

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

Los ojos de México en el espacio

Los satélites artificiales,
solitarios viajeros

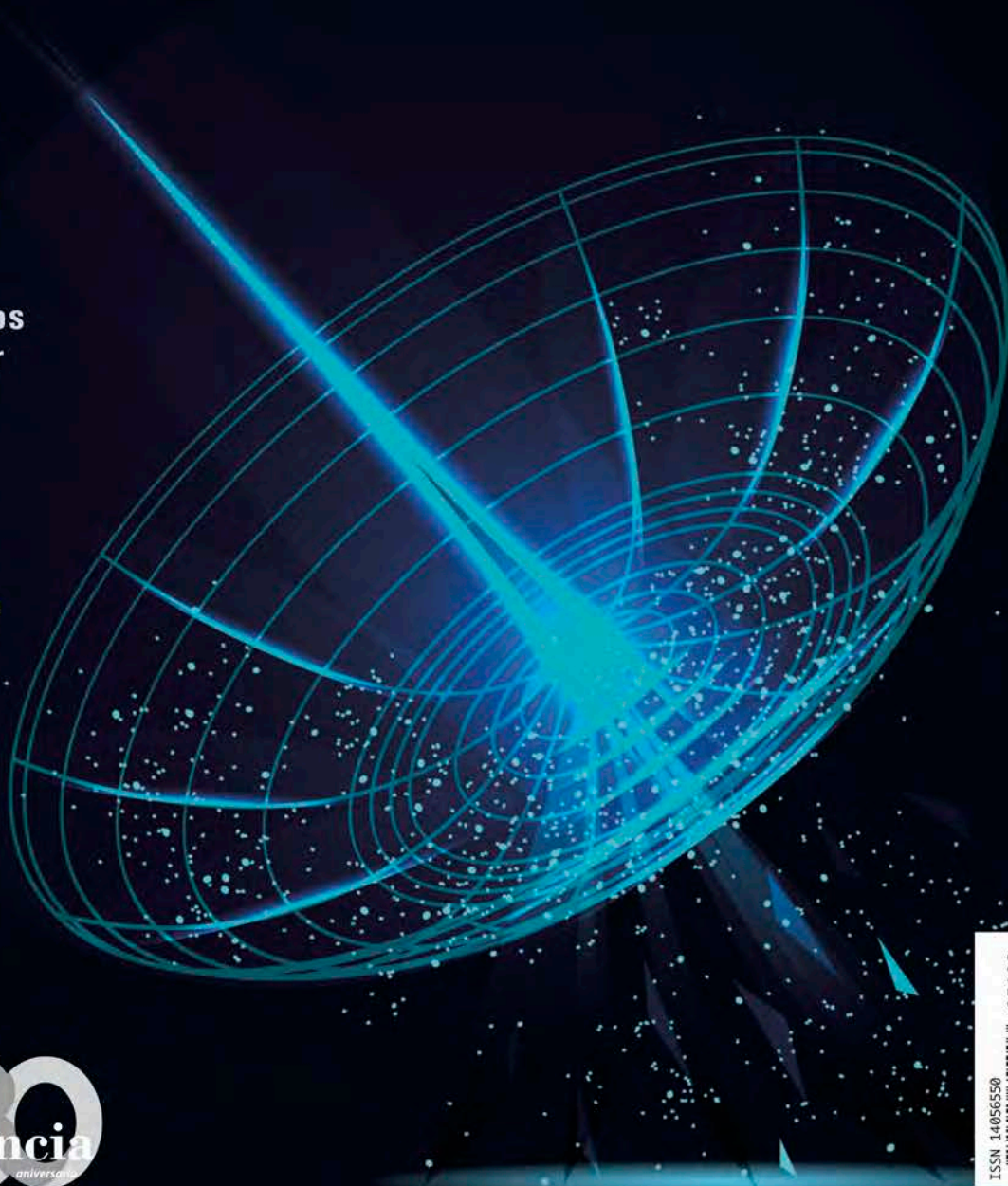
Basura en el mar,
en la tierra
y hasta en el espacio

El programa espacial
de la UNAM

Los satélites pequeños
también van al doctor

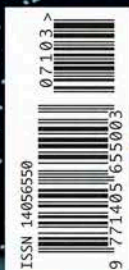
Olga Costa y la fiesta
de la diversidad
frutícola de México

Tiempos difíciles
para la estrella
Betelgeuse



www.revistaciencia.amc.edu.mx

\$50.00 MN
ISSN 1405-6550





LEAMOS LA CIENCIA PARA TODOS

CONVOCATORIA

En el marco del Programa de lectoescritura y divulgación de la ciencia del Fondo de Cultura Económica se convoca al XVII Concurso Leamos La Ciencia para Todos, 2020-2021. Esta convocatoria va dirigida a jóvenes entre 12 y 30 años de edad, a personas de 30 años en adelante, así como a profesores en activo, de acuerdo con las siguientes

BASES

El concursante deberá redactar un texto a partir de la lectura de un título de ciencia del Fondo de Cultura Económica de la colección La Ciencia para Todos o de alguno de los títulos de distintas colecciones incluidos en esta convocatoria.

Los libros pueden consultarse en bibliotecas públicas del país o adquirirse en librerías y plataformas electrónicas.

I. Consideraciones generales

Todo trabajo debe:

- Enviarse a través del sitio: www.lacienciaparatodos.mx/concurso
- Basarse exclusivamente en alguno de los títulos incluidos en esta convocatoria
- Cumplir con los requisitos especificados en el apartado II
- Pertenecer a alguna de las siguientes categorías:

Categoría A. RESUMEN o RESEÑA

De 12 a 18 años de edad

Los participantes de esta categoría podrán elegir uno de los 253 títulos de la colección La Ciencia para Todos y elegir su participación entre estos dos géneros discursivos:

- **Resumen**, de 2 a 4 cuartillas. Deberán escribir un texto que sintetice las ideas principales del libro e incluir un breve párrafo final que incluya la opinión del participante.
- **Reseña**, de 4 a 7 cuartillas. Deberán describir el contenido de la obra, destacar las ideas principales y opinar sobre ellas.

Esta categoría se evaluará por rangos de edad.

Categoría B. ENSAYO, de 5 a 10 cuartillas

De 19 años en adelante

Los participantes de esta categoría podrán elegir uno de los 253 títulos de la colección La Ciencia para Todos o alguno de las otras colecciones incluidas en esta convocatoria. Deberán redactar un ensayo que incluya una valoración crítica de la obra mediante el desarrollo de un tema de manera libre. Se deberá incluir una bibliografía con los libros, artículos o páginas web consultados para la redacción del ensayo.

Esta categoría se evaluará por rangos de edad.

Categoría C. ENSAYO DIDÁCTICO, de 20 a 40 cuartillas

Profesores en activo de cualquier nivel

Los participantes de esta categoría podrán elegir uno de los 253 títulos de la colección La Ciencia para Todos y deberán escribir un ensayo didáctico en el que realizarán una valoración crítica del contenido de la obra y describirán la experiencia de su lectura en el aula como recurso didáctico. Se deberá incluir una bibliografía con los libros, artículos o páginas web consultados para la redacción del ensayo didáctico.

Categoría D. TEXTO LIBRE, de 3 a 6 cuartillas

De 30 años en adelante

Los participantes de esta categoría podrán elegir uno de los 253 títulos de la colección La Ciencia para Todos o alguno de las otras colecciones incluidas en esta convocatoria y deberán redactar un texto que contenga una reflexión provocada por la lectura del libro seleccionado.

En el portal del concurso se incluyen definiciones útiles para la elaboración del trabajo, así como vínculos a distintos manuales que ejemplifican ampliamente las características de cada una de las categorías (géneros discursivos) arriba mencionadas. Disponible en el siguiente enlace: <http://www.lacienciaparatodos.mx/index.php/2019/05/16/materialapoyo/>

II. Requisitos indispensables para presentar los trabajos

1. Todo trabajo debe incluir los siguientes datos en la parte superior:

Datos generales del participante

- Categoría en la que participa
- Nombre completo: apellido paterno, apellido materno, nombre(s)
- Fecha de nacimiento
- Teléfono
- Correo electrónico
- Nombre de la escuela
- Dirección de la escuela (calle, número, colonia, alcaldía o municipio, entidad federativa, código postal)

Ficha bibliográfica de la obra

- Autor(es): apellido(s), nombre(s)
- Título (y subtítulo) del libro
- Editorial
- Lugar
- Año
- Número de páginas

La página que incluye datos generales del participante y ficha bibliográfica de la obra seleccionada no cuenta como cuartilla.

2. Todo trabajo debe cumplir las siguientes características mínimas de formato:

- Documento de Word en español, en tamaño carta, utilizando mayúsculas y minúsculas (no escribir sólo en mayúsculas)
- Tipo de letra Times New Roman de 12 puntos
- Interlineado a doble espacio (2.0)
- No se deberán incluir imágenes en las categorías A, B y D

III. Convocatoria y cierre

Queda abierta la presente convocatoria a partir del 27 de mayo de 2020 y hasta las 16 horas del viernes 28 de mayo de 2021 (hora del centro de México).

IV. Registro y envío de trabajos

El registro y el envío de los trabajos se realizará únicamente en línea a partir del 15 julio de 2020 de la manera siguiente:

1. El participante debe tener a la mano el trabajo concluido en Word o en PDF y la información siguiente:

Datos personales

- Nombre completo: apellido paterno, apellido materno, nombre(s)
- Fecha de nacimiento
- Lugar de nacimiento
- Nacionalidad
- Domicilio particular: calle, número, colonia, municipio o alcaldía, código postal y entidad federativa
- Teléfonos: particular y celular con clavelada
- Correo electrónico

Datos de la escuela (en su caso)

- Nombre de la escuela
- Grado que se cursa o imparte
- Domicilio: calle, número, colonia, municipio o alcaldía, código postal y entidad federativa
- Teléfono con clavelada
- Nombre del asesor (en su caso)

Los participantes en la categoría C deberán además presentar en formato PDF o JPG un comprobante que los acredite como docentes en activo de cualquier nivel frente al aula.

2. El participante entrará al sitio www.lacienciaparatodos.mx/concurso y realizará las acciones siguientes:

- Seleccionar la opción "REGISTRO Y ENVÍO DE TRABAJOS"

- Llenar todos los campos solicitados
- Adjuntar el trabajo en Word o PDF
- Al término del registro se asignará un número de folio que llegará automáticamente al correo electrónico registrado.

De no obtener el folio, favor de entrar a la opción "CONTACTO" o comunicarse (entre 8:30 y 15:30 horas) a los teléfonos: (52) (55) 5227 4631; (52) (55) 5449 1819; (52) (55) 5449 1822

V. Evaluación

El jurado estará integrado por destacados científicos y divulgadores de la ciencia. Para la evaluación se tomarán en cuenta, entre otros, los siguientes criterios:

- Cumplimiento de las características especificadas en II.1 y II.2 más arriba
- Sintaxis
- Ortografía
- Vocabulario
- Originalidad
- Estructura
- Claridad y precisión de las ideas
- Autenticidad del trabajo

(Los trabajos que contengan fragmentos copiados y pegados de sitios de internet o de cualquier otra fuente sin la debida referencia bibliográfica serán considerados como plagio y se eliminarán automáticamente.)

El fallo del jurado será inapelable.

VI. Estimulos

Primer lugar

- Bono con valor de \$10 000.00 (DIEZ MIL PESOS 00/100 MN)
- Vale por \$1 000.00 (UN MIL PESOS 00/100 MN) para adquirir libros en la red de librerías del Fondo de Cultura Económica
- Diploma

Segundo lugar

- Bono con valor de \$ 8 000.00 (OCHO MIL PESOS 00/100 MN)
- Vale por \$1 000.00 (UN MIL PESOS 00/100 MN) para adquirir libros en la red de librerías del Fondo de Cultura Económica
- Diploma

Tercer lugar

- Bono con valor de \$6 000.00 (SEIS MIL PESOS 00/100 MN)
- Vale por \$1 000.00 (UN MIL PESOS 00/100 MN) para adquirir libros en la red de librerías del Fondo de Cultura Económica
- Diploma

Menciones

- Vale por \$1 000.00 (UN MIL PESOS 00/100 MN) para adquirir libros en la red de librerías del Fondo de Cultura Económica
- Diploma

VIII. Dudas

En caso de duda el participante puede:

- Escribir al correo electrónico lacienciaparatodos@gmail.com
- Comunicarse a los teléfonos: 52 (55) 5227 4631; 52 (55) 5449 1819; 52 (55) 5449 1822
- Consultar la página electrónica www.lacienciaparatodos.mx y seleccionar la opción "CONTACTO"

IX. Ganadores

- Los nombres de los ganadores se darán a conocer el lunes 18 de octubre de 2021 en redes sociales, en la página electrónica del FCE y en www.lacienciaparatodos.mx
- A los ganadores se les notificará por correo electrónico

X. Asuntos generales

- La participación en este certamen implica la aceptación total de sus bases
- Cualquier caso no considerado en estas bases será resuelto a criterio del Fondo de Cultura Económica
- No se devolverá ningún trabajo

Ciudad de México a 27 de mayo de 2020



ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

julio-septiembre 2020 volumen 71 número 3

Mensaje del presidente de la AMC

José Luis Morán López

3

Desde el
Comité Editorial
Miguel Pérez de la Mora

4

Presentación. Instrumentación espacial en México: algunas aplicaciones

Blanca Mendoza

6

Los ojos de México en el espacio

Los satélites artificiales, solitarios viajeros

Jorge Roberto Sosa Pedroza

Fabiola Martínez Zúñiga

8

Basura en el mar, en la tierra y hasta en el espacio

María Guadalupe Cordero Tercero

18

KuautliSAT el Ulises 2.0, un nanosatélite mexicano

José Alberto Ramírez Aguilar

María Guadalupe Ortega Ontiveros

David Daniel Castelan Castillo

26

Baterías que dan vida a un nanosatélite

Aldo Eleazar Pérez Ramos

Edwin Martínez Aragón

Salvador Villarreal Reyes

32

Los satélites pequeños también van al doctor

Celso Gutiérrez Martínez

Jacobo Meza Pérez

Alfredo Torres Fórtiz

38

Los satélites te dirán qué tan saludables están las plantas

Alan A. Calderón Velderrain

Miguel A. Alonso Arévalo

Enrique A. Hernández Elías

44

El latido de la Tierra: la resonancia Schumann

Blanca Mendoza

Marni Pazos

52

Los rayos cósmicos: una extraordinaria aventura espacial

Luis Xavier González Méndez

Ernesto Ortiz Fragoso

58

Ciencia espacial y protección civil

Juan Américo González Esparza

Eduardo Pérez Tijerina

64

El programa espacial de la UNAM

José Francisco Valdés Galicia

Juan Antonio Sánchez Guzmán

72

Novedades científicas

Olga Costa y la fiesta de la diversidad frutícola de México

Juan Antonio Reyes Agüero

Claudia Heindorf

Juan Rogelio Aguirre Rivera

79

Desde el Conacyt

Ecosistema Nacional Informático Covid-19 del Conacyt

85

De actualidad

Tiempos difíciles para la estrella Betelgeuse

Alberto Carramiñana

88

Reseña

Lo imposible en matemáticas de Carlos Prieto

Gabriela Araujo Pardo

96



Portada: Shutterstock.



Separador: Enrique Martínez de la Rosa.

Este número de la revista *Ciencia*
ha sido posible gracias al patrocinio del
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONACYT

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias
julio-septiembre 2020 volumen 71 número 3

Director fundador

Ignacio Bolívar Urrutia (1850-1944)

Director

Miguel Ángel Pérez de la Mora

Comité editorial

Raúl Antonio Aguilar Roblero
Raúl Ávila
Beatriz Barba Ahuatzin
Luis Benítez Bribiesca †
Ana Cecilia Noguez G.
Raymundo Cea
Deborah Dultzin
Alfredo Fera Velasco †
Alonso Fernández Guasti
Ronald Ferrera
Gerardo Gamba Ayala
Alfonso N. García Aldrete
Adolfo Guzmán
Juan Pedro Laclette San Román
Román Piña Chan †
Carlos Prieto de Castro
Sergio Sánchez Esquivel
Alicia Ziccardi

Representante del Conacyt ante el Comité Editorial

Rubén Jiménez Ricárdez

Coordinadora editorial

Martha Lorena Soria Licona

Editora

Rosanela Álvarez

Revisor de estilo

Paula Buzo

Social Media

José Eduardo González Reyes

Diseño y formación

Quinta del Agua Ediciones, S.A. de C.V.

Ilustradores

Ana Viniegra, pp. 18-19, 33, 44-45, 52-53, 56, 73, 85
Enrique Martínez de la Rosa, pp. 9, 12, 17, 41, 43, 59, 61, 66, 67, 70, 74, 78

Preprensa e impresión

Impresos Comerciales y/o Miguel Fernández

Academia Mexicana de Ciencias, A.C.

Casa Tlalpan, km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, Av. Cipreses S/N,
Col. San Andrés Totoltepec, Del. Tlalpan, C.P. 14400, Ciudad de México
tel.: 5849 4903, fax: 5849 5108

www.revistaciencia.amc.edu.mx



@CienciaAMC



ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS
DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

ciencia, publicación trimestral, volumen 71, número 3, correspondiente al trimestre julio-septiembre de 2020, editado y distribuido por la Academia Mexicana de Ciencias, A. C. El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja de manera alguna el punto de vista de la Academia Mexicana de Ciencias. Queda prohibida la reproducción total o parcial del contenido por cualquier medio sin la autorización expresa de la Academia Mexicana de Ciencias. Certificado de Reserva de Derechos al uso exclusivo del título 04-2001-072510183000-102 expedido el 25 de julio de 2001 por el Instituto Nacional del Derecho de Autor de la Secretaría de Educación Pública. Certificado de Licitud de Título y Contenido 17371 expedido por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. ISSN 1405-6550. Editor responsable: Francisco Salvador Mora Gallegos. Formación: Quinta del Agua Ediciones, S.A. de C.V., tel.: 5575 5846. Impresión: Impresos Comerciales y/o Miguel Fernández, Yucatán 9-B, Col. Héroes de Padierna, Ciudad de México, 10700. Tel.: 5568 5065. Tiraje 5 000 ejemplares. Editor responsable: Correspondencia: Academia Mexicana de Ciencias, A. C., atención: Revista Ciencia, Casa Tlalpan, km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, Av. Cipreses S/N, Col. San Andrés Totoltepec, Del. Tlalpan, C.P. 14400, Ciudad de México, tel.: 5849 4903, fax: 5849 5108, rciencia@unam.mx, <http://www.amc.mx>.

Mensaje del presidente de la AMC



De julio de 2017 a julio de 2020, he tenido la honrosa responsabilidad de ocupar la Presidencia de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC). A lo largo de tres años, he sido testigo de la vigorosa comunidad científica, en todas las áreas del conocimiento, con que cuenta nuestro país. Estoy convencido de que la inversión en ciencia y tecnología a corto, mediano y largo plazo es y será, siempre, indispensable.

Para muestra, basta ver la situación inédita que estamos viviendo debido a la pandemia que azota a nuestro planeta. Esta crisis refuerza la importancia de la ciencia y la tecnología para enfrentar situaciones de emergencias sanitarias, así como de otros ámbitos de gran importancia. La ciencia es la alternativa más eficaz ante estas situaciones.

El presente número de la revista *Ciencia* está dedicado a la instrumentación espacial en México. Con su lectura, aprenderemos cómo funcionan los satélites espaciales y cómo han ido evolucionando sus funciones y tamaños. Conoceremos también el programa espacial de la Universidad Nacional Autónoma de México, y muchos otros temas relacionados con los usos de los satélites para estudiar la Tierra. Después de leer este ejemplar, no cabrá duda de que esta área tiene un gran potencial de desarrollo en el país.

Al concluir con mi cargo, refrendo mi compromiso con la AMC y deseo expresar mi agradecimiento a la membresía por su confianza. En especial, agradezco al Director y al Comité Editorial de la revista *Ciencia* por su trabajo académico siempre comprometido y profesional. Desde luego, agradezco también a ustedes, lectoras y lectores, quienes han hecho posible que *Ciencia* celebre este año su octogésimo aniversario.

¡Larga vida a la revista *Ciencia*!

