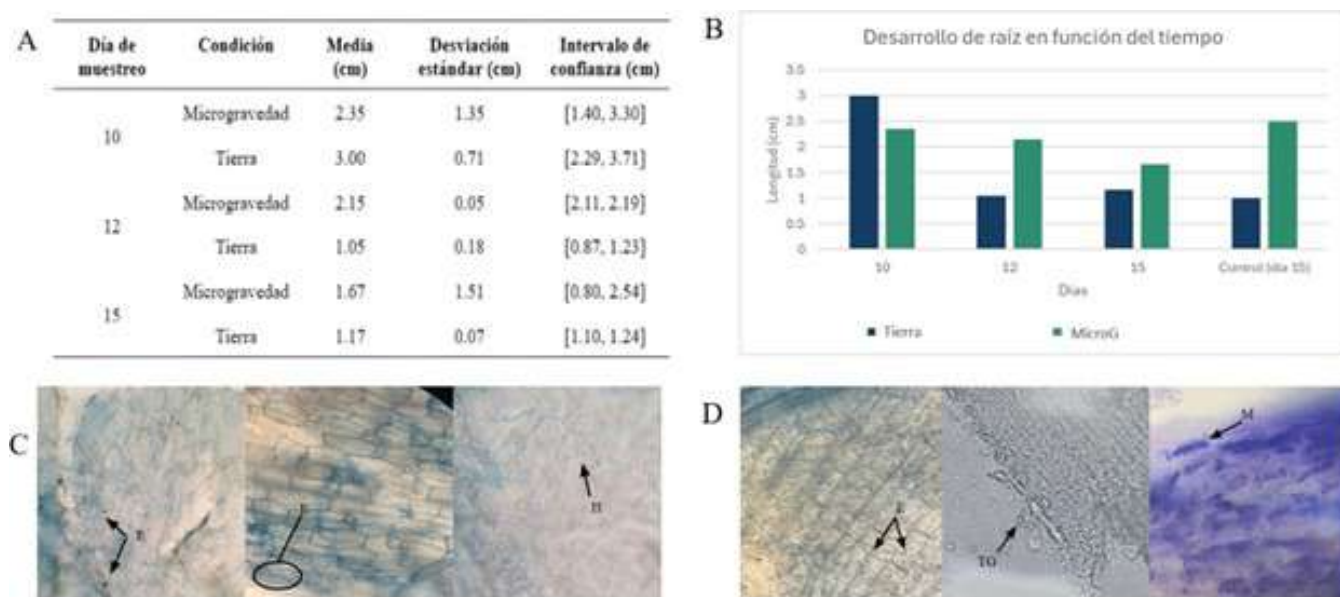


Figura 2: resultados preliminares de colonización micorrízica y longitud de raíz en condiciones de gravedad terrestre y microgravedad luego de 15 días de la inoculación. (A). Estadísticas descriptivas de la longitud de raíz del frijol bajo ambas condiciones en los días 10, 12 y 15 después de la inoculación con esporas (B). Representación gráfica del promedio de la longitud de la raíz de frijol bajo ambas condiciones luego de 10, 12, y 15 días después de la inoculación (C). Micrografías de raíces de frijol bajo efectos de gravedad terrestre a los 15 días (D). Micrografías de raíces de frijol bajo efectos de microgravedad simulada los 15 días. Las estructuras micorrízicas se marcan de la siguiente manera (C y D): esporas (E), hifas (H), estructuras micorrízicas no identificadas (M).

El crecimiento de *P. vulgaris* bajo condiciones de microgravedad simulada mostró diferencias significativas en varios parámetros morfológicos en comparación con el grupo control cultivado en gravedad terrestre. Las micrografías de las raíces de *P. vulgaris* (Figura 3) reflejan diferencias notables en la colonización micorrízica bajo condiciones de microgravedad simulada y gravedad terrestre. En las raíces sometidas a microgravedad simulada (Figura 3B), se observó una mayor abundancia de estructuras micorrízicas, con presencia de hifas y vesículas indicativas de una mayor actividad simbiótica en comparación con las raíces cultivadas bajo gravedad terrestre (Figura 3A). Las vesículas, estructuras fundamentales para el intercambio de nutrientes entre el hongo y la planta, fueron prominentes bajo microgravedad simulada; mientras que no se identificaron bajo condiciones terrestres. Asimismo, las esporas y las hifas fueron más

visibles en las raíces expuestas a microgravedad simulada, lo que sugiere un incremento en la colonización micorrízica en estas condiciones.