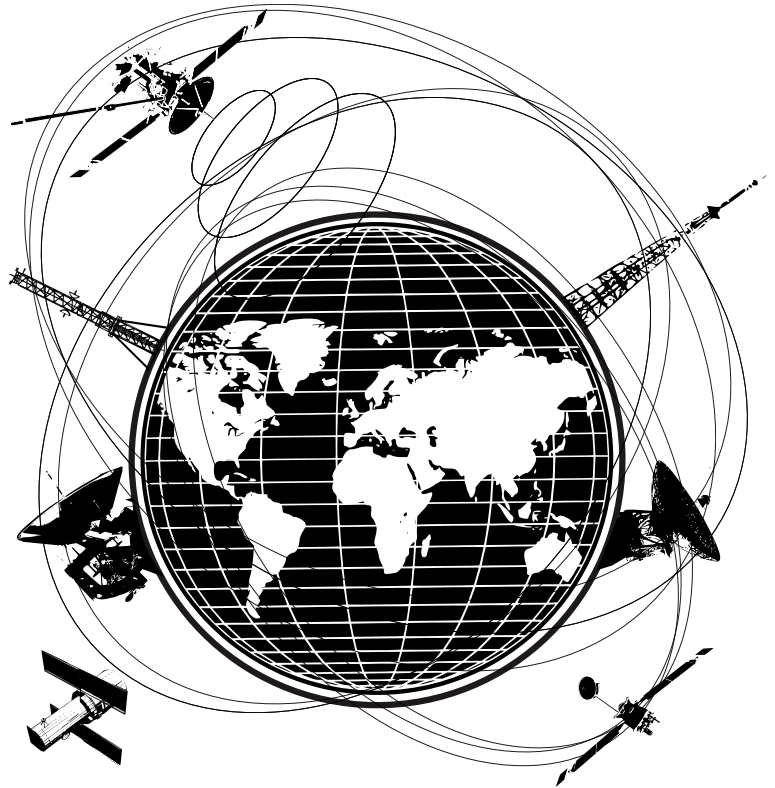
José Luis Morán López
PRESIDENTE

Desde el Comité Editorial

No me queda duda alguna —y creo que a ninguno de ustedes tampoco— de que contemplar un cielo estrellado en la más profunda oscuridad de la noche es un espectáculo sorprendente y al mismo tiempo sobrecogedor. Sorprendente, por su enormidad y majestad. Sobrecogedor, por las numerosas preguntas que despierta en nuestra intimidad: ¿quiénes somos?, y ¿cuál es nuestro papel en esta inmensidad? Son preguntas que nos acosan durante la contemplación. Similar espectáculo también nos ofrece nuestro cielo al mirar el Sol a lo largo del día, desde el amanecer hasta el ocaso.

En este contexto, qué extraordinaria ocurrencia fue la de Julio Verne, el imaginativo escritor francés, quien a través de las páginas de su libro *De la Tierra a la Luna* nos llevó confinados en un proyectil disparado por un cañón desde nuestro planeta a circundar su satélite natural y de regreso. Qué maravilloso fue también el lanzamiento y puesta en órbita del satélite ruso *Sputnik*, el 4 de octubre de 1957, que, a decir de nuestra editora huésped, Blanca Mendoza, “representó el inicio de la era espacial” y, por consiguiente, una invitación abierta a explorar el espacio sideral.

Queridos lectores, aunque esta aventura del viaje hacia el espacio se limite apenas a un puñado de personas y no vaya mucho más allá que a una distancia pequeña de los confines de la Tierra, merced a la instrumentación que pacientemente se ha desarrollado para ello, está ya ahí, a nuestra vista. Los invito cordialmente a conocer, en este número de



Ciencia, lo que se ha logrado alrededor del mundo en el terreno de la instrumentación espacial y a saber en qué medida nuestro país se apresta con entusiasmo a contribuir para incrementarla.

No dejen de descubrir qué es un satélite artificial y conocer el equipamiento que posee, el cual, aparte de proporcionar información específica sobre algún aspecto en particular de su misión, lo hace permanecer y transitar en el espacio. Entérense del tipo de baterías que se han desarrollado para permitir su funcionamiento y de cómo, especialmente, los satélites pequeños pueden “enfermar” y, a manera de pacientes, ser tratados por “médicos satelitales”, quienes desde la Tierra diagnostican sus males y afanosamente los corrigen, mediante juiciosas interacciones con su computadora de vuelo.

Estimados lectores, averigüen también cómo los satélites, aparte de su amplio uso en las telecomunicaciones, la geolocalización o el reconocimiento, emplean cámaras multispectrales instaladas a bordo para indagar, entre otras cosas, aspectos tan disímboles como la salud de las plantas, el origen y los efectos de los rayos cósmicos o de la llamada resonancia Schumann, que se refiere a oscilaciones que se presentan en la Tierra con una longitud de onda similar a la de su radio y que pudieran estar relacionadas, además de con los cambios climáticos, con la actividad sísmica de nuestro planeta, así como con nuestra salud.

Por otro lado, les resultará de considerable interés saber que México se ha enfocado a la construcción de nanosatélites (1-10 kg), como el *KuautliSAT el Ulises 2.0*, y participa en la elaboración de instrumentación espacial avanzada. Asimismo, mediante el popular Concurso de Satélites Enlatados, organizado por el Programa Espacial Universitario de la Universidad Nacional Autónoma de México, se han generado vocaciones para la construcción de este tipo de satélites. Entérense adicionalmente de qué organizaciones, tales como el Laboratorio Nacional de Clima Espacial, trabajan junto con el Centro Nacional de Prevención de Desastres, entre otras, para la detección de tormentas solares, con el objetivo de incrementar nuestro grado de respuesta al material que el Sol emite durante éstas y cuyos efectos pudieran ser devastadores en diversos aspectos de la vida nacional.

Pero si los satélites son útiles, sepan también cómo éstos se tornan en un problema cuando dejan de funcionar o se destruyen en el espacio y generan basura de diverso tipo, tamaño y composición, lo cual constituye un factor de riesgo, tanto para

quienes habitan las estaciones espaciales o viajan en transbordadores, como para los que vivimos en la Tierra, pues al caer sobre la superficie de nuestro planeta generan daños mecánicos y traumáticos potenciales, así como tóxicos, debido a las sustancias químicas que traen consigo, incluidas diversas fuentes radioactivas. Conozcan también, a este respecto, las imaginativas alternativas que se han desarrollado para su remoción.

Aparte de adentrarse en los atractivos temas que involucra nuestra “aventura espacial”, no abandonen, queridos lectores, las páginas de *Ciencia* sin antes visitar su sección de Novedades Científicas y descubran la identidad de Olga Costa, la naturaleza de sus orígenes y las posibles motivaciones que la llevaron a plasmar en su exuberante cuadro *La vendedora de frutas* (a la vista en el Museo de Arte Moderno de la Ciudad de México) a una sonriente y atractiva mujer que ofrece con desenfado una mercancía que plasma la riqueza frutícola de nuestro país. Entérese, además, por qué la estrella Betelgeuse, uno de los astros más brillantes del firmamento, ha mermado su brillo a partir de 2019. Pasen asimismo revista a la reseña que Gabriela Araujo Pardo hace del libro *Lo imposible en matemáticas* (Fondo de Cultura Económica, 2017) de Carlos Prieto de Castro, miembro distinguido de nuestro Comité Editorial, quien con su inveterada costumbre analiza con agilidad, simpleza y elegancia algunos de los problemas clásicos de las matemáticas, entre los que se encuentra la solución a la cuadratura del círculo.

Espero que disfruten este número.

MIGUEL PÉREZ DE LA MORA
Director



PRESENTACIÓN

Instrumentación espacial en México: algunas aplicaciones

La generación de instrumentación espacial en México ha tenido un desarrollo rezagado en comparación con el que se ha logrado en otros países, y sólo es hasta ahora que algunos grupos nacionales empiezan a crear o consolidar instrumentación propia.

El objetivo del presente número de la revista *Ciencia* es mostrar algunos ejemplos de las estaciones, los observatorios en superficie y la instrumentación satelital, e incluso los satélites, que se tienen o están desarrollando actualmente en varias instituciones mexicanas de investigación y educación superior. Dichos equipos sirven para diversos propósitos, ya que su desarrollo en sí presenta retos, y pueden tener aplicaciones inmediatas, o bien contribuir a responder a las preguntas de la ciencia básica, en particular en el área de las ciencias espaciales. Estas últimas estudian el Sol, el medio interplanetario, los rayos cósmicos, los entornos ionizados y magnéticos de los planetas y cuerpos menores, así como sus efectos en el ámbito terrestre.

El 4 de octubre de 1957 se lanzó el *Sputnik*, y esto representó el inicio de la era espacial. Actualmente los satélites artificiales son parte de nuestra vida diaria; para no ir más lejos, pensemos en los teléfonos celulares. En el primero de los diez artículos que incluye este número temático, encontramos un relato histórico que nos ayudará a familiarizarnos mejor con la física y las matemáticas que han posibilitado los viajes espaciales, y principalmente el desarrollo de los sistemas satelitales. No obstante, los avances logrados gracias a la tecnología satelital han tenido un costo importante: centenas de miles de objetos de más de 10 cm orbitan alrededor del planeta y son ya una amenaza en el ámbito tanto espacial como terrestre. Actualmente se están proponiendo soluciones que minimicen la producción de estos desechos, o bien se están estudiando distintos métodos para retirarlos de su órbita.

En pocos años, la tecnología ha transitado de satélites de grandes dimensiones al diseño de satélites de mucho menor tamaño, como los nanosatélites; esto ha permitido que un gran número de universidades y pequeñas organizaciones en el mundo los puedan construir. Como ejemplo, *KuautliSAT el Ulises 2.0* es un satélite que actualmente se está desarrollando en México, de manera paralela con

la formación de recursos humanos de alto nivel en este sector. Respecto a las dimensiones, también es sorprendente conocer que en el diseño de los nanosatélites se utilizan baterías que hoy se encuentran, por ejemplo, en el interior de los teléfonos celulares. Asimismo, para mantener la buena “salud” de estos pequeños vehículos espaciales, es necesario, entre otros procedimientos, contar con sistemas para medir la temperatura, presión, velocidad, aceleración, etcétera, conforme éstos orbitan alrededor de la Tierra. Las mediciones se pueden almacenar en el satélite y después transmitirse a una estación terrena, para con ello estudiar sus variaciones y conocer el desempeño de los sistemas.

Entre las aplicaciones de los satélites artificiales está la obtención de información a distancia de la Tierra. Por ejemplo, se emplean cámaras que generan imágenes según el color de la luz que reflejan o emiten los objetos en la superficie. Entre otros usos, dichas imágenes nos permiten conocer el estado de salud de las plantas en diferentes regiones del planeta. Asimismo, se cuenta con instrumentación para medir dos fenómenos cuyo estudio permitirá abordar cuestiones de ciencia básica en las ciencias espaciales. Por una parte, se han descifrado las características de las llamadas resonancias Schumann, que son oscilaciones provocadas por la actividad eléctrica atmosférica y cuyo tamaño es comparable con el perímetro terrestre.

Sus variaciones permiten estudiar el clima de la Tierra y la actividad del Sol, y

recientemente se ha sugerido que también pueden estar asociadas a los sismos y hasta afectar a la salud humana. Por otro lado, los rayos cósmicos son partículas muy energéticas que constantemente bombardean la parte superior de nuestra atmósfera. A más de cien años de su descubrimiento, su origen se sigue investigando y se realizan diferentes experimentos y estudios para dilucidar qué relación tienen con el clima y la biota.

Con el objetivo de fortalecer la red de instrumentos que monitorean y registran los efectos del clima espacial en México, en 2016 se estableció el Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE), que estudia los impactos en la operación y confiabilidad de los sistemas tecnológicos que son críticos para la sociedad: satélites, telecomunicaciones, sistemas de posicionamiento global, redes de generación y distribución de energía eléctrica, etcétera. Atender estos problemas es una cuestión de seguridad nacional.

Asimismo, en 2017 se creó el Programa Espacial Universitario (PEU) en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), cuyos antecedentes son el Programa Universitario de Investigación y Desarrollo Espacial, en 1989, en el cual se desarrollaron los primeros satélites latinoamericanos, y posteriormente la Red Universitaria del Espacio. La tarea del programa actual es fomentar la cultura y las ciencias espaciales en todas las ramas del conocimiento, con el fin de comprender el espacio a partir de una mirada desde la Tierra y, a su vez, comprender a la Tierra desde el punto de vista del espacio.

En conclusión, este número de *Ciencia* nos muestra que hay una amplia gama de aplicaciones para la instrumentación espacial en México; sin embargo, aunque el futuro es promisorio, debemos darle un impulso todavía mayor, puesto que la generación de instrumentación propia es, sin duda, un factor que promueve los avances científicos y tecnológicos en el sector, y, por lo tanto, el desarrollo económico y la soberanía nacional.



Jorge Roberto Sosa Pedroza y Fabiola Martínez Zúñiga



Los satélites artificiales, solitarios viajeros

Poco sabemos de los satélites artificiales, aunque los usamos a diario. Por siglos se ha forjado la ciencia en que se basan: la mecánica del movimiento planetario, el electromagnetismo, la teoría de la relatividad, la ingeniería electrónica o la mecánica de materiales, todas apoyadas en 4 000 años de matemáticas. Después de una breve historia de la mecánica orbital, describimos los sistemas de un satélite artificial y lo hecho por México en la materia.

Breve historia

Un satélite es un objeto natural o artificial que gira alrededor de un cuerpo principal. Aunque en la actualidad pensamos de inmediato en los satélites artificiales, el concepto es más general: la Luna es un satélite de la Tierra, así como la Tierra y los demás planetas del Sistema Solar son satélites del Sol, y también el Sol es un satélite del centro de nuestra galaxia, que a su vez se mueve en el universo.

Se requirieron siglos para entender los principios que explican cómo se mantienen los planetas girando alrededor del Sol, pero su definición precisa se debe sobre todo a tres personajes: Tycho Brahe, Johannes Kepler e Isaac Newton. El astrónomo danés Tycho Brahe dedicó 25 años a registrar, noche tras noche, el movimiento de los planetas que hasta entonces se conocían; en 1599 se asoció con el matemático alemán Johannes Kepler y, antes de morir en 1601, le cedió los resultados de sus observaciones (Gribin, 2002).

A partir de esas mediciones, en tan sólo dos años Kepler descubrió el movimiento de los planetas, lo cual iba en contra de los dogmas religiosos de la época, incluso cuando él y Brahe eran firmes creyentes de la iglesia luterana y católica, respectivamente. Kepler hizo público su descubrimiento y definió las tres leyes que llevan su nombre. Como Marte fue el planeta más observado por Brahe, Kepler





tuvo así la clave para describir su trayectoria elíptica y, por lo tanto, concluir que los tiempos de movimiento sobre ella no eran constantes. Reportó sus resultados en 1609 en *Astronomia Nova*; a partir de ellos calculó el tiempo en que cada planeta completa una órbita, lo que publicó en 1618 en *Harmonice Mundi* (Battaner, 2018). El trabajo de Kepler se resume en tres postulados:

- 1.^a ley de Kepler: “Los planetas se mueven sobre un plano y describen órbitas elípticas, en las que el Sol se localiza en uno de los focos de la elipse”.
- 2.^a ley de Kepler: “El vector que define la posición de cualquier planeta respecto del Sol barre áreas iguales en tiempos iguales sobre la elipse” ($A_1 = A_2$, véase la Figura 1).
- 3.^a ley de Kepler: “El cuadrado del periodo de revolución es proporcional al cubo del semi-eje mayor de la elipse” ($P^2 = kr^3$, donde k es una constante).

Las leyes de Kepler terminaron con el mito de la Tierra como centro del universo (Maral, 2008) y, a su vez, estremecieron al mundo científico de la época. Más adelante, la demostración matemática de dichas leyes correspondió a un taciturno, aislado y malhumorado joven inglés: Isaac Newton.

Newton, las leyes de Kepler y el equilibrio de fuerzas

A Newton se le atribuye la frase: “Podemos ver más lejos, porque estamos parados en los hombros de gigantes” (Hawking, 2002), pues un nuevo descubri-

miento siempre parte de conocimientos previos. Al analizar las leyes de Kepler, Newton intuyó que la fuerza que provoca la caída de los objetos hacia la Tierra (ley de gravitación universal) también produce el movimiento de los planetas alrededor del Sol; para él, ambas fuerzas están en equilibrio. La ley de gravitación universal establece que la fuerza de atracción entre dos cuerpos es proporcional al producto de sus masas dividido por el cuadrado de la distancia r entre sus centros. Por su parte, la segunda ley de Newton indica que la fuerza del movimiento de un cuerpo es proporcional a su masa y al cambio de su velocidad con el tiempo. Con estas ideas, Newton comprobó las leyes de Kepler, por lo que se convirtió en el físico más importante de su época.

Los satélites artificiales

Los satélites cumplen con las leyes de Kepler. Después de confirmarlo, Newton imaginó la posibilidad de lanzar un objeto al espacio que se convirtiera en un satélite artificial, pero se ha de haber desilusionado porque la velocidad necesaria para escapar de la gravedad es de 42 000 km/h. Tuvieron que pasar 300 años para hacer realidad esta idea: el 7 de octubre de 1957 Rusia puso en órbita el *Sputnik 1*, que circunvoló la Tierra a una altura de 300 km emitiendo un “bip-bip” en 31.5 MHz, con lo que probó su presencia. Este acontecimiento dio inicio a la exploración del espacio.

Actualmente, gran parte de nuestra vida cotidiana la debemos a los satélites artificiales: recibimos señales de televisión y radio, así como imágenes en tiempo real de fenómenos naturales sobre un territorio; utilizamos sistemas de posicionamiento global (GPS) y podemos estudiar los tipos de cosechas, o bien la fauna marina y terrestre; contamos con comunicaciones que nos unen con todo el mundo e incluso con los astronautas que están flotando en la Estación Espacial Internacional o alrededor de ella.

Para poner en órbita un satélite se requiere llegar a la velocidad necesaria para contrarrestar la atracción de la Tierra. En la Tabla 1 se muestran algunas de esas velocidades, en función del **tiempo de giro**

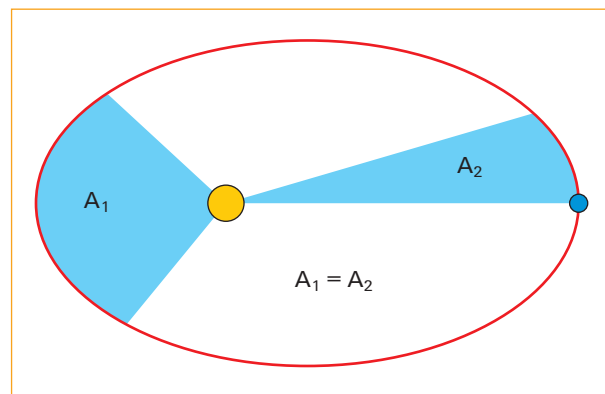


Figura 1. Leyes de Kepler (1.^a y 2.^a).

Tiempo de giro

Tiempo en que un satélite completa una órbita.

Tabla 1. Relación de velocidad vs. altura.

Altura (km)	Velocidad (km/s)	Periodo	
		Horas	Minutos
6,878	7.613	1	35
7,178	7.452	1	41
7,778	7.159	1	54
11,378	5.919	3	21
16,778	4.874	6	00
21,378	4.318	8	38
42,164	3.075	23	56

y la altura (a) en kilómetros desde el centro de la Tierra (considerando que el radio de nuestro planeta es de 6 378 km). De 1957 a la fecha se han lanzado alrededor de 9 000 satélites, en diferentes órbitas y de todos los tipos y tamaños. La Tabla 2 muestra una clasificación en función de sus dimensiones y peso; la Tabla 3, respecto de las órbitas.

Los satélites grandes tienen una **órbita geoestacionaria**, por lo que aparentemente están fijos en el

Tabla 2. Clasificación de satélites según su tamaño y su peso.

Tipo	Tamaño (m ³)	Peso (kg)
Satélite grande	7	> 1,000
Satélite mediano	5	100-1,000
Satélite pequeño	2	50-100
Microsatélite	0.5	10-50
Nanosatélite	0.3	1-10
Picosatélite (CubeSat)	0.1	< 1

Tabla 3. Clasificación de satélites según su órbita.

Tipos de órbita	Altura sobre el nivel del mar (km)	Velocidad del satélite (km/h)	Función del satélite
Baja	250-1,500	25,000-28,000	Comunicaciones, observación de la Tierra, investigación científica.
Media	1,500-8,000	25,000-15,000	Telefonía, GPS.
Eje polar	500-800	26,600-27,300	Clima, navegación.
Geosíncrona	35,786 (en el Ecuador)	11,000	Comunicaciones, militares.
Elíptica	Perigeo ~ 500 Apogeo ~ 39,000	~ 34,200 ~ 5,400	Comunicaciones.

espacio. Esta órbita es la más utilizada y la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) la controla para que se use adecuadamente. Asimismo, los picosatélites o CubeSat tienen un gran auge, ya que son muy pequeños, pesan poco y se ponen fácilmente en una órbita baja; éstos se lanzan desde la Estación Espacial Internacional (350 km de altura), a donde son llevados por cualquier nave de suministros. La Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio de Estados Unidos de América (NASA, 2020) plantea usarlos para misiones de telecomunicaciones, prospección terrestre y exploración de la Luna y de Marte.

■ Estructura de un satélite artificial

■ Un satélite se divide en dos partes principales: carga útil y plataforma (véase la Figura 2). De acuerdo con su misión, se define la carga útil (comunicaciones, meteorología, investigación) y se incluyen los subsistemas necesarios: antenas, sistema de comunicaciones, transmisores, receptores, procesadores de señal, computadoras o telescopios, como el *Hubble*. Pero además, el satélite en sí mismo necesita sistemas de “supervivencia”: la plataforma incluye todos los sistemas que soportan el satélite, los cuales describimos a continuación.

Además, en tierra existe un centro de control que hace que la carga útil y la plataforma funcionen de acuerdo con las necesidades de operación. Asimismo, la carga útil usa estaciones terrenas independientes. Algunos subsistemas son indispensables, aunque su peso y tamaño dificultan su inclusión; en

◀ Órbita geoestacionaria

Los satélites que completan su órbita en sincronía con la rotación de la Tierra.