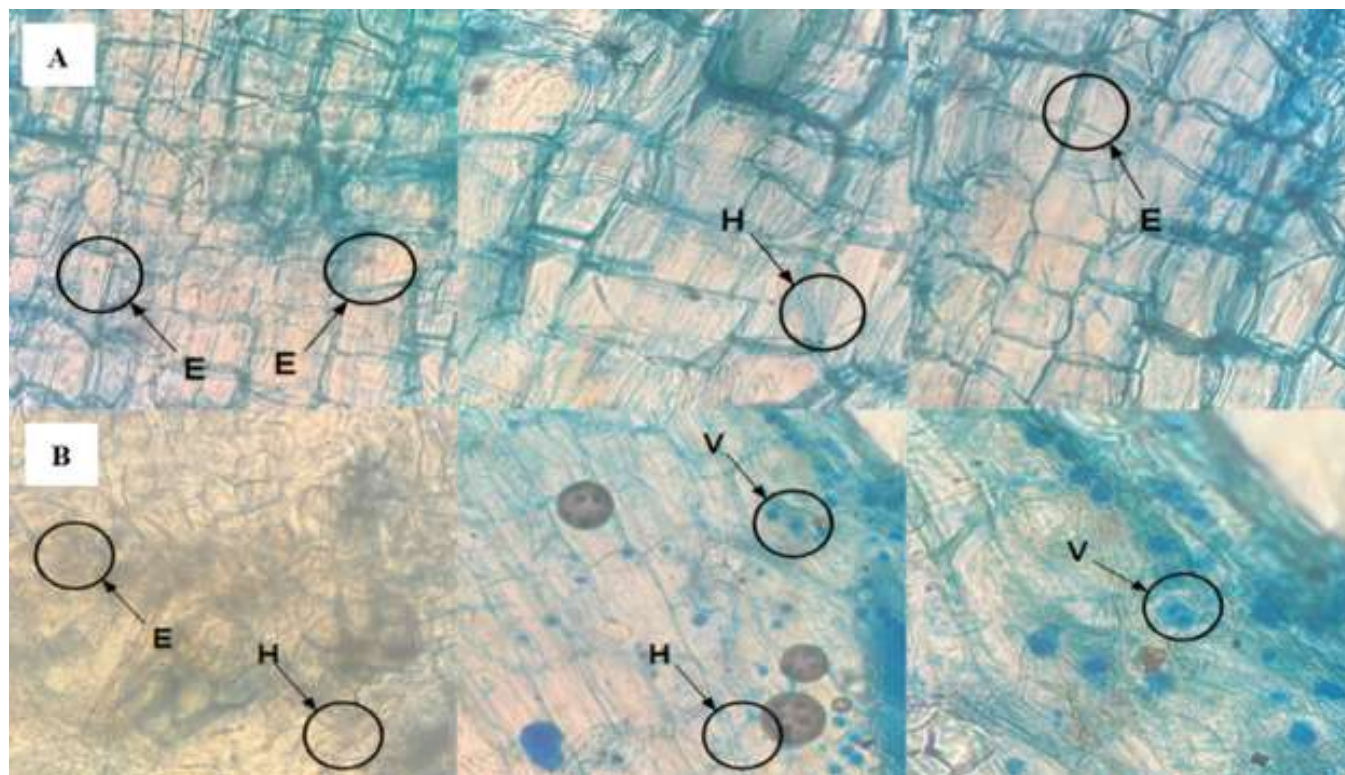


Figura 3: Colonización micorrízica de *P. vulgaris* en condiciones de microgravedad simulada y gravedad terrestre 27 días después de la inoculación. Las estructuras micorrízicas están marcadas de la siguiente manera: esporas (E), hifas (H) y Vesículas (V). (A) micrografía de la raíz inoculada de *P. vulgaris* bajo condiciones de gravedad terrestre. (B) micrografía de la raíz inoculada de *P. vulgaris* bajo condiciones de microgravedad simulada.

El análisis de la concentración de proteínas en las raíces de *P. vulgaris* bajo diferentes condiciones de gravedad (Figura 4A, Cuadro 1) muestra diferencias significativas entre los tratamientos. En particular, se observó una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre las condiciones de microgravedad simulada con inoculación (MicroG I) y sin inoculación (MicroG SI), así como entre las condiciones de gravedad terrestre con inoculación (Tierra I) y sin inoculación (Tierra SI). Además, también hubo una diferencia significativa entre las raíces bajo microgravedad simulada y gravedad terrestre.

4 Discusión

El principal objetivo de esta investigación era evaluar el efecto de la microgravedad simulada en la simbiosis entre la planta de frijol (*P. vulgaris*) y hongos micorrízicos arbusculares; comparando su crecimiento, colonización micorrízica y contenido proteico bajo condiciones de microgravedad simulada y gravedad terrestre.

4.1 Efecto de la microgravedad simulada en la colonización micorrízica de *P. vulgaris*

Se identificó que la simbiosis micorrízica en las plantas expuestas a microgravedad simulada presentó un desarrollo significativamente mayor en los 27 días de análisis en comparación con las plantas cultivadas

bajo condiciones de gravedad terrestre (Figura 3). Las micrografías revelan que las raíces de frijol cultivadas en gravedad terrestre presentan estructuras micorrízicas, como esporas e hifas, aunque en menor proporción que bajo microgravedad simulada. En condiciones de microgravedad, se observó una mayor densidad de esporas y distribución de hifas, junto con vesículas intracelulares ovaladas en las células corticales, lo que indica una adaptación favorable a la simbiosis micorrízica. Estas vesículas podrían facilitar la absorción de nutrientes, optimizando el crecimiento de *Phaseolus vulgaris* en entornos de baja gravedad, como se ha sugerido en estudios previos (Urgiles Gómez *et al.*, 2016; Andrade-Torres, 2010).

De acuerdo con investigaciones previas, como la de Krzyzanski *et al.* (2021), bajo condiciones de gravedad terrestre las vesículas tienden a formarse en una etapa posterior al desarrollo de otras estructuras de almacenamiento de nutrientes, como los arbusculos; cuya vida media varía entre dos y doce días. Esto podría indicar que, en las plantas expuestas a microgravedad simulada, la presencia de estas vesículas se debe a una colonización completa y acelerada del hongo micorrízico en las raíces de frijol; lo cual, en condiciones de gravedad terrestre, suele tomar aproximadamente seis semanas (Buechel y Bloodnick, 2016). Esto sugiere que la microgravedad simulada favorece el desarrollo de las estructuras simbióticas de manera más rápida en comparación con la gravedad terrestre.

Los resultados obtenidos en este estudio son consistentes con lo esperado, ya que las plantas suelen inducir la simbiosis micorrízica en respuesta a condiciones de estrés; como la microgravedad simulada. Esta condición gravitacional puede afectar la eficiencia de la simbiosis micorrízica al influir directamente en la biosíntesis y el transporte de estrigolactonas, compuestos involucrados en la señalización inicial de la simbiosis micorrízica y en la respuesta a estrés abiótico en plantas (Liu *et al.*, 2018; Borghi *et al.*, 2016). Además, se sabe que las estrigolactonas están positivamente reguladas por la vía de señalización de las auxinas, fitohormonas clave en el crecimiento vegetal (Saeed *et al.*, 2017). La literatura actual constata que la microgravedad tiene un efecto directo sobre la distribución y el transporte de auxinas en varias especies de plantas (Mazars *et al.*, 2014; Baba *et al.*, 2022); lo que sugiere que la microgravedad simulada podría influir indirectamente en la producción y movilidad de las estrigolactonas y facilitar la señalización involucrada en la formación de la simbiosis micorrízica.

Tabla 1: Estadísticas descriptivas de la concentración proteica de raíz.

Estadísticas	Micro G I mg/mL	Micro G SI mg/mL	Tierra I mg/mL	Tierra SI mg/mL
Media aritmética	0.0289 ± 0.00330	0.0482 ± 0.00625	0.403 ± 0.00324	0.335 ± 0.00722
Desviación estándar	0.00321	0.00556	0.00371	0.00490
Intervalo de confianza	[0.0228, 0.0349]	[0.0376, 0.0587]	[0.396, 0.410]	[0.326, 0.344]
Coefficiente de variación	11.1 %	11.5 %	0.919 %	1.46 %

En la tabla se muestran los resultados de la estadística descriptiva correspondientes a la concentración de proteínas en los extractos de raíz de *P. vulgaris* bajo diferentes condiciones experimentales. Se realizaron tres réplicas por cada muestra. Los datos incluyen los resultados de plantas inoculadas (I) y no inoculadas (SI), tanto en condiciones de microgravedad simulada (MicroG) como en gravedad terrestre (Tierra). El límite de detección (LOD) fue 0.0193 mg/mL, y el límite de cuantificación (LOQ) fue 0.0642 mg/mL.

En el contexto de los resultados obtenidos, la alteración en la distribución de auxinas podría explicar el desarrollo de la simbiosis micorrízica observado en las plantas de frijol sometidas a microgravedad simulada. Es probable que este cambio haya optimizado la señalización entre las raíces y los hongos micorrízicos, acelerando el establecimiento de la simbiosis. Además, dado que las auxinas regulan diversos

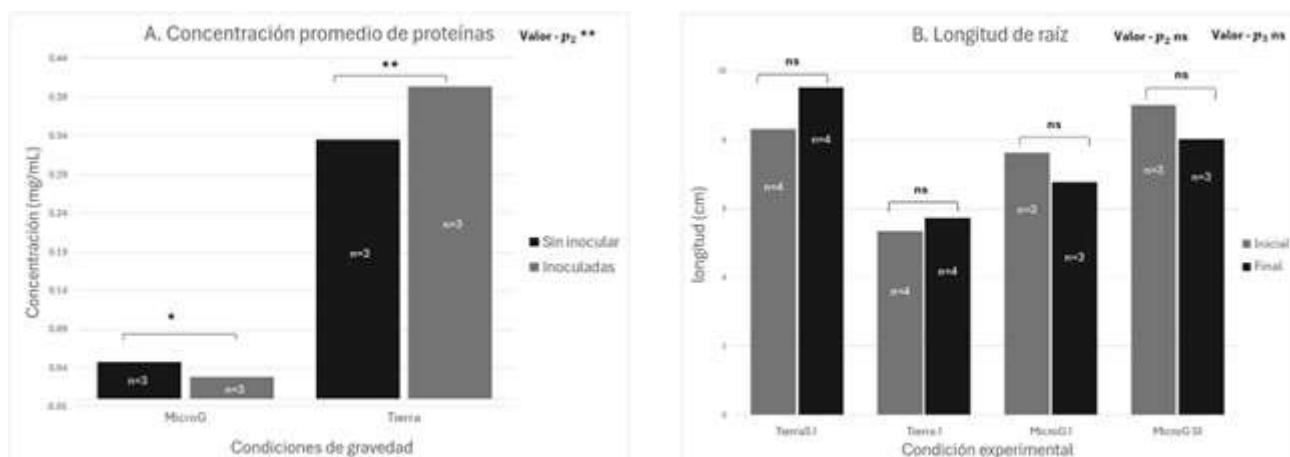


Figura 4: Efecto de la microgravedad simulada y la gravedad terrestre sobre la concentración de proteínas y la longitud de las raíces de *P. vulgaris*. (A) Concentraciones de proteínas en cuatro condiciones: microgravedad simulada (MicroG) y gravedad terrestre (Tierra), con y sin inoculación de esporas micorrízicas (I y SI, respectivamente). Las líneas con valores p indican el nivel de diferencia significativa entre las muestras: entre inoculadas y no inoculadas dentro de cada tipo de gravedad, y p_2 entre las concentraciones de microgravedad simulada y gravedad terrestre. (B) Longitud inicial y final de las raíces en las cuatro condiciones experimentales. Las líneas representan a los valores p que comparan el crecimiento antes y después dentro de cada condición, p_2 compara entre microgravedad simulada y gravedad terrestre al final de la experimentación, y p_3 compara inoculadas y no inoculadas al final. El tamaño de muestra (n) se representa en la gráfica. **: $p < 0.01$; *: $p < 0.05$; ns: $p > 0.05$.

aspectos del crecimiento vegetal, su redistribución en microgravedad podría haber favorecido no solo la simbiosis; sino también la proliferación de estructuras micorrízicas, como vesículas e hifas. Esta hipótesis es coherente con las observaciones de las micrografías, donde las raíces en microgravedad muestran una mayor cantidad de esporas e hifas en comparación con las plantas bajo gravedad terrestre.

Es importante mencionar que, debido a la limitada cantidad de literatura existente sobre la simbiosis micorrízica en condiciones de microgravedad, las interpretaciones de este estudio se basan principalmente en los datos obtenidos y en comparaciones con estudios en gravedad terrestre. No obstante, los resultados presentados permiten establecer un punto de partida para futuras investigaciones que busquen explorar el impacto de la microgravedad en las interacciones planta-hongo y su potencial aplicación en la agricultura en el espacio.

En el estudio preliminar, a pesar de las diferencias metodológicas se obtuvo hallazgos similares entre este y el estudio actual. La duración del estudio preliminar fue un aspecto clave que varió significativamente: mientras que el estudio preliminar evaluó el crecimiento de las plantas durante un periodo de 15 días, el estudio actual extendió la observación a 27 días. Esta ampliación temporal permitió un análisis más detallado sobre las adaptaciones a largo plazo de *P. vulgaris* bajo condiciones de microgravedad simulada, aspecto esencial para comprender mejor el comportamiento simbiótico y las posibles aplicaciones de esta interacción en ambientes de estrés abiótico como el espacio.

La duración limitada en el estudio preliminar llevó a resultados parciales, ya que impidió la observación completa de la colonización micorrízica en las raíces de las plantas de frijol. A pesar de evidenciarse un incremento en la biomasa radicular y una mayor presencia de esporas bajo microgravedad simulada, estos resultados reflejaron una simbiosis incompleta, dada la falta de estructuras especializadas como vesículas y arbuscúlos, las cuales son indicativas de una simbiosis plenamente establecida.

4.2 Efecto de la microgravedad simulada en la concentración proteica de *P. vulgaris*

Los resultados obtenidos reflejan diferencias significativas en la concentración proteica de las raíces de *P. vulgaris* bajo condiciones de microgravedad simulada y gravedad terrestre, así como entre plantas inoculadas y no inoculadas (Figura 4A, Cuadro 1). Las plantas cultivadas bajo gravedad terrestre presentaron concentraciones proteicas más elevadas en comparación con aquellas expuestas a microgravedad simulada. Esto concuerda con investigaciones previas que sugieren que la microgravedad induce un estado de estrés abiótico que desvía los recursos metabólicos de las plantas hacia mecanismos de supervivencia, lo que afecta la síntesis de proteínas (Kumar *et al.*, 2021). Desde esta perspectiva, se resalta el impacto positivo de la inoculación micorrízica bajo condiciones óptimas de crecimiento.