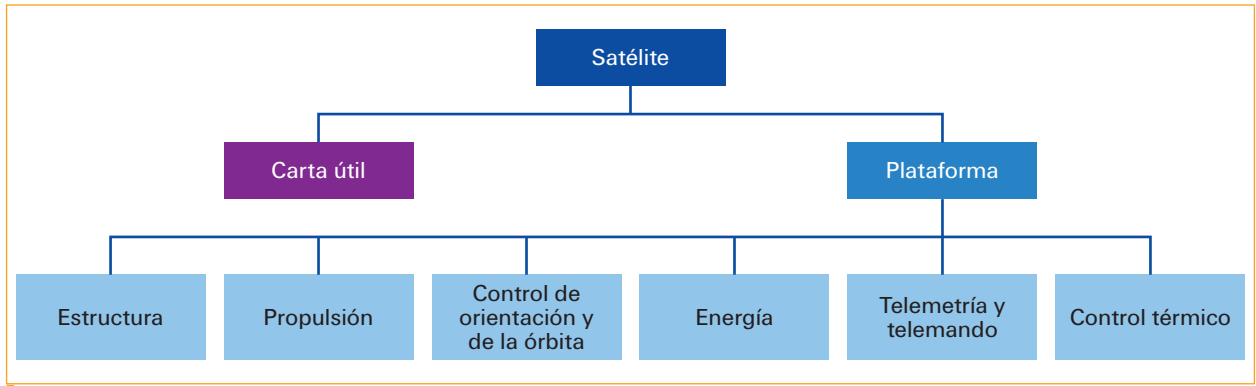


Figura 2. Estructura general de un satélite.

los satélites grandes se usan todos ellos, pero en los pequeños se prescinde de algunos y se limitan otros.

Apogeo ▶ Estructura

Distancia mayor entre el satélite y el foco en la órbita elíptica.

Esta parte de la plataforma es el soporte de todos los equipos. Tiene poco peso y suficiente resistencia para aguantar las fuerzas y vibraciones del lanzamiento; también es resistente al deterioro y no se ve afectada por las diferencias térmicas en el espacio. La construcción de la estructura ha llevado al desarrollo de materiales como el Kevlar, una poliamida usada en tierra para otras aplicaciones, así como el “panal de abeja” de aluminio ahuecado, muy ligero y resistente, el cual se usa para los satélites pequeños.

Propulsión

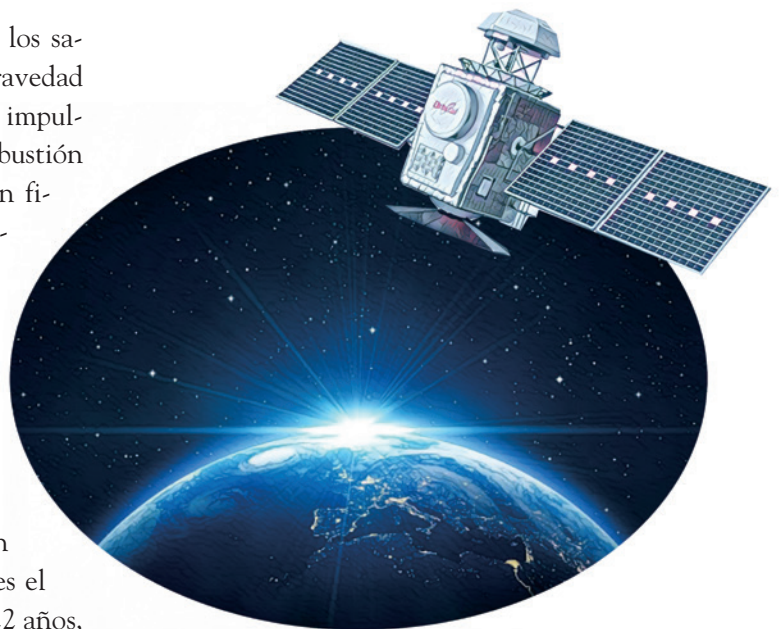
Aunque se están investigando alternativas, los satélites usan combustible líquido. Como la gravedad es cero en el espacio, el combustible debe ser impulsado por helio dentro de la cámara de combustión del motor que lleva al satélite a su posición final. Con el combustible también se alimentan pequeños cohetes de posicionamiento distribuidos en las caras de la estructura. Por otra parte, los satélites pequeños de órbita baja se mueven inercialmente y no requieren combustible.

La vida útil de un satélite grande se define por su uso de combustible, algo que los ingenieros del Centro de Control Satelital en México hacen con eficiencia. Un ejemplo es el satélite *Morelos II*, que tuvo una vida útil de 22 años,

aunque el pronóstico antes de su lanzamiento era de nueve. El éxito de este satélite se debió al ahorro de combustible, pues se prolongó la traslación de la órbita baja a la de **apogeo**, que se usó después durante la operación.

Control de orientación y de órbita

Para hacer que el satélite “vea” hacia la Tierra o a la dirección deseada de acuerdo con la misión (aunque la referencia siempre será la Tierra), la orientación se consigue con diferentes métodos, según las características del satélite. Por ejemplo, un satélite grande tiene sensores que “ven” el perfil de la Tierra o la posición del Sol, y con ello es posible locali-



zarlo y reorientarlo desde el centro de control terrestre en caso de haber desviaciones. La desviación en un satélite geoestacionario no debe superar 0.1° : un movimiento de 70 km en cualquier dirección a 36 000 km de altura.

No obstante, considerando que el Sol y la Tierra no tienen un movimiento regular, se usa otra referencia: una estrella en la constelación de Aries que por su lejanía puede considerarse “fija”. De esta manera se define uno de los ejes coordenados de la posición de la Tierra y el satélite en el espacio; las otras coordenadas son la línea norte-sur y el eje en el plano ecuatorial a 90° del de Aries.

El sistema de posicionamiento y orientación usa ruedas inerciales, las cuales se basan en el principio de las bicicletas; cuando giran, generan una fuerza perpendicular a la dirección de giro, por lo que la mantienen vertical. El satélite es como un cubo con una rueda inercial en cada eje, todas movidas eléctricamente; en un inicio eran de cuerpo cilíndrico (como en los satélites *Morelos I* y *II*), y giraban sobre su eje para estabilizarse.

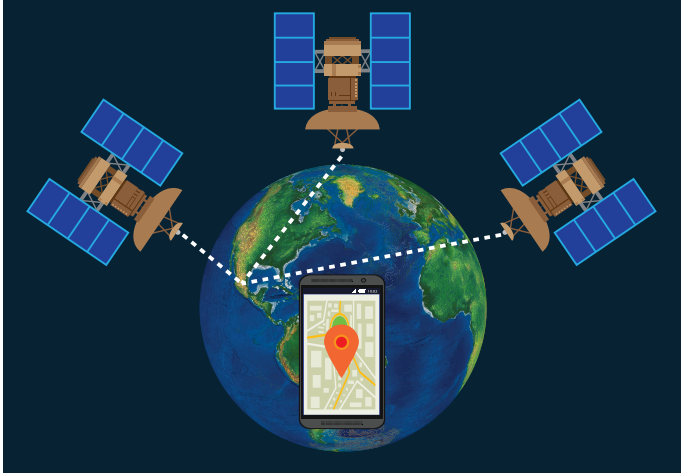
Sistema de energía

La fuente disponible para todos los satélites es el Sol, cuya energía se convierte en electricidad mediante celdas solares. En la Tierra cada vez se vuelve más común el uso de la energía solar gracias al desarrollo espacial, pero la diferencia es que en órbita las celdas deben protegerse de las partículas de alta energía del Sol, por lo que están recubiertas de diamante industrial, cuya dureza evita que se dañen. Debido a que el método es caro, solamente se usan en satélites grandes, cuya esperanza de vida es de al menos 15 años. Los satélites pequeños usan celdas “pelonas” porque su tiempo de vida es de un año, por la declinación de la órbita que los lleva a quemarse en la atmósfera.

El sistema de energía cuenta con baterías para almacenarla, y así sólo se usa cuando el satélite no es iluminado por el Sol. También se emplean convertidores de la corriente directa (de las celdas) en corriente alterna, necesaria para alimentar los diferentes niveles de voltaje del satélite, que van desde algunos volts hasta los 24 000 V de los amplificado-

Recuadro 1.
Sincronización del tiempo

El tiempo también se controla gracias a sistemas de alta precisión, como el GPS de órbita media con velocidad de 20 000 km/h, que usa un reloj atómico para sincronizar el satélite con el equipo terrestre.



res de potencia. También gracias a la investigación espacial, contamos con avances como las baterías satelitales de litio, que hoy se usan en los teléfonos celulares.

Telemetría y telecomando

Es importante estar midiendo la “salud” del satélite e informar al centro de control terrestre; pero ello es tan complicado según lo permita el costo, peso y energía. Cada subsistema usa diferentes tipos de sensores que envían los datos a la Tierra para su análisis. Un satélite grande tiene más de 500 puntos de telemetría: temperatura, energía eléctrica, orientación, comunicaciones, etcétera. La telemetría permite hacer modificaciones desde Tierra mediante el telecomando; por ejemplo, si una batería o un tanque de helio fallan, se cambian por respaldos, o bien si un amplificador reduce su ganancia, ésta puede aumentarse desde la Tierra.

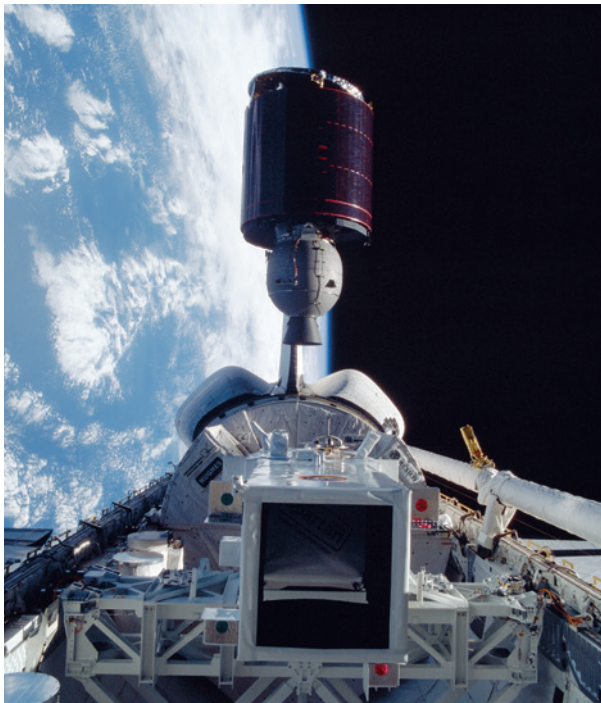
Asimismo, la telemetría sirve para analizar la orientación del satélite, que —como mencionamos—



Cartel del proyecto del sistema de satélites *Morelos*.

Huella de cobertura

Área de radiación electromagnética que un satélite cubre sobre la Tierra.



Despliegue del *Morelos I*, misión 51G. Foto: Nasa.

se controla con las ruedas inerciales, pero también para llevar al satélite a su posición final. Según el caso, un satélite pequeño usa menos puntos de telemetría y el control es limitado, al igual que su telemando.

Control térmico

Este elemento del satélite permite mantener la temperatura dentro de límites aceptables. Como en el espacio no hay atmósfera, la cara del satélite que ve hacia el Sol está a una temperatura de 150°C , mientras que la cara opuesta está a -50°C , pero dentro del satélite la temperatura se mantiene a 5°C mediante el uso de mantas reflectoras que lo cubren. Además, la temperatura se controla con calentadores y refrigerantes, similares a los usados domésticamente. Por su tamaño, los satélites pequeños no tienen este subsistema, y también porque su velocidad es tan alta que los tiempos en una u otra condición son cortos.

Computadora de vuelo

Esta parte tiene un lugar especial en la estructura satelital. Al igual que los aviones, los satélites no son simplemente cosas que vuelan; todos los subsistemas con que cuentan están controlados por la computadora de vuelo, que ordena la información de cada punto de telemetría, ordena cada paso de relocalización en el espacio tras recibir las instrucciones de la estación terrena y controla la cantidad de energía que debe alimentar a las baterías para no sobrecargarlas o descargarlas demasiado, y así prolongar su vida útil.

Por ejemplo, el satélite *Morelos III* tiene una **huella de cobertura** formada por más de 40 áreas circulares para cubrir el territorio nacional, lo que hace más eficientes las comunicaciones; si se desea enlazar a Tijuana con Mérida, la computadora “lee” los datos enviados desde la Tierra y selecciona el área de cobertura que incluye la ciudad yucateca. Así, las dimensiones eléctricas de la computadora dependen de la cantidad de datos que debe manejar; si la información no es demasiada, se puede controlar tanto la carga útil como la plataforma, pero en el caso contrario se usa una computadora para cada parte.

Como el “cerebro” del satélite, la computadora requiere de cuidados y tiene siempre un respaldo; si ésta falla, se sustituye por otra. En 1999 la computadora de vuelo del satélite *Solidaridad I* presentó una falla de un pequeño dispositivo de 2 mm de longitud que enlazaba dos elementos. El daño se debió a la presión cero del espacio. Aunque el Centro de Control Satelital cambió la computadora por el respaldo, la segunda sufrió el mismo desperfecto y el satélite sin cerebro se perdió. En cambio, la computadora del *Solidaridad II* operó adecuadamente durante 18 años. Por su parte, el *Morelos II* volvió a operar hasta 2012, para sustituir al *Solidaridad I*.

Electrónica

Todo de lo que actualmente gozamos en la Tierra gracias a los satélites se debe también a la investigación en torno a los dispositivos electrónicos. La computadora de vuelo de un satélite pequeño llega a ocupar un área de 2 cm² y tiene un espesor aproximado de 1 cm, por lo que se ha avanzado en la miniaturización de los procesadores y amplificadores. Otro ejemplo son las antenas; la Figura 3 es un dibujo del *Morelos III* con el impresionante reflector parabólico de 24 m². Por otra parte, la Figura 4 muestra una antena inventada por los autores de este artículo para un CubeSat de tres secciones; en la foto también se ve la cámara fotográfica para prospección terrestre como carga útil.

México en el desarrollo espacial

Como en todas las ramas de la ciencia y la tecnología, los entusiastas mexicanos siempre están presentes. En la década de 1960 —sólo tres años después del *Sputnik*— un grupo de investigadores potosinos construyó cohetes exitosos con combustible sólido, pero no fue posible mantener los gastos. En esa época se creó la Comisión Nacional del Espacio Exterior (CNEE) para apoyar a investigadores como ellos. El esfuerzo tuvo éxito y se formaron equipos que diseñaron y supervisaron la construcción de los satélites *Morelos* a finales de los años 70; de ese proyecto nació la idea de tener un astronauta mexicano, honor que correspondió a Rodolfo

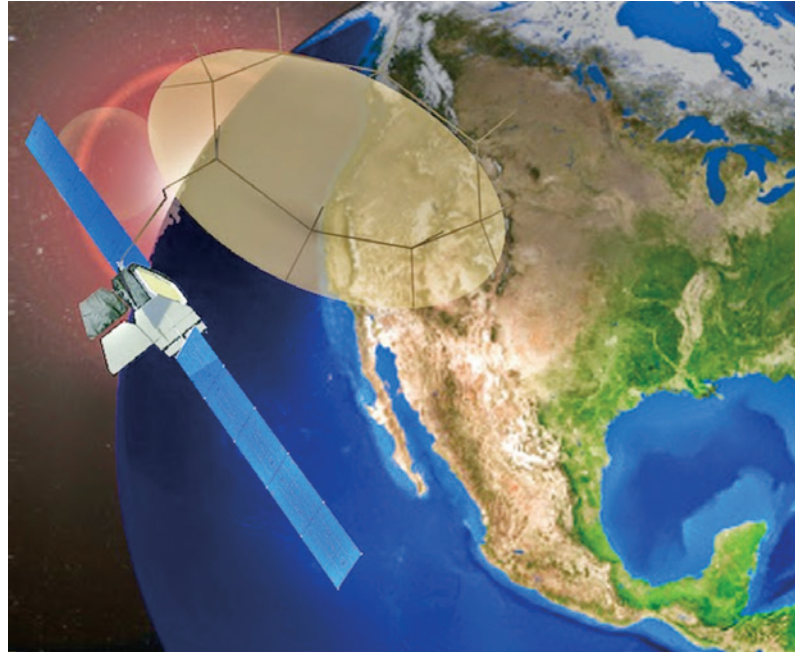
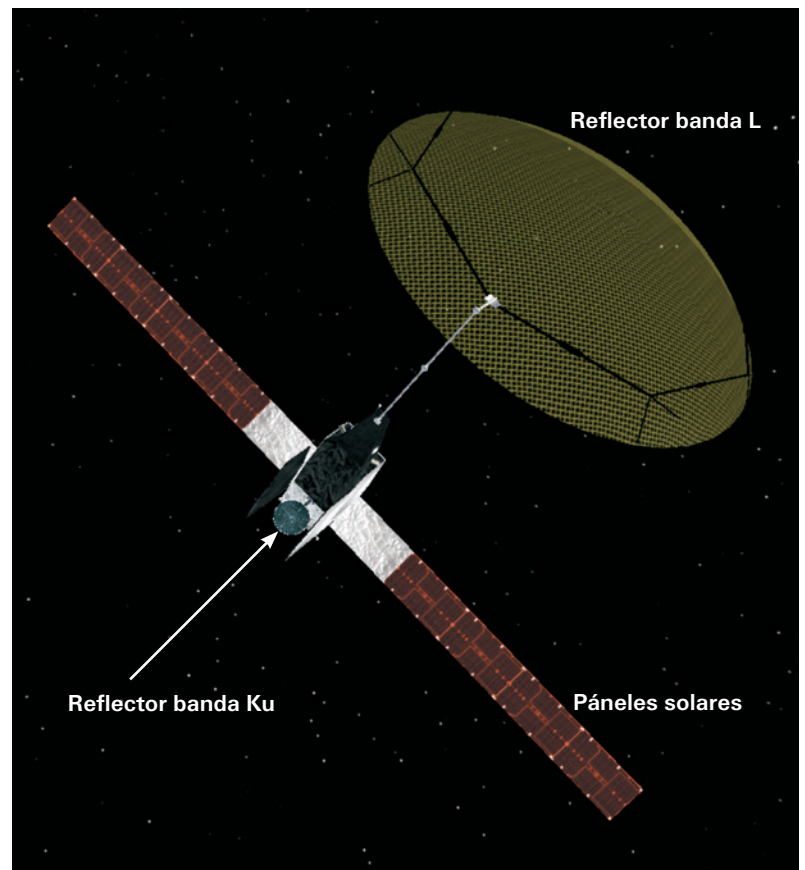


Figura 3. Dibujo del *Morelos III*.



Morelos III. Tomado de: <http://haciaespacio.aem.gob.mx/revistadigital/MorelosIII/#>



Figura 4. Antena de un CubeSat.

Neri. Se creó entonces una masa crítica de investigadores de la ciencia espacial, que se incrementó con nuevos ingenieros y científicos formados por los anteriores.

Después de los *Morelos I* y *II*, en 1990 el Instituto Mexicano de Comunicaciones (IMC) convocó a 250 ingenieros para diseñar los *Solidaridad*, coordinados por el director Eugenio Méndez Docurro, con el apoyo de Enrique Melrose y Sergio Viñals, entre otros. Agrupar a tantos ingenieros de todo el país fue un éxito, tanto por la caracterización de los satélites como porque ellos han mantenido y ampliado la investigación en el tema a pesar de la falta de apoyo de las autoridades mexicanas, quienes cerraron la CNEE en los años 70 y el IMC en la década de los 90. Pero la semilla se sembró, y la investigación actual se desarrolla en las universidades por aquéllos y los actuales investigadores. Incluso, se creó la Red de Ciencia y Tecnología Espacial, apoyada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, aunque se le retiró el apoyo en 2020.

A pesar de las limitaciones y, sobre todo, falta de recursos, se sigue avanzando en las diferentes áreas, como el diseño de estructuras, la electrónica, los sistemas de estabilización, el cómputo, las celdas solares, las antenas, etcétera (véase la Figura 4). Es importante señalar que a partir de 2009 los autores fuimos convocados al proyecto para la creación de la Agencia Espacial Mexicana (AEM), que finalmente se consolidó y en la cual participamos en mayor o menor grado.

Después del grupo de San Luis Potosí, se deben destacar algunos esfuerzos individuales, como el de Ramiro Iglesias, quien estando en la NASA en 1968 fue el primer médico que analizó un electrocardiograma de un astronauta que circunvolaba la Luna. Más adelante, en 1996, el IMC y la NASA acordaron que México participara en los proyectos del satélite ACTS. La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) comenzó a trabajar en telemedicina, mientras que el Instituto Politécnico Nacional (IPN), junto con nueve universidades de Canadá y Estados Unidos de América, instaló una estación terrena en Villahermosa para analizar los efectos de atenuación por lluvia en banda Ka, que ahora se usa regularmente en los satélites de comunicaciones.

En 1994 el grupo que participó en el diseño de los satélites *Solidaridad* comenzó a diseñar y construir un microsatélite de 50 cm por lado (*SATEX*), con carga útil de un transceptor en banda Ka y una cámara de prospección terrena. El satélite resumía los conocimientos de 50 ingenieros: en antenas, celdas solares, estructura, electrónica, cómputo, estabilidad, control de temperatura, entre otras. El *SATEX* estuvo listo para las pruebas de vibración y resistencia mecánica previas al lanzamiento, pero la devaluación de 1996 cortó de tajo el proyecto y el satélite se quedó en tierra. Tras este ejemplo, las universidades crearon centros de investigación, lo cual dio frutos como el *UNAMSAT 1*, puesto en órbita y operado con éxito durante seis meses.

De entonces a la fecha los esfuerzos se han centrado en los nanosatélites, pero lo mejor es que en dichos proyectos es común la participación interinstitucional. Con el apoyo de la AEM y la Secretaría de

la Defensa Nacional se construyeron dos nanosatélites en los que participaron investigadores del IPN, la UNAM y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Uno de estos satélites se puso en órbita en 2018 y se espera que en breve se haga lo mismo con el segundo. Asimismo, el esfuerzo más reciente es AZTEKSAT de la Universidad de Puebla, que es parte de una constelación de un consorcio internacional.