La disminución en la concentración proteica en plantas cultivadas bajo condiciones de microgravedad, tanto inoculadas como no inoculadas, parece estar relacionada con alteraciones fisiológicas inducidas por este entorno. Investigaciones sugieren que la microgravedad impacta significativamente la distribución de nutrientes en las plantas, afectando procesos clave como la síntesis de proteínas y el metabolismo celular (McLoughlin *et al.*, 2020; Yemets *et al.*, 2024). En particular, se ha demostrado que en microgravedad se altera el tráfico de proteínas a través de las membranas, afectando la señalización hormonal y el transporte de nutrientes esenciales, como las auxinas, que también son cruciales para el desarrollo y la respuesta al estrés (Mazars *et al.*, 2014; Baba *et al.*, 2022).

Además, en condiciones de microgravedad, las plantas suelen activar mecanismos de autofagia como respuesta de supervivencia celular para degradar y reciclar proteínas y otras macromoléculas dañadas o innecesarias bajo condiciones de estrés (McLoughlin *et al.*, 2020; Yemets *et al.*, 2024). Este proceso de autofagia podría haber influido en la disminución de las concentraciones de proteínas observadas en las plantas expuestas a microgravedad simulada, ya que permite a las plantas reutilizar componentes moleculares críticos en un entorno con recursos limitados. Es probable que, ante la restricción de nutrientes, las plantas priorizaran la conservación de recursos esenciales mediante la degradación selectiva de estructuras, lo que las ayudaría a favorecer su supervivencia en el estrés inducido por la microgravedad simulada.

Por otra parte, algunos autores sugieren que la microgravedad puede provocar tanto efectos beneficiosos como perjudiciales, dependiendo de la respuesta fisiológica de la planta y la disponibilidad de nutrientes en el medio de cultivo (Maffei *et al.*, 2024). Aunque, en este caso, los bajos niveles de proteínas observados podrían sugerir que las condiciones de microgravedad simulada impusieron limitaciones metabólicas que afectaron negativamente la capacidad de la planta para realizar una síntesis proteica eficiente (Yemets *et al.*, 2024). Esto probablemente se incrementó por la escasez de nutrientes esenciales en el medio de cultivo (McLoughlin *et al.*, 2020). Diversos estudios han demostrado que un entorno enriquecido con nitrógeno puede contrarrestar estos efectos al mejorar significativamente la concentración de proteínas en los cultivos, incluso bajo condiciones de estrés abiótico como la microgravedad simulada (Farooq *et al.*, 2024). Por lo tanto, optimizar la disponibilidad de nutrientes, particularmente el nitrógeno, en el medio de cultivo podría ser una buena estrategia para mitigar las restricciones metabólicas impuestas por la microgravedad simulada.

Es importante destacar que el protocolo de extracción de proteínas empleado en este estudio solo permitió cuantificar las proteínas intracelulares, excluyendo una fracción significativa del contenido proteico total de las plantas; específicamente las proteínas de membrana y pared celular. Estas proteínas juegan un papel fundamental en la estructura y función celular, especialmente en la interacción de la planta con su entorno y en su adaptación a condiciones de estrés (Mazars *et al.*, 2014), como las generadas por la microgravedad. Estudios han demostrado que la microgravedad puede alterar la síntesis de estos componentes

celulares, lo que afecta su producción y estabilidad; y puede influir en la dinámica del crecimiento y la respuesta adaptativa de las plantas (Kordyum y Chapman, 2017). Por lo tanto, la falta de cuantificación de las proteínas de membrana y pared celular en este estudio podría haber sesgado los resultados finales, ya que no se incluyó una porción esencial del contenido proteico.

4.3 Efecto de la microgravedad simulada en el crecimiento de *P. vulgaris*

Se conoce que la microgravedad afecta el crecimiento y desarrollo de las plantas al alterar procesos fisiológicos fundamentales, como la división celular y la señalización hormonal (Paul *et al.*, 2012). La regulación de auxinas, que también es importante en el desarrollo de las raíces y la formación de nódulos; se suele ver alterada en especies como *Medicago* y *Arabidopsis* (Wasson *et al.*, 2006). En investigaciones previas, se ha documentado una reducción en la división celular en las raíces bajo microgravedad, lo que provoca cambios en la morfología y afecta el crecimiento total de las plantas (Kiss *et al.*, 2019; Dauzart *et al.*, 2016).

En este estudio, no se observaron diferencias significativas en la longitud radicular entre plantas cultivadas bajo microgravedad simulada y gravedad terrestre; lo que contrasta con investigaciones previas que reportan cambios notables en la longitud de las raíces en condiciones de microgravedad (Paul *et al.*, 2012; Dauzart *et al.*, 2016). Sin embargo, la tendencia decreciente en la longitud final bajo condiciones de microgravedad simulada (Figura 3B) aunque no fue estadísticamente significativa, podría estar relacionada con la alteración en la distribución de auxinas, un fenómeno descrito en otras plantas expuestas a microgravedad (Kiss *et al.*, 2019).

Además, la tendencia observada en la gráfica también podría estar asociada con las condiciones experimentales. Este estudio se llevó a cabo en un laboratorio didáctico, en donde la contaminación cruzada con hongos y bacterias es común debido a la diversidad de experimentos realizados. En base a esto, es importante mencionar que se aisló e identificó al hongo *Fusarium spp.* como contaminante en las muestras inoculadas y a mohos ambientales en las no inoculadas; lo que pudo haber afectado negativamente el crecimiento de las plantas. En condiciones de microgravedad, se ha documentado que *Fusarium spp.* incrementa su virulencia (D'Agostino *et al.*, 2022; Totsline *et al.*, 2023); lo que podría haber provocado una infección en las plantas, causando pérdida de tejido vegetal y afectando el crecimiento radicular. Aunque la diferencia no fue estadísticamente significativa, la infección por *Fusarium* pudo interferir en la absorción de nutrientes y la división celular, afectando el desarrollo normal de las raíces. Esto podría explicar la disminución, aunque no significativa, en la longitud final de las raíces expuestas a microgravedad simulada.

Es fundamental realizar más estudios sobre los efectos de la microgravedad en la fisiología de las plantas, especialmente en *P. vulgaris*, para comprender mejor los mecanismos que están detrás de estas respuestas. También, se podría analizar si la alteración de la división celular, junto con los cambios hormonales, desempeña un rol más complejo en la adaptación de las plantas a condiciones espaciales. Asimismo, el control de patógenos como *Fusarium* es crucial en futuras investigaciones para evitar la interferencia en estudios que se enfocan principalmente en evaluar el impacto de la microgravedad simulada en el crecimiento vegetal.

Dada la necesidad de mejorar las condiciones experimentales para reducir la influencia de factores externos en el crecimiento, la absorción de nutrientes y la simbiosis micorrízica; es recomendable implementar un control con rotación vertical en futuros estudios. Este control ayudaría a discernir si el crecimiento observado en microgravedad es efecto de la redistribución de nutrientes o de la orientación de la luz, lo que podría sesgar los resultados de crecimiento radicular y micorrízico. Como se ha identificado previamente, la disposición espacial puede alterar significativamente la distribución de nutrientes en medios

cerrados (Dauzart *et al.*, 2016; Hayes *et al.*, 2014; Sathasivam *et al.*, 2021), lo que destaca la importancia de este control adicional en estudios de microgravedad simulada.

Además, sería útil investigar cómo las plantas cultivadas en microgravedad simulada se adaptan al ser reintroducidas en suelos terrestres, especialmente en contextos agrícolas con suelos de baja fertilidad o condiciones adversas. Estudios previos han demostrado que especies como *Arabidopsis thaliana*, después de ser cultivadas en microgravedad en la Estación Espacial Internacional, presentan adaptaciones significativas al ser expuestas nuevamente a la gravedad terrestre; lo cual afecta su orientación y respuesta hormonal (Medina *et al.*, 2021). Estas observaciones sugieren que el cultivo en condiciones de microgravedad simulada podría inducir adaptaciones que, al regresar a la Tierra, fortalezcan la eficiencia en su crecimiento y la simbiosis con hongos micorrízicos. Explorar estos efectos podría ofrecer estrategias novedosas para optimizar la producción agrícola en suelos con escasez de nutrientes, promoviendo una simbiosis micorrízica más efectiva.

En contraste al estudio preliminar en comparación del estudio actual permitió un análisis más exhaustivo y detallado de la simbiosis en condiciones de microgravedad simulada, logrando observar una colonización micorrízica más completa en las raíces de *P. vulgaris*. Se documentó la presencia de vesículas y otras estructuras simbióticas, las cuales sugieren una simbiosis funcional plena bajo dichas condiciones. Estas estructuras, además de facilitar el intercambio de nutrientes, podrían ofrecer una ventaja adaptativa para las plantas en condiciones de microgravedad, contribuyendo a la resiliencia de los cultivos en entornos espaciales.

5 Conclusiones

El estudio evaluó cómo la microgravedad simulada afecta la simbiosis entre *P. vulgaris* y hongos micorrízicos arbusculares; en donde se observó una mayor colonización micorrízica en las raíces, con estructuras hifales, esporas y vesículas que sugieren una simbiosis completa bajo esta condición. Estos resultados indican que la microgravedad simulada podría ofrecer ventajas adaptativas al cultivo de frijol, promoviendo su desarrollo bajo estrés ambiental. Asimismo, en las plantas cultivadas bajo microgravedad simulada se observó una menor concentración proteica en comparación con las cultivadas en gravedad terrestre, lo que sugiere la activación de mecanismos adaptativos para la conservación de recursos en condiciones de estrés. Aunque no se encontraron diferencias significativas en la longitud radicular entre ambos tratamientos, se detectó una tendencia a la reducción en el crecimiento bajo microgravedad simulada, posiblemente debido a la presencia de contaminantes como *Fusarium spp.* que pudieron afectar el desarrollo de las plantas.

Esta investigación constituye el primer análisis en Guatemala y Centroamérica en emplear un clinostato bidimensional para simular condiciones de microgravedad y observar la colonización por hongos micorrízicos arbusculares en plantas de importancia agrícola. Por lo tanto, estos descubrimientos abren nuevas posibilidades para aplicar la simulación de microgravedad en la agricultura local, evaluando su efectividad en otros cultivos de importancia regional en zonas afectadas por estrés ambiental.

6 Agradecimientos

Agradecemos a la Dra. Patrizia Lupo por su constante acompañamiento y apoyo a lo largo de toda la investigación. También, le agradecemos a la Dra. Dalia Lau por proporcionarnos las esporas micorrízicas utilizadas en la experimentación y por su valioso asesoramiento durante el estudio. Igualmente, extendemos nuestro reconocimiento a la MSc. Christa Contreras y a la Lic. Katherine Herrera por su apoyo

durante la fase de experimentación. Por último, agradecemos al Departamento de Bioquímica y Microbiología de la Universidad del Valle de Guatemala por la donación de reactivos y el acceso al equipo necesario para la experimentación, así como al Laboratorio de Protección Vegetal y al personal del invernadero de la misma institución por su apoyo.

7 Referencias

- Andrade-Torres, A. (2010). Micorrizas: antigua interacción entre plantas y hongos. *Ciencia*, 61(4):84–90.
- Arkhipov, S. (2016). Method for counting fungal spores. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1074.4560/1>.
- Baba, A., Mir, M., Riyazuddin, R., Cséplő, A., Rigó, G., y Fehér, A. (2022). Plants in Microgravity: Molecular and Technological Perspectives. *International journal of molecular sciences*, 23(18). <https://doi.org/10.3390/ijms231810548>.
- Borghi, L., Liu, G. W., Emonet, A., Kretzschmar, T., y Martinoia, E. (2016). The importance of strigolactone transport regulation for symbiotic signaling and shoot branching. *Planta*, 246(6):1351–1360. <https://doi.org/10.1007/s00425-016-2503-9>.
- Buechel, T. y Bloodnick, E. (2016). Description of types, benefits and uses - Greenhouse Product News. <https://gpnmag.com/article/mycorrhizae-description-of-types-benefits-and-uses/>.
- Carrillo-Saucedo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S., y Ortega, R. C. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta Botanica Mexicana*, (129). <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1932>.
- Dauzart, A. J. C., Vandenbrink, J. P., y Kiss, J. Z. (2016). The Effects of Clinorotation on the Host Plant, *Medicago truncatula*, and Its Microbial Symbionts. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 3. <https://doi.org/10.3389/fspas.2016.00003>.
- D'Agostino, M., Babin, A.-L., Zaffino, M., Fripiat, J.-P., Machouart, M., y Debourgogne, A. (2022). Simulated Microgravity Created Using a Random Positioning Machine Induces Changes in the Physiology of the *Fusarium solani* Species Complex. *Microorganisms*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/microorganisms10112270>.
- Eiermann, P., Kopp, S., Hauslage, J., Hemmersbach, R., Gerzer, R., e Ivanova, K. (2013). Adaptation of a 2-D Clinostat for Simulated Microgravity Experiments with Adherent Cells. *Microgravity Sci. Technol.*, 25:153–159. <https://doi.org/10.1007/s12217-013-9341-1>.
- Erbersdobler, H., Barth, C., y Jahreis, G. (2017). Legumes in human nutrition nutrient content and protein quality of pulses. *Ernährungs Umschau*, 64:134 – 139. <https://doi.org/10.4455/eu.2017.034>.
- Farooq, M., Ali, S., Khan, M., Jang, Y.-H., Kim, E.-G., Zhao, D.-D., y Kim, K.-M. (2024). Investigating plant responses to microgravity and adaptations in gravisensitive environments. *Environmental Sciences Europe*, 36. <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00851-7>.
- FIRA (2022). Panorama agroalimentario – frijol 2022. Technical report, Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. Recuperado de <https://sursureste.org.mx/wp-content/uploads/2023/01/Panorama-Agroalimentario-Frijol-2022.pdf>.