Además de los esfuerzos para la construcción de satélites –que se mantiene como meta–, el IPN ha apoyado al gobierno en proyectos asociados, como la defensa del *Morelos III* ante un consorcio inglés que pidió a la UIT que el satélite no operara, pues argumentaban problemas de interferencia, lo cual fue desmentido por medio de experimentos de laboratorio e *in situ* que la empresa inglesa no pudo rebatir. Asimismo, actualmente se cuenta con apoyo para el proyecto de *Internet para Todos* mediante el uso del *Morelos III*, con el objetivo de conectar a las zonas aisladas con las urbes nacionales e internacionales.

■ Conclusión

■ La industria de los satélites compite en el mundo mediante el desarrollo de tecnología, pero México compra esa tecnología en lugar de crearla, aun cuando tiene el potencial humano para competir, con el apoyo de la industria y el gobierno. Por ejemplo, de continuar la CNEE o el IMC para el apoyo de la cien-

cia y la ingeniería, podríamos construir al menos partes de satélites, en lugar de inhibir la creatividad mexicana mediante el pago de proyectos “llave en mano”, que a la larga son mucho más caros.

Jorge Roberto Sosa Pedroza

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional.

jsosa@ipn.mx

Fabiola Martínez Zúñiga

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional.

fmartinezzu@ipn.mx

Referencias específicas

Battaner López, E. (2018), *Kepler*, México, RBA Editores.

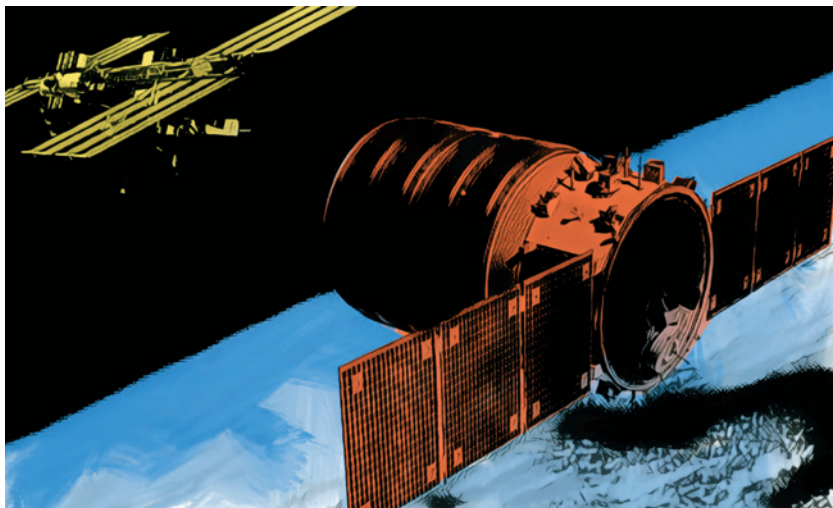
Gribin, J. (2002), *Historia de la ciencia (1543-2001)*, España, Crítica.

Hawking, S. (2002), *On the Shoulders of Giants*, Inglaterra, Running Press.

Maral, J. (2008), *Satellite Communications*, Estados Unidos de América, Prentice Hall.

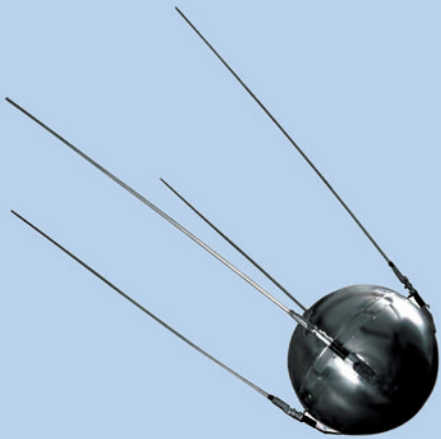
NASA en Español (2020), “Reportajes especiales”, *NASA en Español*. Disponible en: <www.lanasa/noticias/reportajes-especiales>, consultado el 29 de abril de 2020.

Sosa Pedroza, J. (2020), *Satélites* [apuntes de clase], México, IPN.



María Guadalupe Cordero Tercero

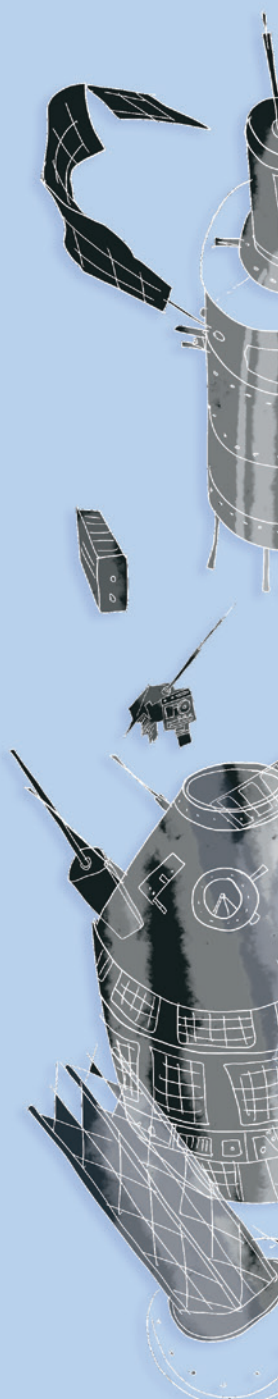
Basura en el mar, en la tierra y hasta en el espacio



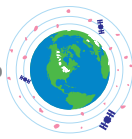
El 4 de octubre de 1957, los habitantes de la Tierra se estremecieron con los primeros pulsos emitidos por el satélite *Sputnik 1*. Esa fecha marcó el inicio de una nueva era de exploración. Sin embargo, existen efectos secundarios: centenas de miles de objetos orbitando alrededor del planeta que se han convertido en una amenaza tanto en el ámbito espacial como en el terrestre.

El cielo se está cayendo. ¡Golpe avisa!

El 10 de febrero de 2010, en las cercanías de la frontera entre los estados de Puebla e Hidalgo, cayó un objeto que provocó alarma entre la población, debido a que se escuchó una fuerte explosión en la atmósfera y se sintieron vibraciones en el suelo, similares a un sismo de pequeña magnitud. Entre las especulaciones que se hicieron en ese momento estaba la de que había caído basura espacial. Investigando este evento, nos dimos a la tarea de buscar indicios al respecto. Tras consultar páginas de internet dedicadas a rastrear este tipo de objetos (como *Celestrak*, *Space Track* y *The Orbital Debris Quarterly News*), encontramos reportes de varias caídas de fragmentos alrededor de esa fecha: el 6 de febrero cayó el fragmento 33 755 del *Cosmos 2421*; y el 12 de febrero, el 33 006 del mismo satélite. En esta última fecha también se reportó la caída del fragmento 30 808 del satélite chino *Fengyun 1C*, así como el fragmento 29 455 del *SL-12*. El 10 de febrero igualmente se reportó la caída del fragmento 34 251 del tanque *Breeze-M* en una ubicación desconocida (Cordero y cols., 2011). Esta información, además de ayudarnos a descartar que el fenómeno observado en México el 10 de febrero se debió a la entrada de basura espacial (muy probablemente, lo que cayó fue un objeto de naturaleza asteroidal de unos cuantos metros), también es un claro ejemplo de que, alrededor de una fecha al azar, ocurre la caída de múltiples objetos de manufactura humana desde el espacio; en este caso, cinco eventos en menos de ocho días.







En julio de 2000, el médico veterinario zootecnista Javier Patiño Arellano donó al Centro de Ciencias de Sinaloa una pieza de un probable satélite ruso; la identificación fue realizada por César Augusto Rosales Peraza tras ver los caracteres en ese

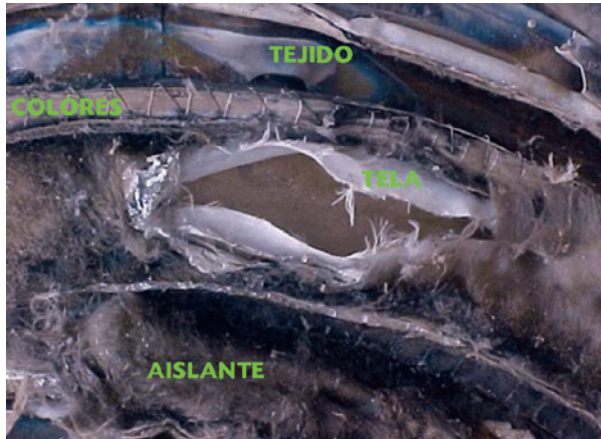


Figura 1. Fotografías de una pieza de chatarra espacial hallada en Cosalá, Sinaloa, por el médico veterinario zootecnista Javier Patiño Arellano, quien aparece en la imagen inferior. Crédito: César Augusto Rosales Peraza.

idioma. Javier Patiño narra que dicho artefacto cayó entre 1994 y 1995 sobre un árbol en la población de Cuesta Blanca en Cosalá, Sinaloa, durante una noche lluviosa con truenos y relámpagos. Él menciona que una de las tres familias que viven en el lugar relató haber escuchado un estruendo muy fuerte; los niños quisieron ir a ver, pero la mamá no los dejó sino hasta el día siguiente, cuando encontraron “la chatarra” –como ellos la llamaron– sobre un árbol. La bajaron y la pusieron en un corral abandonado, donde estuvo por seis meses, hasta que el médico Patiño la vio y solicitó que se la cedieran. Él la trasladó a Culiacán en 1998 (véase la Figura 1). Ésta es una prueba de que la basura espacial puede caer en cualquier parte; además, nos hace pensar que la caída de un artefacto de ese tamaño podría dañar seriamente a una persona.

El espacio se empieza a poblar

En el principio estaba el espacio cercano a la Tierra, y en él sólo estaban la atmósfera y la magnetósfera; a éstas únicamente las perturbaban el viento solar, los rayos cósmicos y el campo magnético del Sol. De repente, el 4 de octubre de 1957, una esfera de aluminio de 58 cm de diámetro invadió ese espacio; dicho objeto se movía a lo largo de una órbita elíptica con perigeo a 230 km de altura y apogeo a 940 km. Este invasor era el primer satélite artificial terrestre, el *Sputnik 1* (véase la Figura 2), pensado

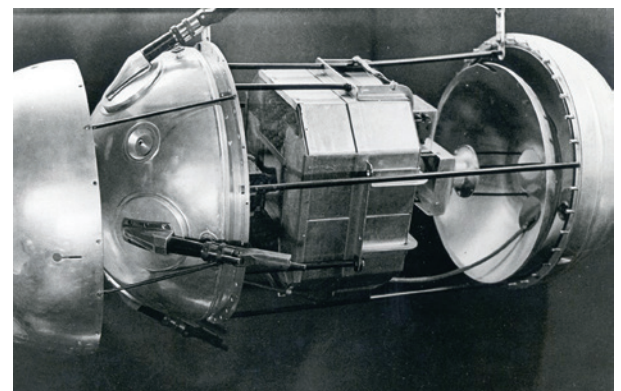


Figura 2. Interior del *Sputnik 1*, el primer satélite artificial de la Tierra. Crédito: FINE ART IMAGES/HERITAGE IMAGES/GETTY <<https://cosmosmagazine.com/space/how-sputnik-1-launched-the-space-age>>.

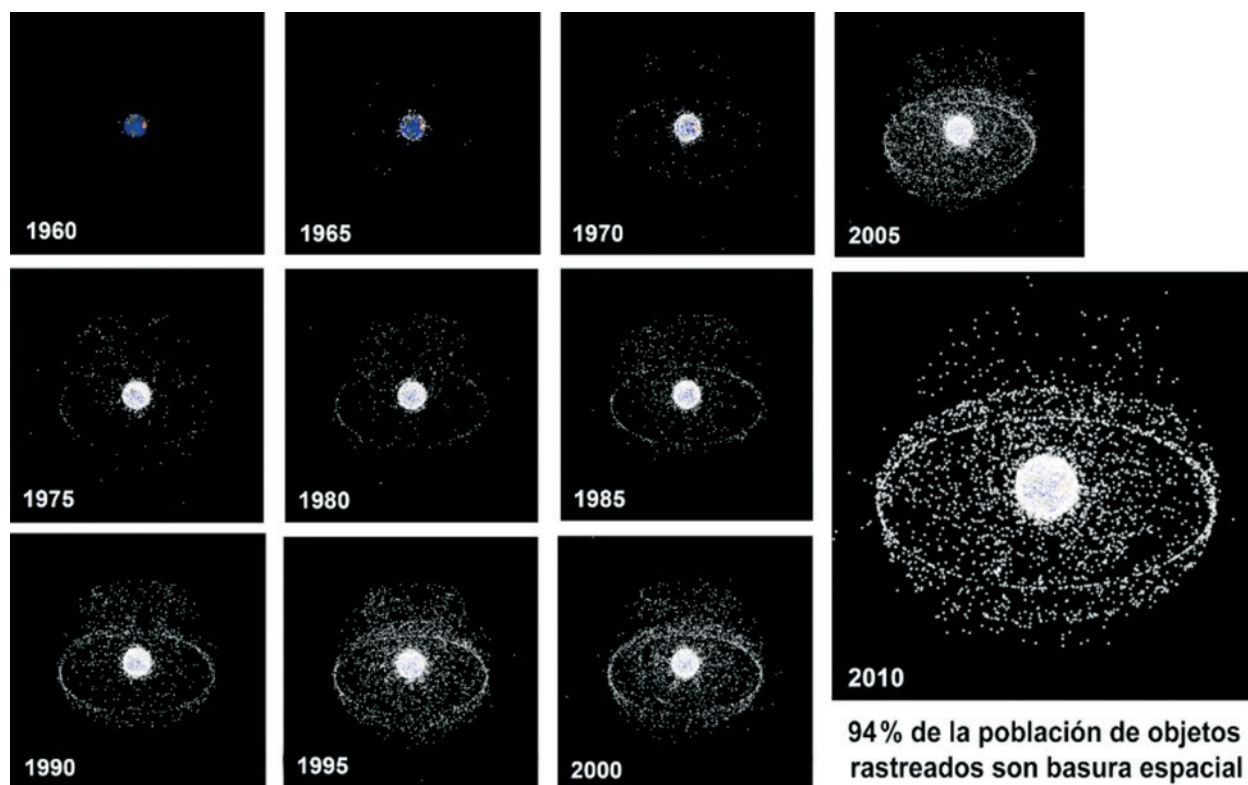


Figura 3. Aumento de la población de satélites artificiales que rodean la Tierra. Crédito: Stansbery, G., "NASA's Orbital Debris Program Office".

para apoyar las observaciones que se llevaron a cabo durante el Año Geofísico Internacional (1957); una de sus metas fue detectar la entrada de meteoroides a la atmósfera terrestre. El *Sputnik 1* cayó a la superficie terrestre el 4 de enero de 1958, por lo que el espacio de nuevo quedó "limpio". Sin embargo, a partir de dicho acontecimiento, tanto la Unión Soviética como los Estados Unidos de América iniciaron una carrera por conquistar el espacio exterior. En 1958 se creó la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA). La Figura 3 muestra el aumento de los satélites artificiales puestos en órbita de 1960 a 2010.

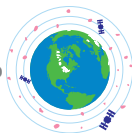
En junio de 1961, el satélite estadounidense *Transit-4A* fue el objeto número 116 lanzado a orbitar la Tierra. Su objetivo: ser parte de una red de satélites de navegación.¹ Sin embargo, la explosión del último propulsor del cohete *Thor-Ablestar*, de donde fue lanzado, lo hizo reventar en 298 frag-

mentos rastreables; 40 años después, 200 de estos objetos continuaban en órbita. Éste fue el primer caso en el cual un satélite se fragmentó en órbita (Klinkrad, 2006).

Los fragmentos mencionados en el párrafo anterior tienen un nombre. En 2002, el Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC) definió a la basura espacial o basura orbital como "todos los objetos hechos por el ser humano, o sus fragmentos, en órbita terrestre o en reentrada a la atmósfera, que no son funcionales" (Klinkrad, 2006). La mayor parte de la basura espacial se ha generado por:

- a. Explosiones tanto de las naves espaciales como de los propulsores. Éstas se deben a la fuga o el mezclado de los combustibles en los tanques o en los conductos cuando el medio espacial afecta partes internas y externas de las naves y sus propulsores.
- b. Lanzamientos de misiles en pruebas antisatélites con la intención explícita de destruirlos.

¹ Véase <https://space.skyrocket.de/doc_sdat/transit-4.htm>.



- c. Colisiones accidentales entre astronaves, entre astronaves y fragmentos, o bien entre fragmentos.
- d. Liberación de polvo y partículas de óxido de aluminio, de tamaños micrométricos hasta centimétricos, producidos por el encendido de motores.
- e. Liberación de alambres de cobre como parte de algún experimento.
- f. Pérdida de las cubiertas y de la pintura de los satélites y demás artefactos, debido a las colisiones con átomos de oxígeno y micrometeoritos.
- g. Liberación de agua del transbordador espacial, lo cual produce nubes de copos de nieve.

La basura espacial comprende cubiertas, tapas de lentes, etapas superiores de los propulsores, tuercas, pernos, virutas de pintura, pedazos de hojas de metal y partículas de aluminio (Portree y Loftus, 1993).²

Un paréntesis

De acuerdo con la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), las órbitas en que se mueven los satélites artificiales se clasifican en seis tipos: órbitas geoestacionarias (GEO), órbitas en transferencia geoestacionaria, órbitas terrestres bajas (LEO), órbitas terrestres medias, órbitas polares y órbitas sincrónicas solares. Los objetos en GEO se mueven a una altura de 36 000 km y a una velocidad de 3 km/s; su posición los hace ideales para misiones de telecomunicaciones y estudios del clima. Por otra parte, los satélites en LEO tienen órbitas cuya altura se encuentra entre 160 km y menos de 1 000 km sobre la superficie terrestre; su velocidad es del orden de 7.8 km/s. La Estación Espacial Internacional tiene este tipo de órbita (aproximadamente a 400 km de altura sobre la superficie terrestre).³ Si consideramos que 7.8 km/s equivalen a 28 080 km/h, y 3 km/s son 10 800 km/h, es fácil entender por qué la colisión entre estos objetos suele ser catastrófica. Tomando esto en cuenta, la Estación Espacial Internacional

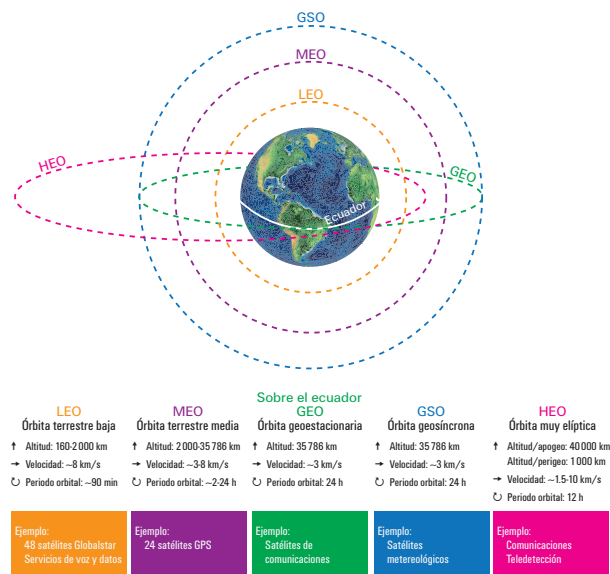
tiene un escudo que la protege de colisiones con objetos menores o iguales a 1 cm, aproximadamente.

Reconocimiento del problema y primeros intentos por resolverlo

En 1977, Donald Kessler y Burton Cour-Palais llegaron a la conclusión de que, si no se hacía algo, la basura espacial en LEO representaría un riesgo mayor de colisión que el debido a los impactos con meteoroides. De hecho, en 1990, Kessler describió lo que se conoce como el síndrome de Kessler, según el cual se desencadenaría un proceso iniciado por la colisión entre objetos intactos seguida por la colisión de fragmentos (debidos a estas colisiones) con objetos intactos y otros fragmentos. Según este esquema, en algún momento sería imposible detener las colisiones, aun cuando dejaran de enviarse más satélites, pues algunas regiones en LEO se harían poco seguras por un largo tiempo. En 1996 ocurrió la primera colisión en LEO cuando el satélite *Cerise* fue dañado por un fragmento del *Ariane*, cuya explosión ocurrió en 1986. Anteriormente, en GEO ocurrió la primera explosión en junio de 1978.

El United States Space Command (USSPACECOM, 1985-2002) fue un comando del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América cuyo

TIPOS DE ÓRBITA



² Véase <https://www.esa.int/Our_Activities/Space_Safety/Space_Debris/About_space_debris>.

³ Véase <https://www.esa.int/Our_Activities/Space_Transportation/Types_of_orbits>.

objetivo consistía en coordinar el uso del espacio exterior. Para 1993, este comando había catalogado unos 7 200 objetos como basura espacial; los más pequeños eran de 10 cm. Sin embargo, se estimó que por cada objeto observable había 20 objetos de 1 cm no detectados, 10 000 objetos de 1 mm y quizá trillones de objetos de 1 micra (Portree y Loftus, 1993).

Para tener una idea clara de las implicaciones de una colisión, incluso con objetos pequeños, podemos comentar el caso del choque de un fragmento de ~1 cm con el panel solar del satélite *Sentinel-1A*. El impacto produjo en el panel un hoyo de 40 cm de diámetro, lo cual disminuyó la cantidad de energía captada por las celdas solares (Pultarova, 2017).