Gold Technologies (2019). Bradford Protein Assay: For protein Quantification. Technical report, Goldbio. Disponible en: <https://www.goldbio.com/documents/3604/BradfordProteinAssay.pdf>.

Hayes, M. W., Stutte, G. W., McKeon-Bennett, M., y Murray, P. G. (2014). Mutualism Within a Simulated Microgravity Environment - Promotes the Growth of *medicago truncatula*. *Gravitational and Space Research*, 2(2):21–33. <https://doi.org/10.2478/gsr-2014-0015>.

Honrubia, M. (2009). The Mycorrhizae: a plant-fungus relation that has existed for more than 400 million years. *Anales Del Jardín Botánico De Madrid*, 66(S1):133–144. <https://doi.org/10.3989/ajbm.2226>.

Isaacson, T., Damasceno, C. M., Saravanan, R. S., He, Y., Catalá, C., Saladié, M., y Rose, J. K. (2006). Sample extraction techniques for enhanced proteomic analysis of plant tissues. *Nature protocols*, 1(2):769–774. <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.102>.

Kiss, J. Z., Wolverton, C., Wyatt, S. E., Hasenstein, K. H., y Van Loon, J. J. (2019). Comparison of Microgravity Analogs to Spaceflight in Studies of Plant Growth and Development. *Frontiers In Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01577>.

Kordyum, E. L. y Chapman, D. K. (2017). Plants and microgravity: Patterns of microgravity effects at the cellular and molecular levels. *Cytology And Genetics*, 51(2):108–116. <https://doi.org/10.3103/s0095452717020049>.

Krzyzanski, H., Milaneze, M., y Carrenho, R. (2021). Arbuscular mycorrhizal and dark septate fungi are not common in roots of epiphytic pteridophytes of a transitional forest area in south brazil. *Acta Botanica Brasilia*, pp. 569–576. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-33062020abb0396>.

Kumar, V., Abbas, A. K., y Aster, J. C. (2021). *Robbins y Cotran. Patología estructural y funcional*. Elsevier Health Sciences.

Liu, G., Bollier, D., Gübeli, C., Peter, N., Arnold, P., Egli, M., y Borghi, L. (2018). Simulated microgravity and the antagonistic influence of strigolactone on plant nutrient uptake in low nutrient conditions. *NPJ Microgravity*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s41526-018-0054-z>.

Maffei, M. E., Balestrini, R., Costantino, P., Lanfranco, L., Morgante, M., Battistelli, A., y Del Bianco, M. (2024). The physiology of plants in the context of space exploration. *Communications Biology*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s42003-024-06989-7>.

Mazars, C., Brière, C., Grat, S., Pichereaux, C., Rossignol, M., Pereda-Loth, V., Eche, B., Boucheron-Dubuisson, E., Le Disquet, I., Medina, F. J., Graziana, A., y Carnero-Diaz, E. (2014). Microgravity Induces Changes in Microsome-Associated Proteins of Arabidopsis Seedlings Grown on Board the International Space Station. *PLOS ONE*, 9(3):1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091814>.

McLoughlin, F., Marshall, R. S., Ding, X., Chatt, E. C., Kirkpatrick, L. D., Augustine, R. C., Li, F., Otegui, M. S., y Vierstra, R. D. (2020). Autophagy Plays Prominent Roles in Amino Acid, Nucleotide, and Carbohydrate Metabolism during Fixed-Carbon Starvation in Maize. *The Plant Cell*, 32(9):2699–2724. <https://doi.org/10.1105/tpc.20.00226>.

Medina, F. J., Manzano, A., Villacampa, A., Ciska, M., y Herranz, R. (2021). Understanding Reduced Gravity Effects on Early Plant Development Before Attempting Life-Support Farming in the Moon and Mars. *Frontiers In Astronomy And Space Sciences*, 8. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.729154>.

- Paul, A., Amalfitano, C. E., y Ferl, R. J. (2012). Plant growth strategies are remodeled by spaceflight. *BMC Plant Biology*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/1471-2229-12-232>.
- Romero-Felix, C. S., del Paso, D. F. P., Salas-Arellanes, J. A., Saucedo-Acosta, R., Buelna-Tarín, S., y López-Valenzuela, B. E. (2023). Bioestimulantes en el crecimiento y rendimiento de *P. vulgaris* L. en el Norte de Sinaloa. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(2).
- Ruiz Sánchez, M., Santana Baños, Y., Muñoz Hernández, Y., Martínez Robaina, A., y Vishnu Bharat, B. (2015). Simbiosis de micorrizas arbusculares en plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) en condiciones de inundación y secano. *Acta Agronómica*, 64:227–233.
- Saeed, W., Naseem, S., y Ali, Z. (2017). Strigolactones Biosynthesis and Their Role in Abiotic Stress Resilience in Plants: A Critical Review. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01487>.
- Sathasivam, M., Hosamani, R., K Swamy, B., y Kumaran G, S. (2021). Plant responses to real and simulated microgravity. *Life Sciences in Space Research*, 28:74–86. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2020.10.001>.
- Totsline, N., Kniel, K. E., y Bais, H. P. (2023). Microgravity and evasion of plant innate immunity by human bacterial pathogens. *NPJ Microgravity*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41526-023-00323-x>.
- Urgiles Gómez, N., Haug, I., Setaro, S., y Aguirre, N. (2016). *Introduction to Mycorrhizas in the Tropics with Emphasis on the Montane Forest in Southern Ecuador*. EDILOJA. ISBN: 978-9978-355-32-9.
- Wang, H., Li, X., Krause, L., Görög, M., Schüler, O., Hauslage, J., Hemmersbach, R., Kircher, S., Lasok, H., Haser, T., Rapp, K., Schmidt, J., Yu, X., Pasternak, T., Aubry-Hivet, D., Tietz, O., Dovzhenko, A., Palme, K., y Ditengou, F. A. (2015). 2-D Clinostat for Simulated Microgravity Experiments with Arabidopsis Seedlings. *Microgravity Science And Technology*, 28(1):59–66. <https://doi.org/10.1007/s12217-015-9478-1>.
- Wasson, A. P., Pellerone, F. I., y Mathesius, U. (2006). Silencing the flavonoid pathway in medicago truncatula inhibits root nodule formation and prevents auxin transport regulation by rhizobia. *The Plant Cell*, 18(7):1617–1629. <https://doi.org/10.1105/tpc.105.038232>.
- Yemets, A., Shadrina, R., Blume, R., y Plokhovska, S. and Blume, Y. (2024). Autophagy formation, microtubule disorientation, and alteration of ATG8 and tubulin gene expression under simulated microgravity in Arabidopsis thaliana. *Npj Microgravity*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41526-024-00381-9>.