En 1979 el astrónomo checo Luboš Perek presentó en un coloquio su trabajo “Outer Space Activities versus Outer Space”, con el cual hace ver el problema de no considerar seriamente la colisión entre satélites o con sus fragmentos. Si bien se da cuenta de que es imposible evitar las colisiones, propone una serie de medidas para minimizar sus efectos:

- a. Reducir la cantidad de detritos producidos durante el lanzamiento y las operaciones.
- b. Sacar de órbita a los satélites inactivos.
- c. Colocar a los satélites inactivos en órbitas de “desecho” (órbitas más lejanas que las GEO).
- d. Usar órbitas de no intersección en áreas específicas del espacio.

Como dato curioso, en 1992 Perek presentó el trabajo “Must Space Missions be Beneficial?”, en el que hace notar posibles conflictos de interés, pues lo que puede ser benéfico para unos países o grupos puede no serlo para otros. Uno de los ejemplos que menciona es la propuesta de poner restos cremados en el espacio, pues la colisión con éstos puede ser peligrosa para los astronautas (Portree y Loftus, 1993).

Riesgos debidos a la basura espacial

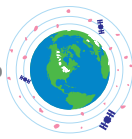
En esencia, existen tres riesgos importantes asociados a la basura espacial, tanto en el espacio como en la superficie terrestre. Por lo mencionado en los párrafos anteriores, resulta evidente que la basura

orbital puede causar daños muy serios e, incluso, destruir satélites en operación. Este escenario no sólo representa pérdidas económicas, sino también un retraso en las investigaciones, telecomunicaciones o programas de protección civil y sociales para los que estaba destinado el satélite. También se pueden ver afectados los astronautas que están en la Estación Espacial Internacional, en los transbordadores o en las futuras misiones tripuladas a la Luna o a Marte. Como un ejemplo, la película *Gravity* (2013) –aunque muy Hollywoodense– puede darnos una idea del riesgo que corren los seres humanos en el espacio.

Por otro lado, para los habitantes en la superficie terrestre (plantas y animales –pues aunque nos preocupen más los seres humanos, no somos los únicos afectados–), la basura espacial tiene dos peligros potenciales: la caída de objetos grandes que no se deshagan o no frenen en la atmósfera y el riesgo de liberación de sustancias peligrosas (Klinkrad, 2006).

Cuando un objeto ingresa a la atmósfera de la Tierra a hipervelocidad, la interacción con las moléculas del aire provoca que dicho objeto se caliente, se funda e, incluso, se evapore y se ionice. Esto ablaciona el objeto, es decir, le resta masa. Además de este fenómeno, puede llegar a ocurrir que, en algún momento, la presión aerodinámica que ejerce el aire sobre el objeto supere su resistencia interna y provoque su fragmentación súbita (Cepilecha y cols., 1998). Las dos opciones mencionadas involucran tanto al material asteroidal y cometario como a la basura espacial que reingresa a nuestra atmósfera. Los objetos relativamente pequeños pueden llegar a ablacionarse completamente, o bien pueden perder mucha rapidez, de tal manera que al alcanzar la superficie no representan una amenaza; no obstante, los objetos muy masivos sí son un problema. Dos ejemplos de esto fueron la reentrada del *Skylab* (74 toneladas) sobre el océano Índico y Australia en julio de 1979 y la del *Salyut-7* (40 toneladas) sobre Sudáfrica en febrero de 1991.

El segundo problema lo constituyen los materiales radioactivos que sirven de combustible a algunas astronaves. El primer incidente de este tipo ocurrió en abril de 1964, cuando el satélite *Transit 5BN-3*



reingresó a la atmósfera debido a una falla de lanzamiento; su generador térmico arrojó a la atmósfera, sobre el océano Índico, 1 kg de plutonio. El segundo incidente se debió a la falla del satélite *Cosmos 954*, después de tres meses de su lanzamiento, el cual reingresó sin control sobre Canadá. En este caso, se dispersaron 30 kg de uranio radioactivo a lo largo de una trayectoria de aproximadamente 1 000 km. Tal incidente provocó una demanda por parte de Canadá para reclamar la compensación de daños por seis millones de dólares, así como la preparación, por parte de la Organización de las Naciones Unidas, del documento “UN Principles Relevant to the Use of Nuclear Power Sources in Space”. Asimismo, en un tercer incidente, en febrero de 1983, el *Cosmos 1402* cayó sobre el Atlántico sur; este satélite también contenía un reactor nuclear, pero al parecer, en este caso, no hubo escape de material radioactivo (Klinkrad, 2006).

¿Capturarlos o removerlos? He ahí el dilema

A la fecha se han propuesto varios métodos para lidiar con la basura espacial. Éstos se pueden agrupar en dos categorías: métodos de captura y métodos de remoción o traslado. Todos toman en cuenta que la basura orbital se compone de objetos cuyo movimiento no puede ser controlado y los cuales no tienen estructuras adecuadas para ser sujetados; otro punto importante es el hecho de que estos objetos rotan y se bambolean. Estas tres características dificultan su manejo.

Los métodos de captura pueden dividirse a su vez en captura por conexión rígida y captura por conexión flexible. Los métodos de captura por conexión rígida involucran uno o varios brazos mecánicos con distintos diseños. En todos los casos, las simulaciones realizadas con dichos diseños requieren que se resuelva el bamboleo o la rotación de los fragmentos o satélites, así como que se minimice el impacto que sentirán los brazos y la nave a la que vayan anclados cuando uno o varios de los brazos entren en contacto con el objeto que se quiere capturar (Shan y cols., 2016). Por otra parte, el método por conexión flexible tiene la ventaja de que la captura se puede



hacer mediante una red, una agarradera sujeta a una cuerda o un arpón. De todos los métodos de captura, el más prometedor es el método de captura por red (Shan y cols., 2019).

En tanto, entre los métodos de remoción o de traslado se encuentran los sistemas de aumento del arrastre, las ataduras electrodinámicas, la fuerza de radiación solar, los métodos de remoción sin contacto y los métodos de remoción por contacto.

Los sistemas de aumento del arrastre están pensados para ser utilizados con objetos que están orbitando en LEO, pues estos sistemas funcionan debido a la interacción con la atmósfera. De hecho, la idea es aumentar el cociente área/masa del objeto para que la atmósfera lo frene, de manera parecida a como lo hace con un paracaídas. En estos sistemas, la forma de aumentar el área es cubriendo el objeto con espuma, balones o fibras, para así aumentar su área de contacto con el aire.

El método de ataduras electrodinámicas también está pensado para la basura orbital en la región de LEO. Para que este método funcione, se necesita que un brazo robótico o un arpón sujete al objeto una cuerda por la cual se pase corriente a la basura orbital. La interacción de esta corriente con el campo geomagnético produce la disminución de la órbita del objeto.

Por otra parte, el método por presión de radiación puede ser aplicado a satélites cuya forma de

propulsión no esté funcionando, pero cuyo sistema de direccionamiento de los paneles solares siga activo. En este caso, la idea es orientar los paneles solares en distintas direcciones con respecto al Sol para que la presión de la radiación de la luz solar sobre ellos disminuya su órbita.

Asimismo, la esencia de los métodos de remoción sin contacto es disminuir la velocidad del objeto para modificar su órbita. Una de las tres propuestas para hacer esto consiste en arrojar una atmósfera artificial en la trayectoria de la basura orbital para aumentar el arrastre sobre el objeto, de tal manera que se disminuya su velocidad y su órbita. Las otras dos opciones, cuyo resultado es también desacelerar el objeto y disminuir su órbita, son enviar pulsos láser o arrojar un rayo de plasma altamente **colimado**. De las tres propuestas mencionadas en este párrafo, la de la atmósfera artificial es una de las más promisorias.

Sin embargo, los métodos de remoción por contacto tienen la particularidad de que cada nave puede remover más de una basura orbital. En el método de resortera, el satélite captura un objeto y lo lanza hacia la superficie terrestre; después, puede atrapar otro de los desechos utilizando el momento generado por el primer lanzamiento. También está el método adhesivo, que propone enviar una nave “madre” con seis “niños”. Cuando la nave “madre” se encuentra cerca de una basura espacial, lanza a

uno de los “niños”, el cual se adhiere al objeto. El “niño” tiene un propulsor que modifica la órbita de la basura espacial (Shan y cols., 2016).

Es interesante notar que, a diferencia de la basura en la Tierra, el asunto de la basura espacial se ha tomado con mucha más seriedad, posiblemente porque puede afectar proyectos multimillonarios. Por otro lado, también es cierto que las comunicaciones son muy importantes para nuestras actividades personales y profesionales, razón por la cual no en vano existen constelaciones con decenas o centenas de satélites artificiales que están orbitando el planeta. Sea como sea, es importante evitar ahogarnos en basura terrestre y espacial, por lo que debemos actuar antes de llegar a un escenario similar al mostrado en la película *Wall-e* (2008).

Colimado

Un haz cuyos rayos son paralelos.

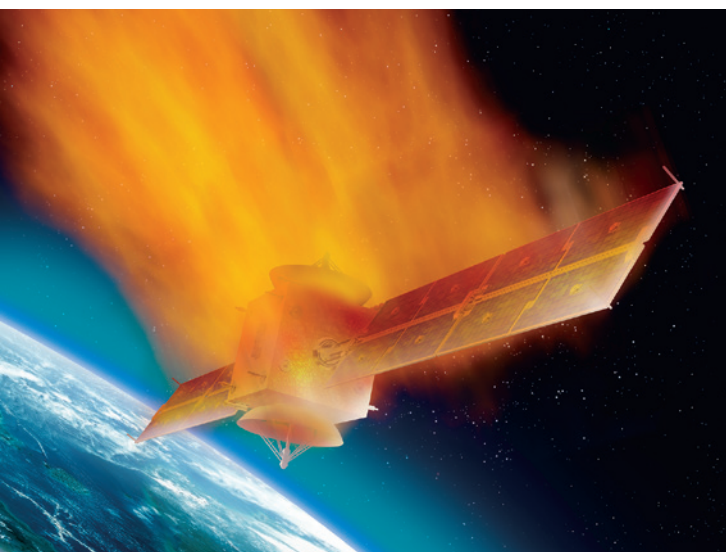
María Guadalupe Cordero Tercero

Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

gcordero@igeofisica.unam.mx

Referencias específicas

- Ceplecha, Z. *et al.* (1998), “Meteor phenomena and bodies”, *Space Science Reviews*, 84:327-471.
- Cordero, G., K. Cervantes de la Cruz y E. Gómez (2011), “The bolide of February 10, 2010: Observations in Hidalgo and Puebla, Mexico”, *Geofísica Internacional*, 50(1):77-84.
- Klinkrad, H. (2006), *Space debris. Models and risk analysis*, Alemania, Springer-Praxis.
- Portree, D. y J. Loftus (1993), “Orbital debris and near-Earth environmental management: A chronology”, Technical Report 1320, NASA Reference Publication.
- Pultarova, T. (2017), “Could Cubesats Trigger a Space Junk Apocalypse?”, *Space.com*. Disponible en: <<https://www.space.com/36506-cubesats-space-junk-apocalypse.html?jwsourc=cl>>, consultado el 21 de abril de 2020.
- Shan, M., J. Guo y E. Gill (2016), “Review and comparison of active space debris capturing and removal methods”, *Progress in Aerospace Sciences*, 80:18-32.
- Shan, M., J. Guo y E. Gill (2019), “Contact dynamic models of space debris capturing using a net”, *Acta Astronautica*, 158:198-205.



José Alberto Ramírez Aguilar, María Guadalupe Ortega Ontiveros y David Daniel Castelán Castillo

KuautliSAT el Ulises 2.0, un nanosatélite mexicano

Actualmente existen satélites artificiales con un relativamente bajo costo y una gran capacidad para llevar a cabo misiones espaciales. Ello permite a nuestro país el acceso a la tecnología satelital. La Universidad Nacional Autónoma de México está desarrollando un nanosatélite para ayudar a llevar a México al espacio y, de manera paralela, impulsar la formación de recursos humanos de alto nivel en este sector.

¿Qué son los nanosatélites?

Los nanosatélites son sistemas de alta ingeniería desarrollados para llevar a cabo misiones diversas desde el espacio. Este término se usa para identificar a los satélites artificiales cuya masa oscila entre 1 y 10 kg. Los avances en la microelectrónica, la nanotecnología y los microsistemas electromecánicos han hecho posible que hoy los nanosatélites tengan algunas prestaciones comparables a las de las grandes plataformas.

Un estándar ampliamente adoptado por las universidades y empresas es el CubeSat, un cubo de 10 cm × 10 cm × 10 cm. Múltiples CubeSat 1U (una unidad) pueden combinarse para formar grandes sistemas, conocidos como 2U, 3U, etcétera. El nanosatélite *KuautliSAT el Ulises 2.0* tiene una configuración tipo TubeSat, es decir, un tubo de dieciséis caras que cabe dentro de una estructura 1U tipo CubeSat; ello pondrá a prueba sus capacidades una vez puesto en órbita. Aún no existe un estándar para este tipo de estructura, pero en países como Brasil y Colombia se han desarrollado misiones espaciales con este tipo de nanosatélites y que han obtenido resultados realmente alentadores.

¿Qué pueden hacer los nanosatélites?

Estos sistemas tienen la capacidad de cumplir diversas misiones en el espacio: telecomunicaciones, observación de la Tierra, estudios geofísicos y geodésicos, demostración de nuevas tecnologías, entre otras. Por ello, hoy los nanosatélites se constituyen



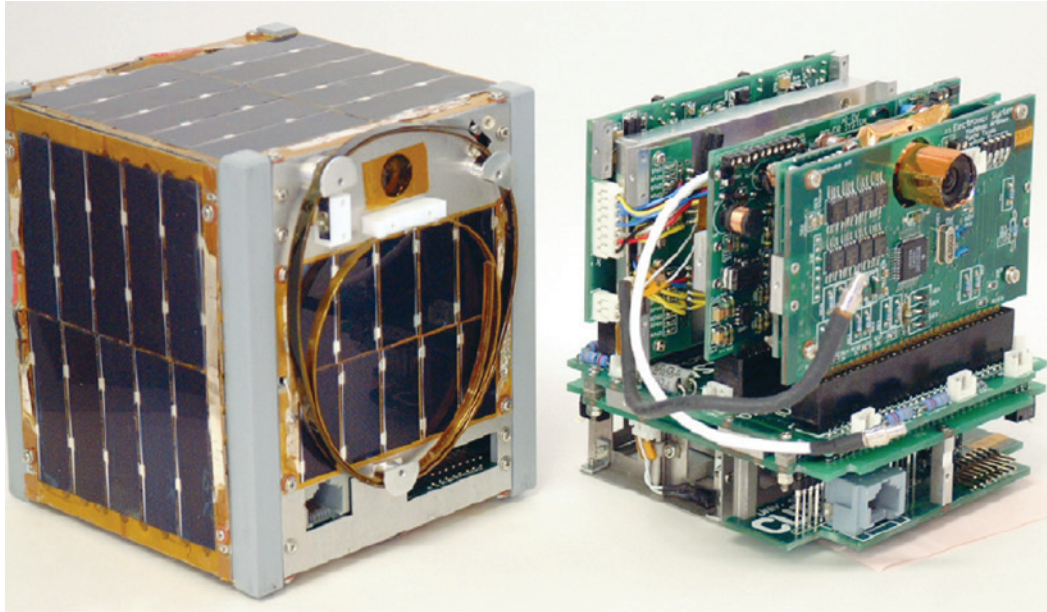


Figura 1. Nanosatélite bajo el estándar CubeSat. Crédito: Malaspina, 2012.

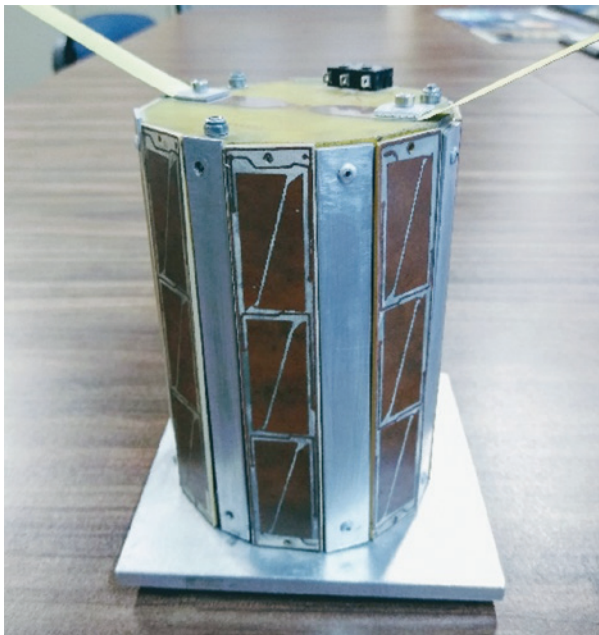


Figura 2. Prototipo inicial del nanosatélite *KuautliSAT el Ulises 2.0*. Crédito: UAT, 2019.

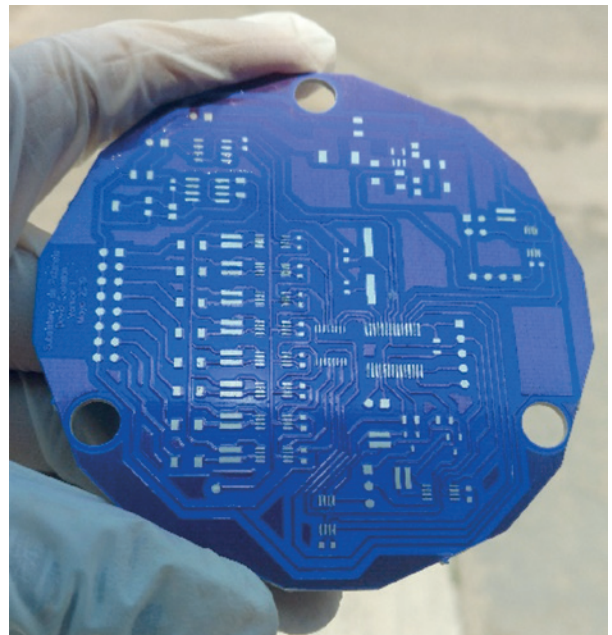


Figura 3. Subsistema de energía del nanosatélite *KuautliSAT el Ulises 2.0*. Crédito: UAT, 2019.

como una tendencia tecnológica mundial realmente prometedora y al alcance de muchos institutos y universidades del mundo, de tal forma que las perspectivas de lanzamiento y uso de estos ingenios tecnológicos indican que en los próximos cinco años miles de nanosatélites estarán orbitando la Tierra.

¿Cómo se pueden mejorar las prestaciones de los nanosatélites?

Aunque son capaces de operar de manera individual, sus prestaciones se incrementan al constituirse constelaciones de varios nanosatélites para lograr una cobertura global. De esta forma, tienen muchas

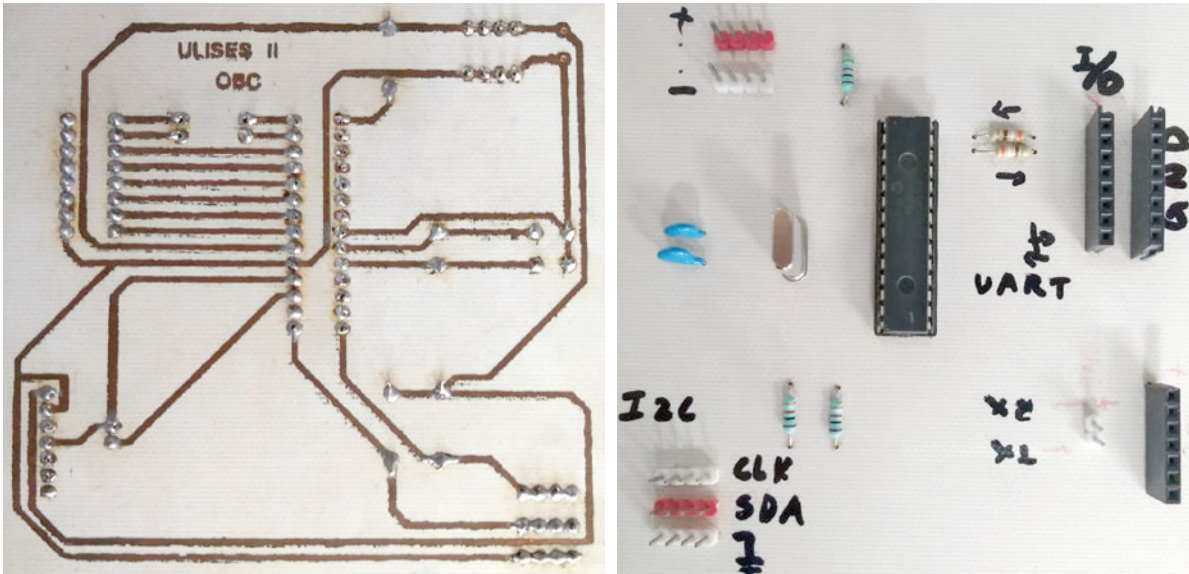


Figura 4. Prototipo inicial de la computadora. Crédito: UAT, 2019.

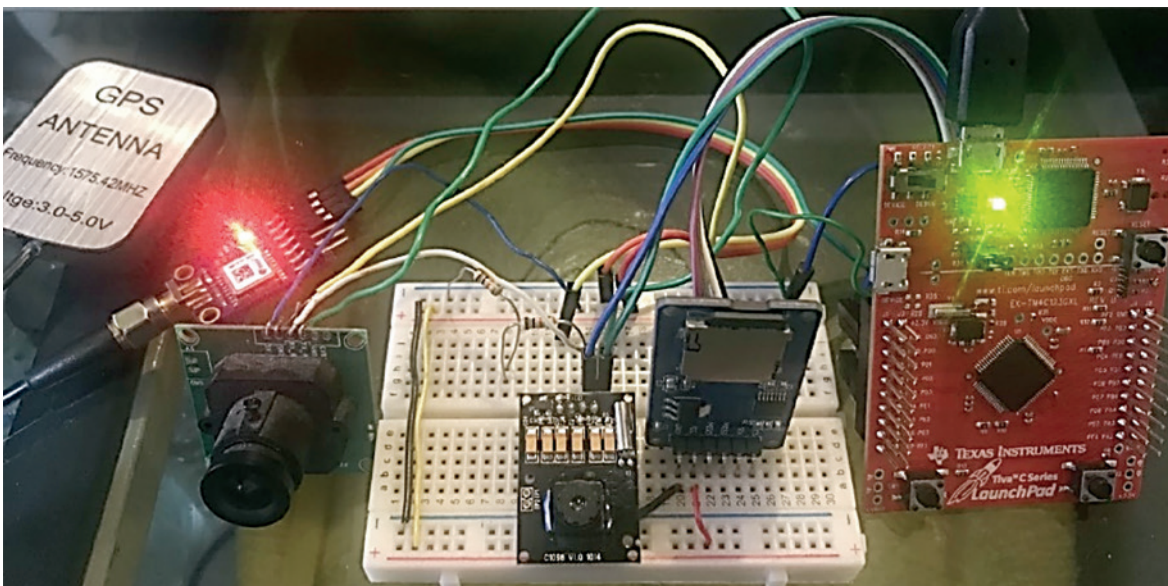


Figura 5. Carga útil principal del KuautliSAT el Ulises 2.0. Crédito: UAT, 2019.

ventajas; por ejemplo, su diseño y construcción lleva relativamente poco tiempo, o bien su desarrollo y lanzamiento tiene un costo razonable.

¿Qué están haciendo los países de América Latina al respecto?

Actualmente hay una vasta actividad relacionada con el desarrollo de los nanosatélites en nuestra

región. En 2018 Costa Rica puso exitosamente en órbita al nanosatélite *Irazú*. Ecuador, Perú y Chile también aparecen en la lista de los países involucrados en la materia.

¿Qué está haciendo la UNAM?

La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en específico la Unidad de Alta Tecnología



Figura 6. Parte del equipo de trabajo del nanosatélite. Crédito: UAT, 2019.



Figura 7. Nanosatélites en constelación. Crédito: Infoespacial, 2019.

(UAT) de la Facultad de Ingeniería (FI), cuenta con un programa de desarrollo de satélites pequeños dentro del Departamento de Ingeniería Aeroespacial. Un ejemplo es el proyecto del nanosatélite *KuautliSAT el Ulises 2.0*; con una configuración del tipo TubeSat –mencionada anteriormente–, se compone de ocho caras de aluminio de calidad espacial que sirven para darle rigidez a la estructura y ayudar a disipar el calor, mientras que las otras ocho caras corresponden a los paneles solares destinados a captar energía solar para

generar electricidad y poder alimentar a todos los subsistemas que integran al nanosatélite. El proyecto tiene un sentido escalable; es decir, una vez alcanzada la meta de ponerlo en órbita y operarlo, se generará una base de conocimientos que permitirá avanzar al siguiente paso, el cual consiste –precisamente– en desarrollar las siguientes versiones de nanosatélites de la UNAM con misiones cada vez más complejas.

El objetivo del *KuautliSAT el Ulises 2.0* es tomar imágenes desde el espacio, así como recabar infor-

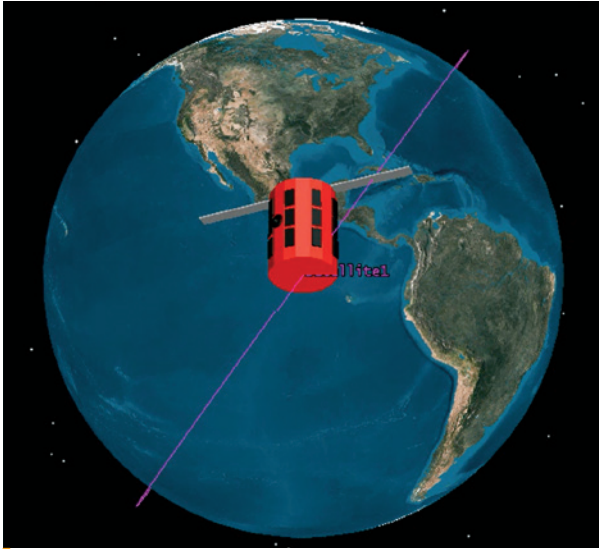


Figura 8. Representación artística del nanosatélite en órbita. Crédito: UAT, 2019.

mación de telemetría para informar a la estación de control satelital en tierra (ECXSAT-B) acerca del estado de salud de los diversos subsistemas del nanosatélite. La estación está ubicada en la UAT, UNAM Campus Juriquilla, Querétaro.

Este nanosatélite cuenta con un subsistema de distribución de energía. La computadora de vuelo es el cerebro del *KuautliSAT el Ulises 2.0*, ya que coordina y controla todas las funciones. Pero el subsistema de carga útil, compuesto por dos unidades de cámaras de baja resolución, es la razón de la misión principal del proyecto.

Adicionalmente, el desarrollo de este nanosatélite ha servido como modelo académico de aprendizaje, pues ha ayudado a formar a las primeras generaciones de ingenieros mexicanos espaciales, quienes ya se encuentran trabajando en nuevas iniciativas. En tanto, *KuautliSAT el Ulises 2.0* se acerca cada vez más al espacio gracias al esfuerzo de jóvenes talen-

tosos y soñadores, como los que ahora participan en el proyecto. Estamos trabajando fuertemente con el fin de heredar un futuro lleno de nuevas oportunidades para las generaciones venideras, pues ellos son el motivo y la inspiración principal para que cada día soñemos con la Luna y con alcanzar las estrellas.

José Alberto Ramírez Aguilar

Unidad de Alta Tecnología, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
dulbet2000@yahoo.com

María Guadalupe Ortega Ontiveros

Unidad de Alta Tecnología, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
maria.guadalupe.ortega@comunidad.unam.mx

David Daniel Castelán Castillo

Unidad de Alta Tecnología, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
david_pumas@comunidad.unam.mx

Referencias específicas

- CalPoly-CDS-Rev.13 (2014), *CubeSat Design Specification*, San Luis Obispo, California Polytechnic State University.
- CIGEPI (2017), "Nanosatélites", *Boletín Tecnológico*, junio.
- Grupo Fórmula (2015), "Nanosatélite Ulises 2.0 se acerca al espacio", *Grupo Fórmula*.
- Nugent, R. *et al.* (2011), "The CubeSat: The Picosatellite Standard for Research and Education", *American Institute of Aeronautics and Astronautics*: 11.
- Twiggs, B. (2008), "Origin of CubeSat", en H. Helvajian y S. W. Janson (eds.), *Small Satellites: Past, Present and Future*, Reston, Aerospace Press.

Aldo Eleazar Pérez Ramos, Edwin Martínez Aragón y Salvador Villarreal Reyes



Baterías que dan vida a un nanosatélite

Una de las razones del éxito de los nanosatélites es que están contruidos con componentes electrónicos comerciales similares a los que se usan en los teléfonos celulares. Sin embargo, hay componentes que deben seleccionarse minuciosamente, como las baterías recargables, las cuales pueden expandirse, incendiarse e incluso explotar, lo cual pone en riesgo el lanzamiento o la misión espacial. ¿Cuáles son las baterías más adecuadas?

¿Qué es un nanosatélite tipo CubeSat?

El término *nanosatélite* o *nanosat* se asocia con un satélite artificial que tiene un peso de entre 1 y 10 kg. Estos nanosatélites son compactos y ligeros, pero han demostrado por más de una década poseer un gran potencial en misiones educativas y de investigación. Se pronostica que en los próximos seis años se lanzarán más de 2 500 nanosatélites con misiones muy diversas: desde la medición de temperatura en el interior del sistema hasta la evaluación de la actividad genética de una colonia de bacterias, entre muchas otras más.

La publicación de guías estandarizadas para el diseño de nanosatélites y las modificaciones en las legislaciones de algunos países para permitir los lanzamientos de tipo comercial relajaron considerablemente los costos de desarrollo y puesta en órbita de estos pequeños artefactos. Dichas acciones permitieron que un gran número de instituciones educativas en el mundo, y algunas empresas de países emergentes, incursionaran en la nueva carrera espacial. Las principales guías de diseño estandarizadas para nanosatélites están vinculadas con los programas CubeSat, TubeSat y ThinSat; si nos preguntamos cuál de los tres programas es el más exitoso, podemos revisar una base de datos¹ que tiene registrados 1 307 nanosatélites lanzados al espacio, de los cuales 1 200 son CubeSat, por lo que esta cifra podría ayudarnos a responder la pregunta.

Los CubeSat se miden por unidades: 1 unidad (1U) es la base, con un tamaño de 10 cm de largo × 10 cm de ancho × 10 cm de alto y un peso menor de 1.33 kg. Esta medida base se fundamenta en la posibilidad de rastreo del nanosatélite una

¹ Véase <www.nanosats.eu>.





vez que se encuentre orbitando la Tierra. Además, es importante mencionar que, dependiendo de la complejidad de la misión, el número de unidades del CubeSat se va incrementando.

Los nanosatélites se componen a su vez de varios módulos internos conocidos como subsistemas, los cuales trabajan en conjunto para lograr el éxito de la misión. El CubeSat de 1U está formado por:

1. El subsistema de estructura brinda la solidez estructural a todo el nanosatélite y absorbe las vibraciones mecánicas producidas por el cohete durante su traslado al espacio.
2. El subsistema de potencia –formado por celdas solares, bancos de baterías recargables y un circuito electrónico– se encarga de recargar dichos bancos y distribuir la corriente eléctrica hacia otros subsistemas.
3. La computadora de vuelo actúa como el cerebro del CubeSat. En su memoria están grabadas las tareas que deberán ejecutar los diferentes subsistemas para cumplir con la misión del nanosatélite.
4. El subsistema de telemetría, rastreo y control es responsable de establecer las comunicaciones entre el CubeSat y la estación terrena.
5. El subsistema de antenas tiene una antena transmisora, y en algunos casos también puede poseer una antena receptora para establecer comunicaciones bidireccionales (Figura 1).

Por último, los satélites CubeSat de más de 1U llevan consigo un subsistema conocido como carga

útil, el cual está diseñado particularmente para llevar a cabo el experimento que se desea desarrollar y estudiar en el espacio.

■ Pruebas de calidad

■ Incluso con la existencia de estándares para el diseño y la construcción de los CubeSat, éstos tienen que cumplir con normas y pruebas muy rigurosas. Existen dos grupos de pruebas mínimas que se deben realizar a un CubeSat antes de lanzarlo al espacio:

1. De vibración mecánica: para corroborar la integridad mecánica del nanosatélite y asegurar que los componentes que lo integran sigan fijos en sus posiciones durante su viaje al espacio. Por tal motivo, es importante considerar el tipo de componentes y su distribución dentro del CubeSat, con la intención de darle solidez a todo el conjunto.
2. De vacío térmico: para verificar el correcto funcionamiento del CubeSat en el espacio ante condiciones extremas de temperatura. Se realiza dentro de una cámara de vacío en donde se varía la temperatura de -20°C hasta 80°C , con incrementos de temperatura de 5°C por minuto. En esta prueba la integridad del CubeSat se encuentra comprometida, por tal motivo es importante seleccionar los componentes electrónicos comerciales con baja o nula probabilidad de incendio o detonación debido al elevado incremento de temperatura.

Uno de los aspectos fundamentales que hace viable el diseño y la construcción de un CubeSat es el uso de componentes comerciales, también conocidos como componentes sacados del estante (COTS, por las siglas en inglés de *commercial off-the-shelf*). Éstos se utilizan en los aparatos electrónicos de consumo que utilizamos a diario, como teléfonos celulares, relojes inteligentes, computadoras portátiles, tabletas electrónicas, reproductores de música, drones, etcétera. Sin embargo, cuando hablamos de los CubeSat, debemos tener cuidado al seleccionar algunos de estos componentes; tal es el caso de las baterías, por los motivos que explicaremos en los párrafos siguientes.

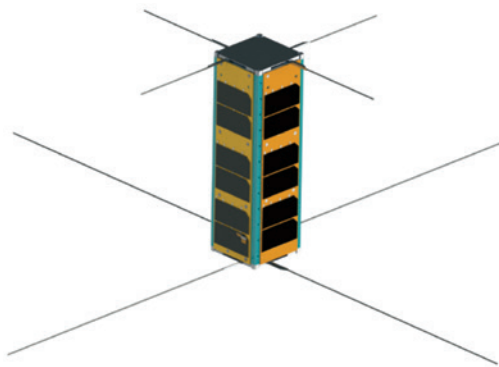


Figura 1. CubeSat de tres unidades (3U) con antena de transmisión y recepción desplegadas.

¿Por qué debemos seleccionar cuidadosamente las baterías de un CubeSat?

Por lo general, una batería recargable se compone de varias celdas interconectadas y cada celda está formada por dos electrodos (ánodo y cátodo) de un metal o material compuesto y un medio conductor, conocido como electrolito. El principio fundamental de una batería consiste en las reacciones de oxidación-reducción de ciertas sustancias químicas, una de las cuales pierde electrones (se oxida) mientras que la otra gana electrones (se reduce); se puede retornar a la configuración inicial dadas las condiciones necesarias: la inyección de electricidad (carga) o el cierre del circuito (descarga). Actualmente existe una gran variedad de baterías recargables, de diferentes tamaños y con distintos materiales en su interior. Las baterías recargables más utilizadas en los dispositivos electrónicos que usamos en tierra combinan materiales como plomo-ácido (PbO_2), níquel-cadmio (Ni-Cd), níquel-hidruro metálico (NiMH), iones de litio (Li-Ion) y polímero de iones de litio (LiPo).

En el caso de las baterías recargables que se pueden emplear para las misiones CubeSat, predominan aquellas basadas en iones de litio. De hecho, este tipo de baterías se ha convertido en la fuente de energía predilecta para los aparatos electrónicos de consumo que utilizamos en nuestra vida diaria. Las baterías de iones de litio se eligen por su alta densidad de energía (relación energía-tamaño), ya que pueden concentrar grandes cantidades de energía en un pequeño y delgado encapsulado, lo cual es ideal para los dispositivos portátiles. Asimismo, tienen un bajo nivel de descarga por inactividad; a diferencia de las baterías basadas en níquel-cadmio, las baterías de iones de litio pueden mantener la energía por periodos más prolongados de inactividad. También destaca su alta capacidad para entregar corriente, ya que es posible obtener de ellas varios amperios hora (Ah) con una celda pequeña. Por ejemplo, la celda Molicel INR18650-P26A puede proporcionar $2.477 \text{ Ah} \times 3.6 \text{ V} = 8.9 \text{ Watts hora (Wh)}$, con un tamaño de 64.8 mm de largo $\times$ 18.4 mm de diámetro y un peso de 46 gramos . Esto se traduce en una **densidad de energía específica** de 193.5 Wh/kg y una **densidad de energía volumétrica** de $516.25 \text{ Watts hora/}$

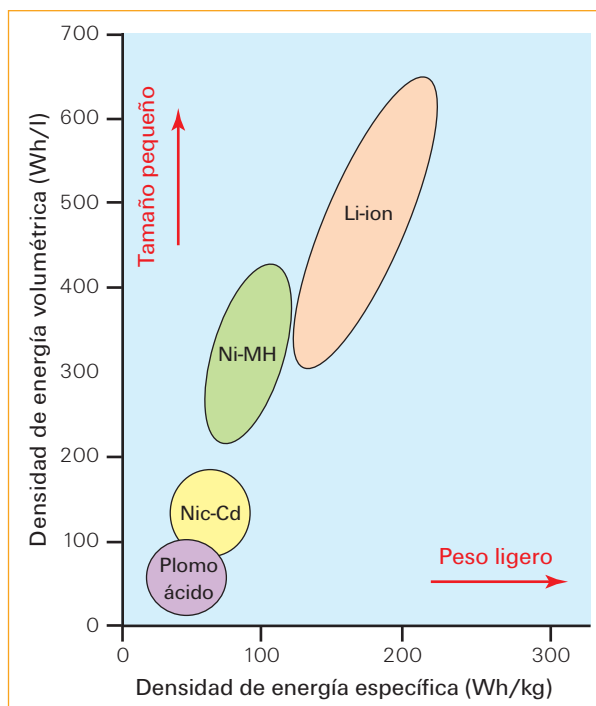


Figura 2. Comparación entre las densidades de energía volumétrica y específica de diferentes tipos de baterías recargables.

litro (Wh/l), capacidad superior a las celdas convencionales de níquel (véase la Figura 2).

No obstante, a pesar de sus interesantes capacidades, también es importante mencionar que existe el riesgo latente de incendio e incluso explosiones debido, principalmente, a cortocircuitos en el interior de las celdas. Esto sucede cuando un plástico interno que separa al cátodo del ánodo falla y permite que se toquen; cuando esto ocurre, la batería empieza a sobrecalentarse y pueden generarse incendios, como los reportados en 2013 en la cabina principal de un Boeing 787-8 durante un vuelo comercial de Tokio a Boston de la aerolínea Japan Airlines, así como los ocasionados en 2016 por los teléfonos inteligentes Galaxy Note 7.

Hay diferentes razones por las cuales el separador suele fallar: algunas se deben a un mal diseño o a defectos de fábrica, pero también hay factores externos, como sobrecalentamiento, golpes recurrentes, perforaciones o problemas con el cargador, el cual puede provocar un cortocircuito o incrementar la temperatura de la celda hasta que el separador interno de la batería se rompa. Por lo antes men-

Densidad de energía específica

Es la energía por unidad de masa.

Densidad de energía volumétrica

Es la energía por unidad de volumen.



cionado, es importante seleccionar minuciosamente el tipo de forma de la celda de iones de litio que se emplea en los bancos de baterías de los subsistemas de potencia de los CubeSat, cuidando no poner en riesgo la integridad del vehículo espacial y la de los subsistemas y unidades que incluye.

¿Qué tipo de baterías debemos utilizar en un CubeSat?

Las celdas de iones de litio principalmente se encuentran en tres formas físicas: prismáticas, de bolsa y cilíndricas.

Las celdas prismáticas son placas planas que satisfacen la demanda de aparatos que tienen una forma delgada, como la mayoría de los teléfonos celulares, tabletas electrónicas y computadoras portátiles ultradelgadas. Estas baterías hacen un uso óptimo del espacio mediante el método de capas; así, pueden estar envueltas en paquetes parecidos a una caja de chicles o a una pequeña barra de chocolate, aunque no existe una forma estandarizada, por lo que cada fabricante las diseña de acuerdo a sus necesidades. Si bien el diseño prismático mejora la utilización del espacio y permite un diseño flexible, las baterías requieren de una cubierta firme para lograr la compresión. Por lo anterior, el método de fabricación es costoso en comparación con las otras baterías, son menos eficientes en la gestión térmica y tienen una vida útil más corta que el diseño de forma cilíndrica. Además, las baterías con forma prismática no poseen elementos de protección internos que permitan soportar las pruebas requeridas de vibración y de vacío térmico antes mencionadas. Por lo tanto, no se recomienda emplearlas en los bancos de baterías del subsistema de potencia de los nanosatélites tipo CubeSat, a menos que se añadan sistemas de seguridad externos, ya sean mecánicos o eléctricos.

Las celdas tipo bolsa ofrecen una solución simple, flexible y liviana para el diseño de una batería. La eliminación de la carcasa metálica reduce el peso, pero la batería necesita soporte y espacio para expandirse. No existen celdas de tipo bolsa con medidas estandarizadas, por lo que cada fabricante diseña sus propios modelos de acuerdo a sus necesidades. Aunque este

tipo de forma es fácilmente apilable, la expansión que sufren las celdas es un aspecto a considerar para el diseño de las estructuras de los aparatos electrónicos que alimentará la batería. Por ejemplo, se debe evitar colocarlas cerca de bordes afilados, los cuales pueden ejercer presión sobre la batería y romperla a medida que se expande. No tomar en cuenta estas precauciones podría dañar otros componentes cercanos o provocar un incendio por la liberación de gases inflamables. Dicho fenómeno de ensanchamiento (expansión) extremo es un factor importante para no utilizarlas en los bancos de baterías de los subsistemas de potencia de nanosatélites tipo CubeSat.