NOTAS INFORMATIVAS

NOTAS INFORMATIVAS

1 *POLÍTICA EDITORIAL*

La Revista Ciencias Espaciales es una publicación semestral de la Facultad de Ciencias Espaciales de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras. Cada año calendario se publica un Volumen que consta de dos Números. El primer número es llamado de primavera (que se publica a más tardar el 15 de junio de cada año) y el segundo de otoño (que se publica a más tardar el 15 de diciembre de cada año); ambos números incluyen artículos de los campos de Astronomía y Astrofísica, Ciencia y Tecnologías de la Información Geográfica, Arqueoastronomía y Astronomía Cultural, Ciencias Aeronáuticas, Ciencias Astronáuticas y Ciencias Afines.

La Revista Ciencias Espaciales tiene un Consejo Editorial integrado por: un director, un editor en jefe, editores por campo del conocimiento y académicos externos invitados. Ellos son los encargados de recibir los documentos y gestionar el proceso de selección de los artículos, edición y publicación de la Revista. La Revista Ciencias Espaciales cuenta además con un Consejo Científico Internacional responsable de velar por la calidad del contenido de la Revista. En el interior de la Portada se publican los nombres del Director, Editor en jefe, Miembros del Consejo Editorial y del Consejo Científico.

La Revista Ciencias Espaciales edita trabajos originales de investigación cumpliendo estándares éticos y buenas prácticas propios de publicaciones del ámbito científico y académico. Por ello, se rige en el Código de Conducta y Mejores Prácticas Directrices para Editores de Revistas, basado en el Committee on Publication Ethics (COPE) (<https://publicationethics.org/become-member>) y en el Manual de ética de la investigación en la UNAH (<https://diciht.unah.edu.hn/dmsdocument/973-serie-4>). Los artículos publicados pueden estar referidos a investigaciones científicas en los campos científicos de la Facultad de Ciencias Espaciales. El contenido de cada artículo es responsabilidad de sus autores. Los artículos son evaluados por pares doble ciego.

La revista Ciencias Espaciales publicará artículos originales, utilizando un software especializado para la detección de plagio como garantía de la originalidad de los trabajos recibidos. Sólo se permitirá la publicación de artículos no originales en el marco de convenios realizados con otras publicaciones de las mismas disciplinas comprendidas por la Revista Ciencias Espaciales, informando expresamente de esta situación.

El consejo editorial se reserva el derecho de rechazar o devolver para su revisión, cualquier artículo que no se considere completo o apropiado. Antes de que un artículo sea publicado, sus autores deben mostrar evidencias de contar con los permisos para usar figuras y datos en caso de ser necesario. Si un artículo tiene varios autores, debe presentarse evidencia que todos los coautores desean publicarlo.

La Revista Ciencias Espaciales se encuentra indexada en las bases de datos de Central American Journal Online (CAMJOL) y Latindex.

2 INSTRUCCIONES A LOS AUTORES

2.1 Para los editores

Los manuscritos son evaluados por el consejo editorial en consulta con pares doble ciego. Los autores pueden sugerir revisores externos, pero la revista no asegura la aceptación del revisor recomendado. El Consejo Editor garantiza el anonimato de los revisores y de los autores y tienen la decisión final sobre la publicación de los manuscritos. Los autores son informados de la aceptación o no aceptación de su manuscrito.

El proceso de revisión y publicación de cada artículo es el siguiente: 1) recepción del artículo de el o la autora por el editor encargado de cada departamento de la Facultad; 2) Remisión de manuscrito y formato de revisión a pares ciegos con el compromiso de mantener el carácter confidencial de toda la información de los trabajos, aun cuando no sean publicados; 3) Informar al autor/a las observaciones realizadas para corregir e incorporar los cambios sugeridos por los revisores; 4) Resolución y notificación de aceptación o no aceptación del artículo por parte del consejo editorial; 5) Publicación del artículo en el volumen y número correspondiente.

2.2 Para los autores

Los autores son responsables de los contenidos de sus artículos, y de garantizar que sus documentos se presenten en la forma adecuada, incluyendo los permisos necesarios para agregar figuras, tablas, u otro material protegido.

La Revista Ciencias Espaciales está bajo una licencia de Creative Commons: Reconocimiento - No Comercial - Compartir igual (CC BY-NC-SA), de acuerdo con la "Declaración de México a favor del ecosistema latinoamericano de acceso abierto no comercial".



Declaración de privacidad: Los nombres y direcciones de correo-electrónico introducidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines declarados por esta revista y no estarán disponibles para ningún otro propósito u otra persona.

Cada artículo que se remita para ser publicado en la Revista Ciencias Espaciales debe organizarse en secciones. Todas las secciones deben escribirse a espacio sencillo de acuerdo a la plantilla disponible en <http://faces.unah.edu.hk/revistace/> y <https://www.camjol.info/index.php/CE/index>. El orden de las secciones es el siguiente:

- Título
- Resumen en idioma español
- Resumen en idioma inglés
- Introducción
- Metodología

- Resultados
- Discusión
- Conclusiones
- Agradecimientos si se considera necesario
- Referencias bibliográficas

2.2.1 Título

- Escrito en mayúsculas, centrado y colocado en la parte superior de la página. El título debe ser conciso, pero informativo. Su objetivo es dar a conocer al lector lo esencial del artículo. No debe exceder las 15 palabras.
- Nombre del autor o los autores. Escribir el nombre completo del autor o autores, indicando su grado académico, su filiación, su dirección de correo electrónico y de preferencia el identificador ORCID.

2.2.2 Resumen en idioma español

Debe incluirse un resumen en idioma español, con las siguientes características:

- Debe tener un máximo de 250 palabras.
- La estructura debe contener el objetivo del estudio; metodología, técnicas o procedimientos básicos utilizados; los resultados más destacados y las principales conclusiones. Hará hincapié en aquellos aspectos del estudio o de las observaciones que resulten más novedosas o de mayor importancia.
- El resumen no debe incluir citas bibliográficas, ni siglas ni abreviaturas, a menos que sean las convencionales conocidas.
- Con el encabezado de palabras clave, inmediatamente después del resumen, se deben incluir de 3 a 5 palabras clave las cuales facilitaran el indizado del artículo.

2.2.3 Resumen en idioma inglés

Un resumen y palabras clave también deben ser presentados escritos en idioma inglés.

2.2.4 Cuerpo del artículo

Al inicio de cada sección, los títulos de primer nivel deben escribirse en letras mayúsculas y minúsculas cursivas negritas. Los títulos de segundo nivel deben escribirse en mayúsculas y minúsculas, en negritas. Los títulos de tercer nivel deben escribirse en mayúsculas y minúsculas, y en letra cursiva. La enumeración de los distintos niveles se hará de acuerdo a la plantilla utilizada por la Revista Ciencias Espaciales y que está disponible en <http://faces.unah.edu.hn/revistace/> y <https://www.camjol.info/index.php/CE/index>.

Se recomienda que el cuerpo del artículo se estructure en las siguientes secciones: Introducción, Metodología, Resultados, Discusión y Conclusiones.

Introducción. La finalidad de esta sección es ubicar al lector en el contexto en que se realizó la investigación, por lo que debe mencionar claramente el propósito de la investigación, por tanto, es importante que se presenten de forma clara los objetivos, la fundamentación teórica, el problema abordado y, cuando corresponda, la hipótesis. Se debe enunciar de forma resumida la justificación del estudio.

Metodología. En términos generales, es la manera estructurada por medio de la cual se ha logrado obtener conocimiento o información producto de la investigación. En términos prácticos, es la manera seleccionada para solucionar el problema estudiado garantizando rigor científico. Puede incluir aspectos como el escenario en el cual se desarrolló la investigación, el o los objetos de estudio, el tamaño de la muestra, condiciones de trabajo, métodos de recolección y análisis de datos.

Resultados. Presente los resultados auxiliándose de tablas y figuras, siguiendo una secuencia lógica. No repita en el texto los datos de las tablas y figuras, destaque los aspectos más relevantes de las mismas. Recuerde que las tablas y figuras deben tener una numeración correlativa y siempre deben estar referidas en el texto. Los resultados deben ser enunciados claros, concretos y comprensibles para el lector; y por supuesto, se deben desprender del proceso investigativo enmarcado en el artículo.

Discusión. Debe centrarse en los resultados de la investigación y hacer hincapié en aquellos aspectos nuevos e importantes del estudio. No debe repetir, de forma detallada, los datos u otras informaciones ya incluidas en los apartados anteriores. Se deben reportar las limitaciones del estudio, así como sus implicaciones en futuras investigaciones. Si es posible, se comparan las observaciones realizadas con las de otros estudios pertinentes.

Conclusiones. Son proposiciones o ideas producto o resultado de la investigación realizada, de modo que se deben relacionar con los objetivos del estudio. Asegúrese de fundamentar sus conclusiones en datos sólidos y suficientes.

Agradecimientos. Los agradecimientos se incluyen al final del texto. Este debe ser un apartado muy breve, en donde se agradece a las personas que han colaborado con la investigación, o a las instituciones que apoyaron el desarrollo del trabajo. También se debe incluir en los agradecimientos a los entes que brindaron el apoyo financiero y otros recursos.

2.2.5 Referencias citadas

La lista de las referencias citadas y las citas deben concordar y ser precisas. Todas las referencias que aparecen citadas en el texto deben de aparecer también en la lista de referencias; y todas las referencias listadas deben de aparecer mencionadas en el texto.

Las referencias deben ser utilizadas en el texto incluyendo el apellido del autor y el año de la publicación. Para construir la lista de referencias se recomienda utilizar las Normas Internacionales APA, en su séptima edición, distinguiendo si la cita se refiere a un solo autor o a varios autores de un artículo, al autor de un libro, sección o capítulo de un libro, una publicación periódica u otra obtenida en Internet. En tal sentido, es necesario incluir todas las fuentes que sustentan la investigación realizada y que se usaron directamente en el trabajo.

2.2.6 Figuras y tablas

Las figuras y tablas se deben entregar por separado en formato PDF, JPG, PNG, TIFF o GIF (con una resolución mínima de 300 dpi). Los créditos de las imágenes deben estar incluidas en la leyenda de las mismas. Es preferible utilizar imágenes elaboradas por el o los autores del artículo. Aquellas imágenes cuyo autor no sea el mismo del artículo deberán contar con la debida autorización. En caso de importarse tablas de datos desde otro software en formato de figura, se tratarán igual que las figuras de imágenes, o alternativamente se pueden crear dentro del texto usando la función de diseño de tabla de Word o $\text{\LaTeX}$, según el formato establecido en la plantilla correspondiente.

2.2.7 Abreviaturas y símbolos

En las siglas, abreviaturas y símbolos, use únicamente las de uso común (ejemplo: ONU, UNESCO, OACI, entre otros). Evite las abreviaturas en el título y en el resumen. Cuando en el texto se emplee por primera vez una abreviatura o sigla, esta debe ir precedida del término completo, salvo si se trata de una unidad de medida común.

2.2.8 Recomendaciones generales para presentar el manuscrito

Para presentar el manuscrito, se recomienda al autor o autores tener en cuenta:

- Todo el manuscrito debe presentarse en un solo documento, escrito con letra Palatino, tamaño 11.
- Las páginas se numeran consecutivamente comenzando por la página del título hasta terminar con la última referencia citada.
- Incluya las autorizaciones para la reproducción de material anteriormente publicado, para la utilización de figuras o ilustraciones que puedan identificar a personas o para imágenes que tengan derechos de autor. Adjunte la cesión de los derechos de autor y formularios pertinentes.
- Los autores externos a la Facultad de Ciencias Espaciales deben entregar el manuscrito vía email al correo electrónico: revista.cespaciales@unah.edu.hn.

Fecha de última actualización: 4 de diciembre de 2024.

Fecha de aprobación: 4 de diciembre de 2024.



UNAH
UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE HONDURAS



Facultad de Ciencias Espaciales
Universidad Nacional Autónoma de Honduras
Ciudad Universitaria, Edificio K-2
Bulevar Suyapa, Tegucigalpa MDC, Honduras
Teléfono: (504) 2216-3034
Correo electrónico: revista.cespaciales@unah.edu.hn
<http://faces.unah.edu.hn/revistace/> y
<https://www.camjol.info/index.php/CE/index>