Por otro lado, la forma cilíndrica es uno de los estilos de empaque más utilizados para las baterías. Las principales ventajas son la facilidad de fabricación y la buena estabilidad mecánica. El cilindro tubular puede soportar altas presiones internas sin deformarse. Además, es importante mencionar que la mayoría de las celdas de iones de litio cilíndricas comerciales del tipo 18650 (18 mm de diámetro y 650 mm de largo) están equipadas con sistemas de protección, como un interruptor limitador de corriente de coeficiente térmico positivo (PTC, proveniente del inglés *positive thermal coefficient*) para brindar protección contra cortocircuitos externos a la celda; un dispositivo interruptor de corriente (CID, *current interrupt device*) o válvula de presión para deshabilitar la celda de manera perma-

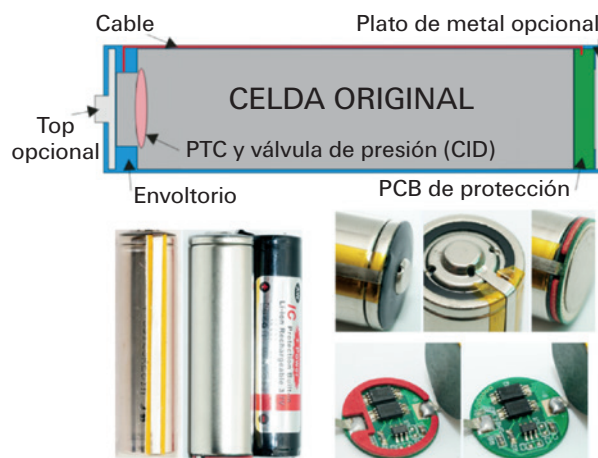


Figura 3. Estructura interna de una celda de iones de litio (Li-Ion) con forma cilíndrica 18 650 y mecanismos de protección. Imagen modificada de: <https://lygte-info.dk/info/battery%20protection%20UK.html>.

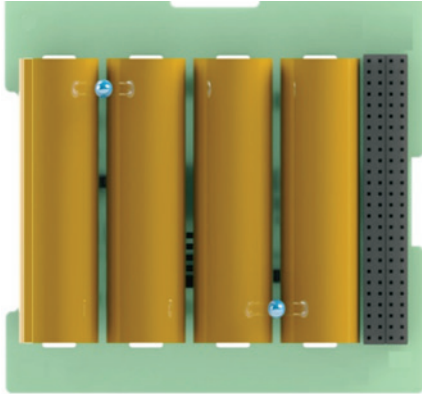


Figura 4. Banco de baterías de un nanosatélite CubeSat formado por celdas de iones de litio con factor de forma cilíndrico 18 650.

nente si la presión es muy alta (esto puede presentarse debido a una sobrecarga); así como tarjetas de circuito impreso para proteger contra sobrecargas y cortocircuitos. En la Figura 3 se muestran los sistemas de protección más utilizados en este tipo de celdas.

Con la información proporcionada hasta el momento, podemos darnos cuenta de que las baterías recargables comerciales de iones de litio de forma cilíndrica cumplen con los requisitos de seguridad y almacenamiento de energía necesarios para desarrollar exitosamente las misiones educativas y de investigación de la mayoría de los nanosatélites. Por tal motivo, no es extraño que se utilicen subsistemas de almacenamiento de energía (bancos de baterías)

con celdas cilíndricas en varios de los CubeSat enviados al espacio (véase la Figura 4). En particular, se han usado celdas con factor de forma 18 650, de las cuales existe una amplia documentación de pruebas realizadas por las agencias espaciales reconocidas en el mundo, como la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio de Estados Unidos de América (NASA). La confianza que existe hacia este tipo de celdas también se ve reflejada por parte de las principales compañías internacionales que desarrollan y venden subsistemas de potencia y bancos de baterías para nanosatélites tipo CubeSat.

Aldo Eleazar Pérez Ramos

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

aramos@cicese.mx

Edwin Martínez Aragón

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

emartine@cicese.mx

Salvador Villarreal Reyes

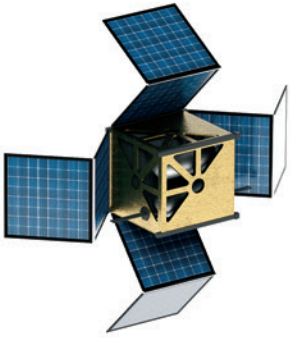
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

svillar@cicese.mx

Referencias específicas

- Castro Avellaneda, J., A. Grajales Henríquez y J. Salamanca Céspedes (2016), "Módulo de potencia para un picosatélite experimental tipo Cubesat", *Redes de Ingeniería*, 7(1):67-77.
- Cerda, J. de la (2019), "Painani-I: primer nanosatélite mexicano puesto en el espacio", *TODoS @ CICESE Comunicamos Ciencia*. Disponible en: <<http://bit.ly/2I67Ows>>, consultado el 4 de mayo de 2020.
- CubeSat (s. f.), *CubeSat Design Specification (CDS) REV 13*, San Luis Obispo, California Polytechnic State University. Disponible en: <https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf>, consultado el 4 de mayo de 2020.
- Nieto-Peroy, C. y M. R. Emami (2019), "CubeSat Mission: From Design to Operation", *Applied Sciences*, 9(15):3110. Disponible en: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/9/15/3110/htm>>, consultado el 4 de mayo de 2020.
- Padilla Medina, D. (2018), *Diseño y manufactura de la estructura de un CubeSat 2U* (tesis de pregrado), Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/14946>>, consultado el 4 de mayo de 2020.
- Serrano Arellano, A. (2015), *Requerimientos para desarrollar y poner en órbita satélites CubeSat dentro de un entorno universitario* (tesis de pregrado), Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/5971>>, consultado el 4 de mayo de 2020.

Celso Gutiérrez Martínez, Jacobo Meza Pérez y Alfredo Torres Fórtiz



Los satélites pequeños también van al doctor

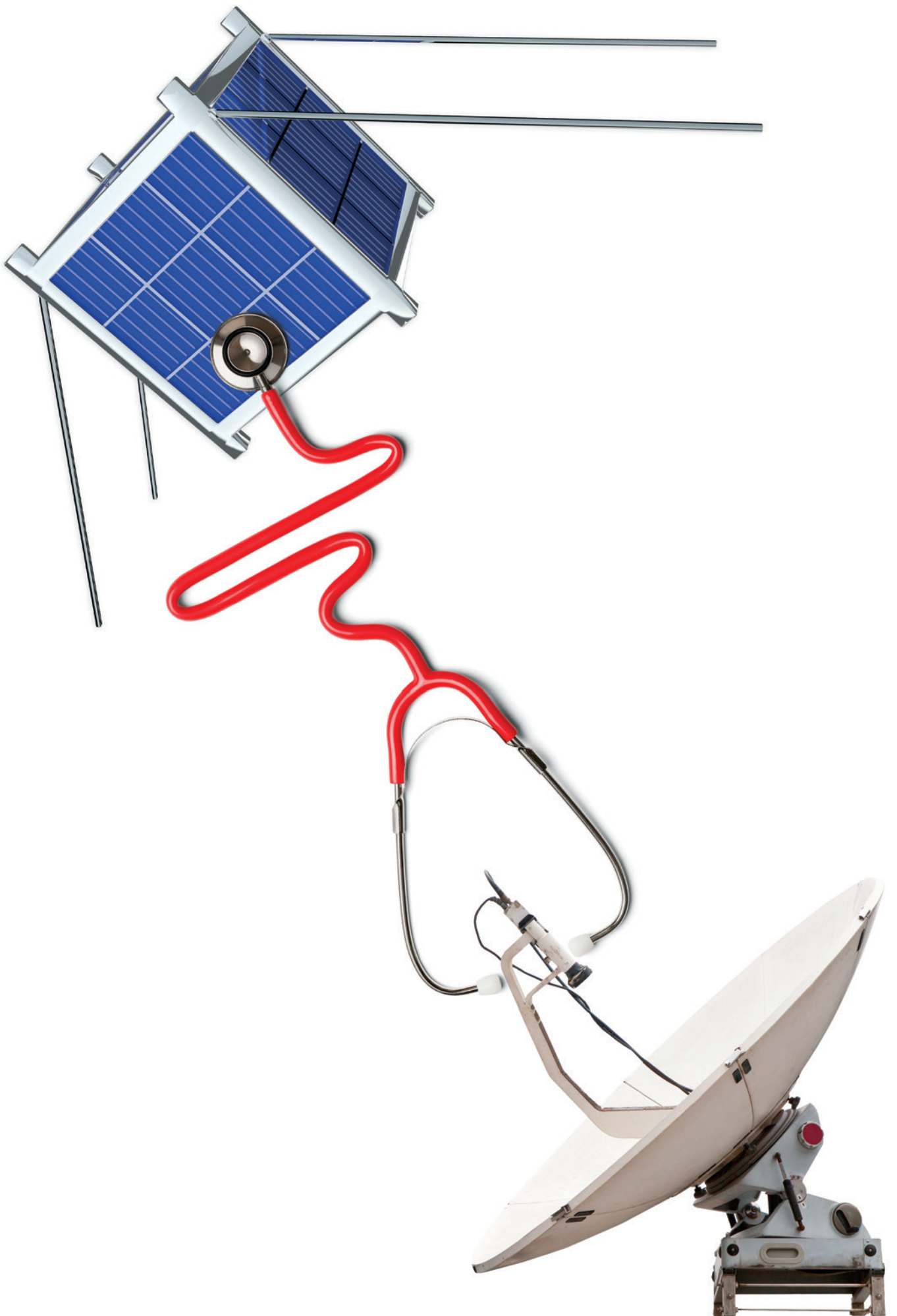
Para mantener el buen funcionamiento de los nanosatélites en el espacio, se deben medir los parámetros vitales (temperatura, presión, velocidad, aceleración, etcétera) a bordo de éstos conforme orbitan alrededor de la Tierra. Estas mediciones se transmiten a la estación de control terrestre, donde los expertos –tal como si fueran “médicos”– las analizan para conocer el estado de “salud” del satélite y así poder llevar a cabo las correcciones necesarias.

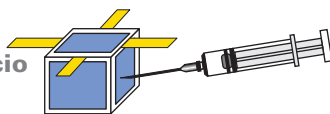
Introducción

En el marco del uso del espacio con fines pacíficos, en las dos décadas recientes la tecnología satelital se ha diversificado. Tradicionalmente, los satélites artificiales han sido de grandes dimensiones (varios metros) y con un peso superior a 100 kg. No obstante, la diversificación tecnológica y la miniaturización de los componentes están permitiendo el desarrollo de satélites pequeños, en particular las tecnologías TubeSat y CubeSat.

Los satélites pequeños –con frecuencia llamados nanosatélites– son mecanismos autónomos que han emergido como una tecnología de poca complejidad y bajo costo, pero con la capacidad de realizar misiones espaciales de diversa naturaleza. Los nanosatélites más conocidos son los denominados CubeSat, que son pequeños cubos de 10 cm de lado y que alcanzan un peso máximo de 1 kg. Estos satélites pequeños se integran con todos los subsistemas funcionales: generación de potencia eléctrica, computadora de vuelo, comunicaciones de radiofrecuencia, telemetría y telecomando, sensores (temperatura, presión, posición y orientación, velocidad, aceleración, entre otros), actuadores, subsistemas de misión, etcétera, los cuales aseguran la operación del satélite y el éxito de una misión en el espacio.

La tecnología CubeSat está disponible de manera extensa para que las personas y organizaciones de diferentes vocaciones puedan diseñar y realizar misiones espaciales de interés específico, incluidas las misiones científicas, tecnológicas, ambientales, educativas, de salud, iniciativas ciudadanas, entre muchas otras.





Una misión espacial basada en nanosatélites consta de dos elementos que son complementarios: el nanosatélite puesto en órbita y al menos una estación terrena. Ambos –separados por varios cientos de kilómetros– se enlazan únicamente por ondas de radio que les permiten comunicarse para intercambiar información y datos, así como para ejecutar órdenes y comandos que son enviados desde la Tierra. La Figura 1 muestra la configuración básica de un enlace satélite-estación terrena; la comunicación se realiza mediante ondas de radio.

Un nanosatélite es un sistema autónomo mínimo capaz de realizar una misión espacial, para lo cual requiere de un conjunto de subsistemas funcionales que permitan su operación exitosa. Los subsistemas principales (véase la Figura 2) son: generación de energía eléctrica mediante celdas solares y su almacenamiento en baterías, computadora de vuelo, subsistema de sensores de parámetros vitales de funcionamiento (termómetros, brújula de orientación, presión, velocímetro y aceleración, potencia eléctrica, etcétera), subsistema de radioco-

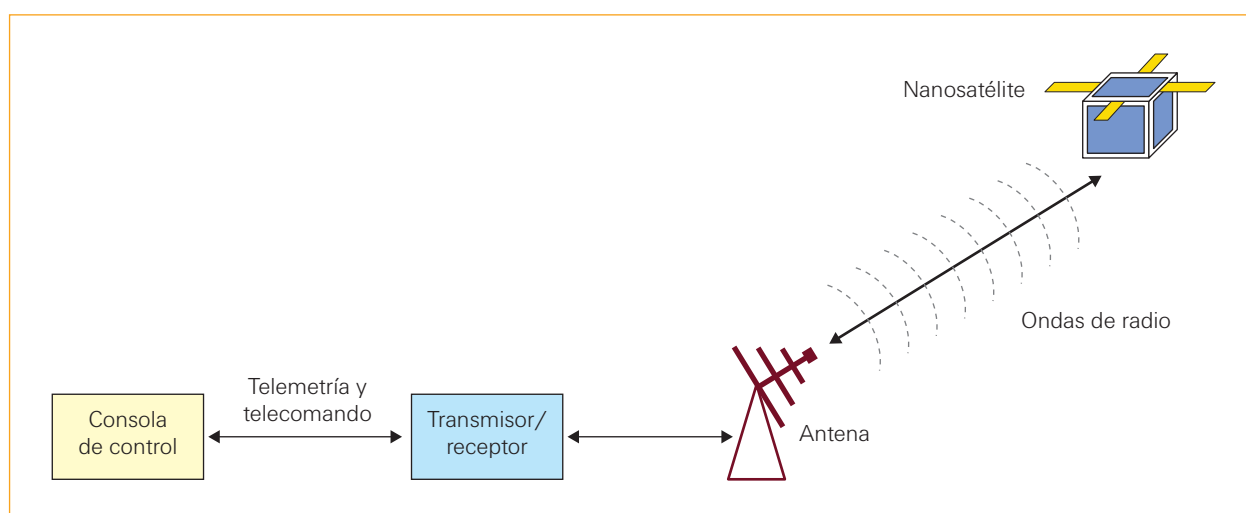


Figura 1. Esquema básico de un enlace nanosatélite-estación terrena. La comunicación se realiza mediante ondas de radio.

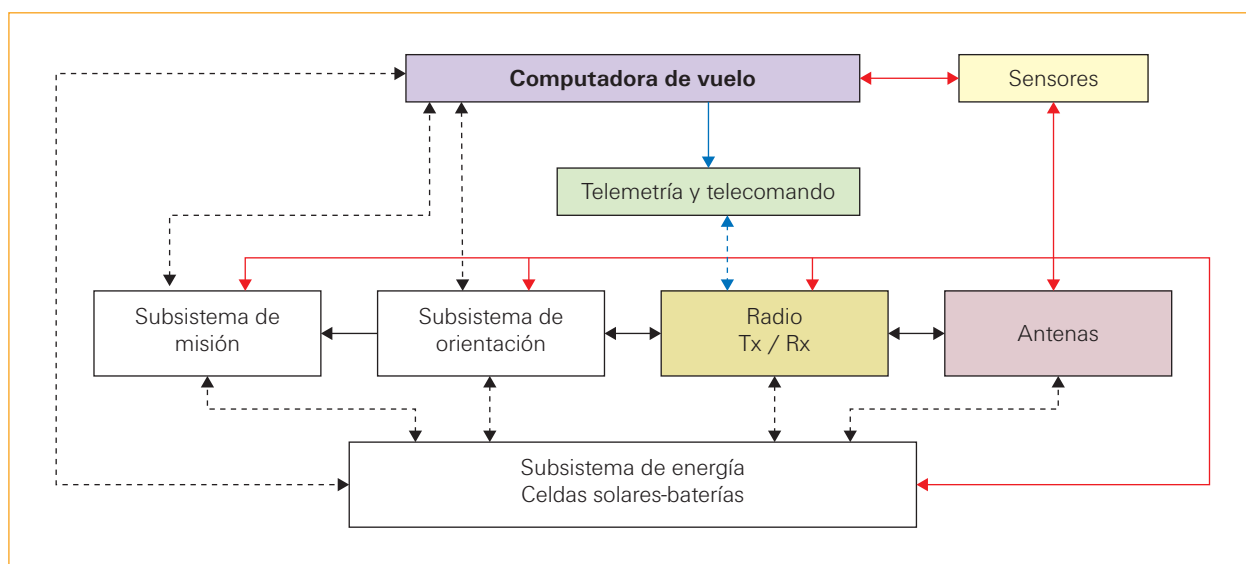


Figura 2. Subsistemas vitales a bordo de un nanosatélite. Los subsistemas de monitoreo de la “salud” del satélite son: sensores, computadora de vuelo y telemetría, y telecomando.

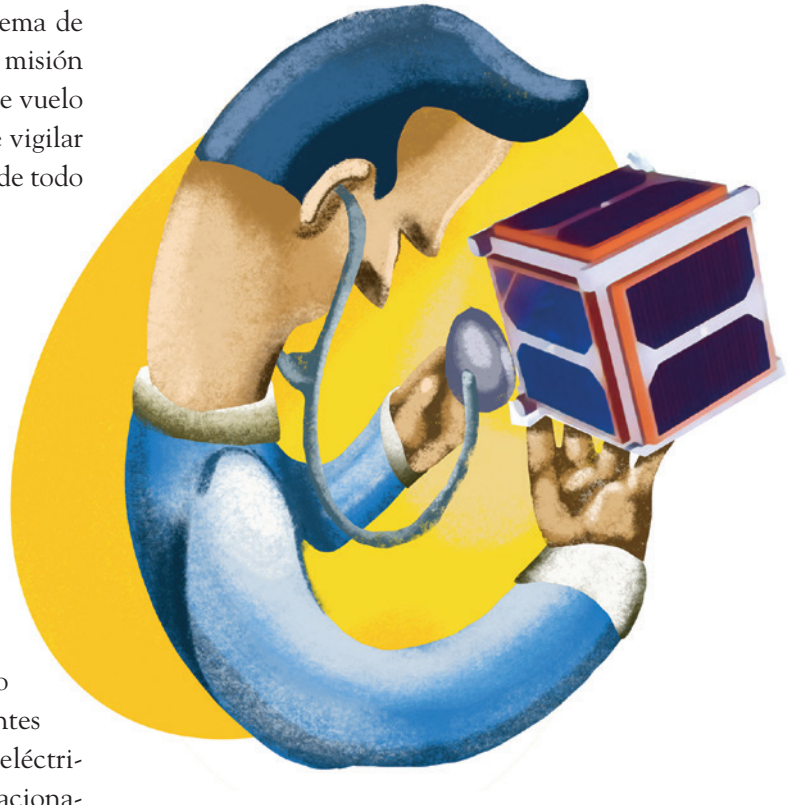
municación con estaciones terrenas, subsistema de telemetría y telecomando, y subsistemas de misión espacial. En este conjunto, la computadora de vuelo es el cerebro del nanosatélite y se encarga de vigilar y regular las condiciones de funcionamiento de todo el sistema.

Subsistema de sensores del nanosatélite

Los sensores de variables físicas (temperatura, presión, velocidad, aceleración, entre otras) a bordo de los satélites pequeños permiten conocer la dinámica de los cambios de dichas variables conforme el objeto se mueve en órbita alrededor de la Tierra. Las variables físicas se miden mediante sensores, los cuales son dispositivos eléctricos o electromecánicos colocados en los diferentes subsistemas. Los sensores generan señales eléctricas que representan las variables físicas relacionadas con las condiciones de operación del satélite. En una analogía con los seres vivos, los sensores a bordo del satélite son sus sentidos, y se comunican con el cerebro —que es la computadora de vuelo— para indicar cuál es el estado de “salud” de todos los subsistemas a bordo.

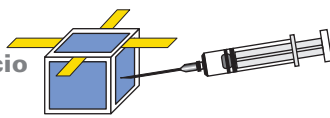
El subsistema de sensores incluye, entre otros, los dispositivos siguientes:

1. **Sensores de temperatura o termómetros:** son elementos electrónicos que miden la temperatura en el satélite. Por una parte, el nanosatélite se enfría por debajo de 0 °C cuando se desplaza en su órbita por la cara oscura de la Tierra; en tanto, se calienta a más de 50 °C cuando se desplaza por la cara iluminada del planeta. Estos cambios de temperatura son críticos, ya que los dispositivos y subsistemas pueden enfriarse o calentarse demasiado y sufrir daños que afecten eventualmente al funcionamiento de todo el sistema. Asimismo, la temperatura al interior del nanosatélite debe mantenerse entre 20 y 30 °C, condición que es monitoreada por los



termómetros que envían la información a la computadora de vuelo para que se registre y se transmita a tierra.

2. **Sensores de posición y orientación:** son giróscopos que desempeñan el papel de brújulas y permiten orientar al nanosatélite a lo largo de su órbita. Estos dispositivos detectan el campo magnético de la Tierra y lo toman como referencia para orientar y dirigir al satélite, de forma que “vea” hacia nuestro planeta y así establezca comunicación con las estaciones terrenas. De esta manera, puede transmitir o recibir información de telemetría y telecomandos, y también se asegura la transmisión de los datos de la misión espacial del nanosatélite.
3. **Sensores de velocidad y aceleración:** son dispositivos que miden la velocidad y aceleración que experimenta el satélite a lo largo de su órbita alrededor de la Tierra. Esta medición aporta datos respecto a la dinámica orbital y determina el tiempo que tarda el satélite en dar una vuelta a la Tierra; a la vez, permite



calcular el tiempo en que el satélite será visible sobre una región del planeta.

4. **Sensores de energía y potencia eléctrica:** son dispositivos que pueden medir los voltajes y las corrientes que se generan mediante las celdas solares y que se almacenan en las baterías. Esto constituye la fuente de energía del nanosatélite. De la misma manera, hay medidores de voltaje y corriente para observar y monitorear los consumos de los diferentes subsistemas del nanosatélite. Estos datos son relevantes porque indican el estado de funcionamiento de todos los subsistemas; su monitoreo y análisis permite detectar problemas y la probabilidad de fallas.

Las señales medidas por los sensores aportan información crítica relativa a la “salud” del satélite. Estas señales se adquieren y procesan gracias al cerebro del sistema (la computadora de vuelo) y a los circuitos electrónicos auxiliares a bordo del nanosatélite. Los datos se convierten en datos digitales con

la ayuda de la computadora y se almacenan en el satélite. La computadora de vuelo registra las condiciones de funcionamiento, las compara con valores de referencia y puede determinar si es normal. Asimismo, los datos vitales se guardan en el subsistema de telemetría y telecomando. Si la computadora encuentra condiciones anormales, puede generar alarmas, controlar o corregir los errores y, en caso necesario, apagar el subsistema que tiene problemas. Los datos se envían a tierra mediante el subsistema de telemetría y telecomando vía el sistema de radio que se comunica con la estación terrena supervisora.

Asistencia “médica” al nanosatélite

Mediante el subsistema de comunicaciones de radio, la computadora de vuelo puede ordenar la transmisión de los datos vitales (temperatura, presión, orientación, carga de baterías, potencias consumidas, etcétera) del satélite hacia la Tierra, siempre y cuando se establezca comunicación con alguna estación terrena que pueda recibir las señales. Una



vez que los datos se reciben en tierra, los ingenieros o técnicos –en el rol de “médicos” de satélites– analizan la información con el objetivo de conocer el estado de “salud” del nanosatélite en el espacio. Con base en los datos vitales, pueden diagnosticar los problemas y emitir “recetas” en forma de medidas preventivas, o eventualmente correctivas, las cuales se transmiten al satélite como instrucciones y órdenes por medio de telecomandos. Dependiendo de las capacidades a bordo, es posible corregir errores y fallas en los subsistemas para que el satélite siga operando y cumpla con su misión espacial.

Celso Gutiérrez Martínez

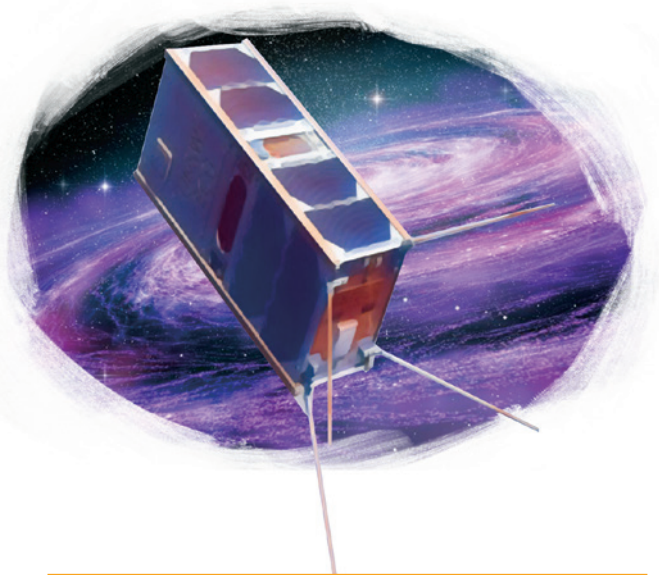
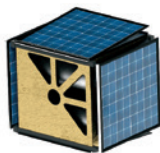
Laboratorio de Comunicaciones de Radiofrecuencia, Fibra Óptica y Sistemas Satelitales, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
cgutz@inaoep.mx

Jacobo Meza Pérez

Laboratorio de Comunicaciones de Radiofrecuencia, Fibra Óptica y Sistemas Satelitales, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
jmeza@inaoep.mx

Alfredo Torres Fórtiz

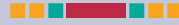
Laboratorio de Comunicaciones de Radiofrecuencia, Fibra Óptica y Sistemas Satelitales, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
afortiz@inaoep.mx



Referencias específicas

- Duarte, C. (2016), “CubeSats: la gran oportunidad para el acceso al espacio”, *Hacia el Espacio*. Disponible en: <<http://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=289>>, consultado el 4 de mayo de 2020.
- Gutiérrez, C. (2017), “Nanosatélites: tecnología espacial al alcance de todos”, *Noche de las Estrellas*. Disponible en: <https://www.nochedelasesrellas.org.mx/docs/Articulos/2017/4_2_Nanosatelites.pdf>, consultado el 4 de mayo de 2020.
- Harris, M. (2013), “Space on \$35 a day. Citizen science satellites allow anyone to run experiments in orbit”, *IEEE Spectrum*, 11(50):20-21.
- La Jornada de Oriente (2016), “*Ulises 1*, el primer nanosatélite mexicano”, *Saberes y Ciencias*, 49(5):19.
- Peck, M. (2011), “Chips in space”, *IEEE Spectrum*, 48(8):42-47.
- Quo (2016), “México lanzará un satélite de 13 cm”, *Quo*, 222: 18-19.
- Smil, V. (2017), “Suptnik at 60”, *IEEE Spectrum*, 10(54):20. Disponible en: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8048831>>, consultado el 4 de mayo de 2020.
- Valdez Alvarado, A. (2015), “Nanosatélites”, *Revista de Información, Tecnología y Sociedad*, 6:7-12.

Alan A. Calderón Velderrain, Miguel A. Alonso Arévalo y Enrique A. Hernández Elías



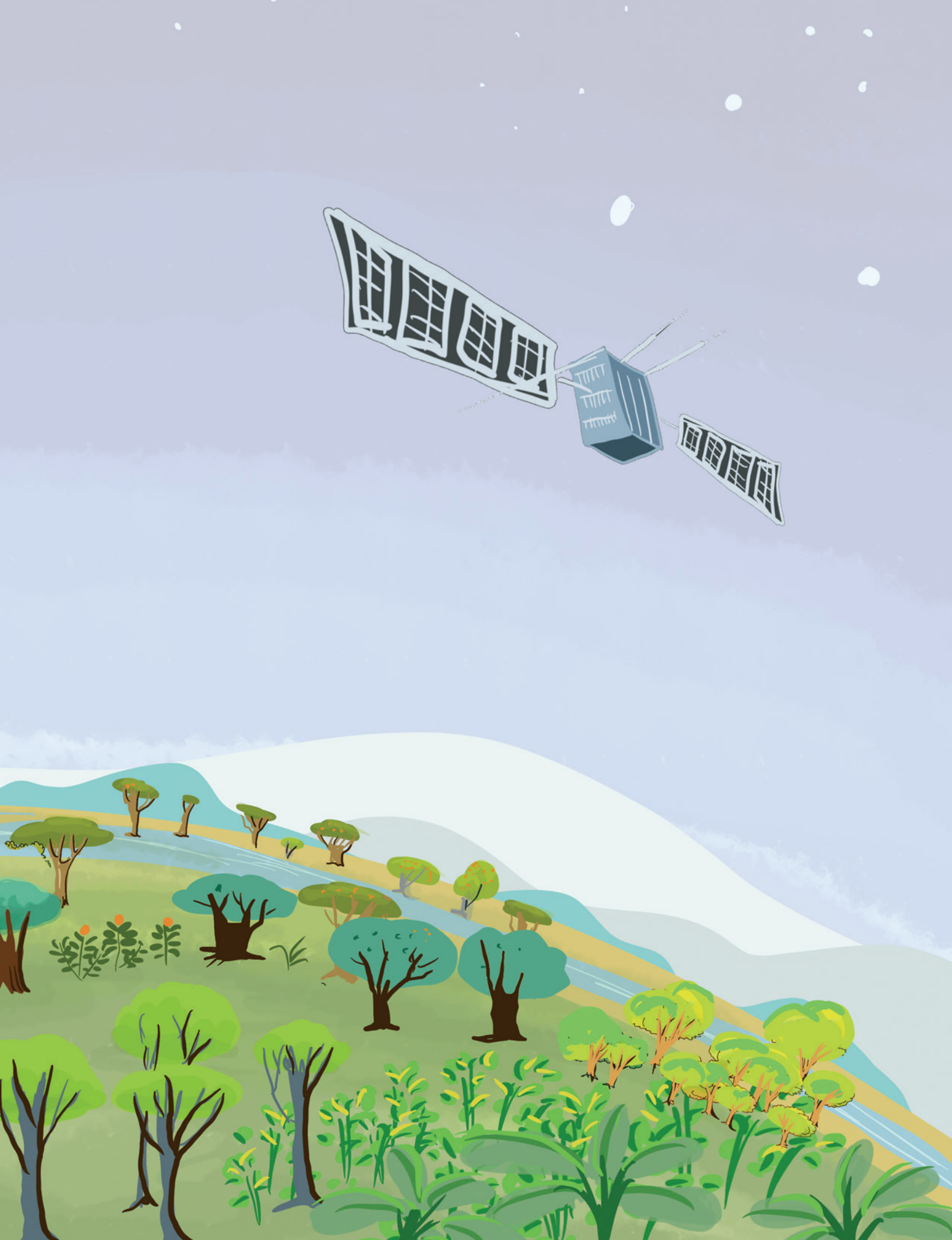
Los satélites te dirán qué tan saludables están las plantas

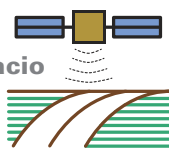
Los sistemas satelitales dan múltiples servicios: predecir el clima, combatir los problemas ambientales, mejorar la productividad agrícola, dar acceso a internet e informar acerca de la salud de la vegetación. Los satélites utilizan dispositivos que les permiten ver desde el espacio la luz que interviene en la fotosíntesis; de esta manera, miden la cantidad de ciertos tipos de luz que la planta absorbe y refleja para saber si está enferma o saludable.

Satélites

En la ciencia y tecnología espacial definimos un satélite como un cuerpo celeste o vehículo espacial (ya sea una luna, planeta o máquina) el cual orbita alrededor de una estrella o un planeta. De manera más común, cuando hablamos de satélites nos referimos a los satélites artificiales; es decir, máquinas que son lanzadas al espacio y que giran alrededor de la Tierra.







Existen distintos criterios para clasificar a los satélites artificiales. Según su funcionalidad, pueden ser:

1. **Satélites de reconocimiento:** son empleados para fines militares; por ejemplo, en espionaje o monitoreo de imágenes de sitios de interés para las agencias de inteligencia.
2. **Satélites de observación terrestre:** son utilizados para fines no militares, como los satélites meteorológicos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de Estados Unidos de América, los cuales transmiten información de las condiciones de temperatura del mar, la tierra, las nubes; también se pueden utilizar para observar la evolución de los huracanes y otros fenómenos.
3. **Satélites astronómicos:** son similares a los satélites de observación terrestre, pero las cámaras y sensores apuntan hacia el espacio exterior. Ayudan a estudiar y descubrir nuevos planetas, estrellas y todo lo que se encuentra fuera de la Tierra.
4. **Satélites de comunicaciones:** son los que utilizamos de manera más directa en nuestra vida cotidiana; por ejemplo, para los servicios de televisión por satélite, cuando vemos un partido de fútbol se que está jugando a miles de kilómetros de donde vivimos.

De igual manera, los satélites se pueden clasificar según su peso:

1. Satélites grandes (más de 1 000 kg).
2. Satélites medianos (entre 500 y 1 000 kg).
3. Minisatélites (entre 100 y 500 kg).
4. Microsatélites (entre 10 y 100 kg).
5. Nanosatélites (entre 1 y 10 kg).
6. Picosatélites (entre 100 g y 1 kg).
7. Femtosatélites (menos de 100 g).

Es importante tener en cuenta que las dimensiones de un satélite no están siempre relacionadas con su peso, pero es una buena aproximación decir que los satélites grandes suelen tener medidas de hasta $3 \times 3 \times 3$ m, mientras que los nanosatélites llegan

a tener tamaños de $10 \times 10 \times 10$ cm. En este caso, el término nanosatélite no implica necesariamente que se utilice nanotecnología ni que tengan dimensiones nanométricas.

Otra clasificación de los satélites es según su órbita. Éstos pueden ser:

1. Satélites de órbita baja terrestre (desde 0 hasta 2 000 km).
2. Satélites de órbita media terrestre (desde 2 000 hasta 35 786 km).
3. Satélites de órbita geoestacionaria (exactamente 35 786 km).
4. Satélites de órbita alta terrestre (mayor a 35 786 km).

Además de la altitud de la órbita, los satélites se pueden clasificar según qué tan circular u ovalada es su trayectoria. Los satélites de órbita baja (LEO) suelen tener órbitas altamente circulares y se desplazan a velocidades de entre 7 y 9 km/s. Este tipo de satélites suele dar la vuelta al planeta cada 90 minutos, lo cual se llama periodo orbital. Por otra parte, los satélites geoestacionarios (GEO) tienen una órbita circular y un periodo orbital de 24 horas; por esta razón, nosotros en la superficie terrestre siempre los vemos como si estuvieran en el mismo sitio, y por eso las antenas de televisión satelital siempre apuntan en la misma dirección.

Los satélites empleados en la actualidad para medir la salud de la vegetación suelen estar en órbitas bajas. Esto ayuda a disminuir significativamente los costos de lanzamiento y del sistema óptico, debido a que hay una menor distancia entre el satélite y la superficie de la Tierra. Un ejemplo es el satélite Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea, el cual se encuentra en una órbita baja (a 785 km sobre el nivel del mar), pesa cerca de 1 000 kg y tiene dimensiones similares a las de un automóvil compacto ($3.4 \times 1.8 \times 2.35$ m).

Percepción remota

La percepción remota, también conocida como teledetección, es el nombre de la ciencia que se de-

Recuadro 1. El espectro electromagnético

Actualmente los satélites de percepción remota llevan a bordo radiómetros que miden la radiación producida por las ondas electromagnéticas reflejadas o emitidas por la superficie de la Tierra. A estas ondas se les llama electromagnéticas porque consisten en ondas eléctricas y magnéticas combinadas.

La unidad fundamental para medir un fenómeno electromagnético es el fotón; ésta es la menor cantidad de energía electromagnética para un tipo de onda particular. Los fotones no tienen masa y se mueven a la velocidad de la luz en forma de ondas, de manera muy parecida a las olas que se propagan en los océanos. A la distancia que hay entre dos crestas

sucesivas de una onda electromagnética particular se le denomina longitud de onda. Al conjunto total de ondas electromagnéticas se le conoce como espectro electromagnético, el cual se divide en regiones cuyo nombre describe la naturaleza de las ondas, como se ilustra en la Figura 1.

En el espectro electromagnético, la zona correspondiente a la luz que los humanos podemos ver es bastante pequeña y lo que percibimos como un color es en realidad un tipo de radiación con una longitud de onda correspondiente. Por ejemplo, las tonalidades de verde que vemos corresponden a longitudes de onda que oscilan en el rango de 500-565 nanómetros.

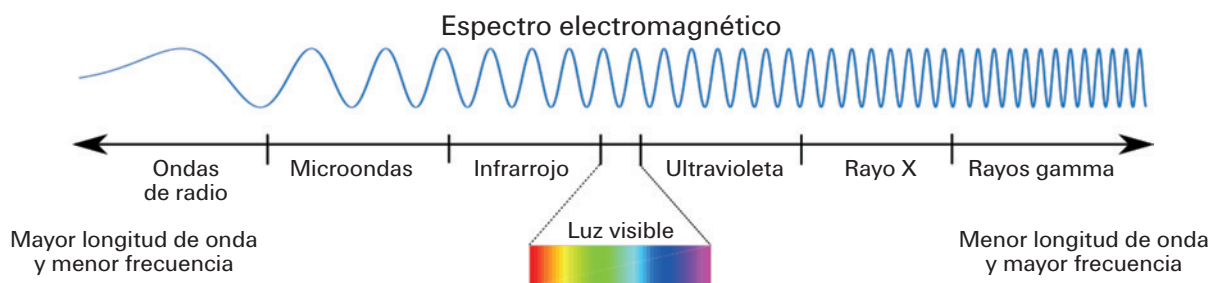


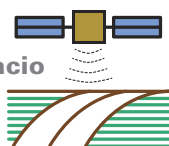
Figura 1. Espectro electromagnético.

dica a identificar, observar y medir los objetos sin estar en contacto físico con ellos. Esta actividad tuvo sus orígenes hace casi 200 años, cuando se inventó la cámara fotográfica. En aquella época, a mediados del siglo XIX, en un globo aerostático se fijaba una cámara fotográfica que apuntaba hacia el suelo y luego se usaban las fotografías obtenidas para hacer mapas. A principios del siglo XX, las cámaras montadas en aviones proporcionaron vistas de áreas de superficie bastante grandes, lo cual resultó de gran utilidad especialmente en aplicaciones de reconocimiento aéreo. Desde entonces hasta inicios de la década de 1960, la fotografía aérea siguió siendo la única herramienta utilizada para representar la superficie de la Tierra. Fue en ese tiempo que comenzó la era espacial y la percepción remota tuvo una nueva faceta de desarrollo.

■ Medir la salud de la vegetación

■ Estamos acostumbrados a ignorar todo el tiempo a las plantas y los árboles que nos rodean, aun cuando –irónicamente– casi todos los aspectos de nuestra vida dependen de ellos. Las plantas y los árboles nos proporcionan alimentos y medicamentos, nos dan materiales para construir viviendas, nos sirven para fabricar las prendas que vestimos y, por si fuera poco, absorben el nocivo dióxido de carbono que generamos y liberan el oxígeno que respiramos.

Por lo anterior, cualquier cambio drástico en la vegetación que nos rodea tiene un impacto directo en nuestra salud, en el ambiente y hasta en la economía. Un ejemplo es la contingencia ambiental provocada por los incendios forestales y la contaminación en la Zona Metropolitana del Valle de México durante mayo de 2019. Conscientes de esta



situación, durante la década de 1970 los científicos comenzaron a estudiar, mediante las primeras imágenes obtenidas desde el espacio, el ciclo de vida de las plantas para hacer un mapa de la densidad de la vegetación verde sobre la Tierra.

Como mencionamos en el Recuadro 1, muchos colores diferentes conforman la luz solar visible. Al medir la luz visible e infrarroja que es reflejada por la superficie de la Tierra es posible conocer la cantidad y el estado de la vegetación. El algoritmo utilizado para determinar la concentración y el vigor de las plantas se conoce como índice de vegetación, el cual se obtiene al aplicar una fórmula matemática predeterminada a la intensidad medida en dos o más longitudes de onda.

Cuando la luz solar incide sobre la superficie terrestre, cada tipo de material absorbe ciertas longitudes de onda y refleja otras; dicho fenómeno se llama firma espectral. Este principio es el que se utiliza para determinar la cantidad de plantas verdes en un área sobre la superficie de la Tierra, a partir de la idea que se ilustra en la Figura 2. El pigmento en las hojas de las plantas (la clorofila) absorbe la luz roja y azul para su uso en el proceso de conversión de la luz a materia orgánica, mejor conocido como foto-

síntesis. De manera contraria, las hojas de las plantas reflejan fuertemente la luz del infrarrojo cercano y también el verde. Si pudiéramos ver el infrarrojo con nuestros ojos, las plantas en su mayoría serían color “infrarrojo” en lugar de verde. Cuantas más hojas tiene una planta, más se reflejan y absorben estas longitudes de onda, respectivamente, lo cual facilita la detección a bordo de un satélite a cientos de kilómetros de altura. La firma espectral para una planta saludable también se ilustra en la Figura 2.

Al dispositivo que utilizan los satélites para medir la radiación en el espectro visible se le conoce como cámara multispectral, la cual permite generar imágenes de los objetos en función de la longitud de onda que están reflejando o emitiendo. Por ejemplo, una cámara multispectral de cuatro bandas (véase el Recuadro 2), en lugar de proporcionar una sola imagen, como una cámara tradicional, va a obtener cuatro imágenes simultáneas, cada una correspondiente a un color o longitud de onda diferente. La imagen multispectral resultante está formada por varias capas, y cada una de ellas corresponde a un color (véase la parte inferior de la Figura 3). En la imagen

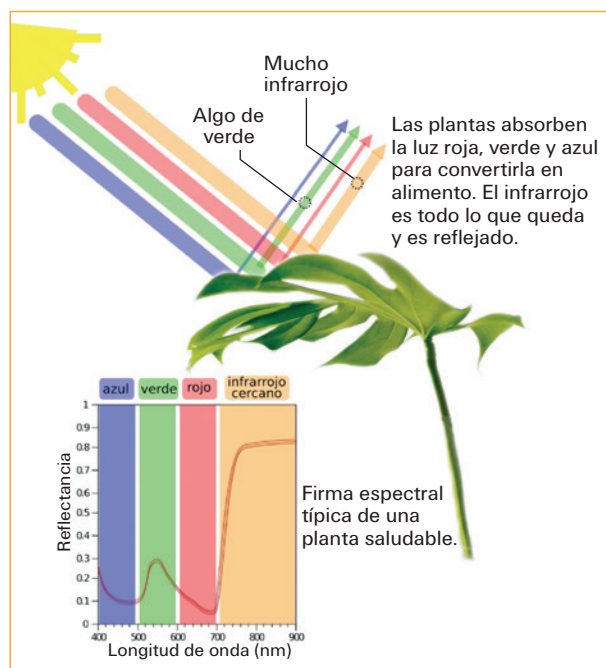


Figura 2. Firma espectral de las plantas verdes.

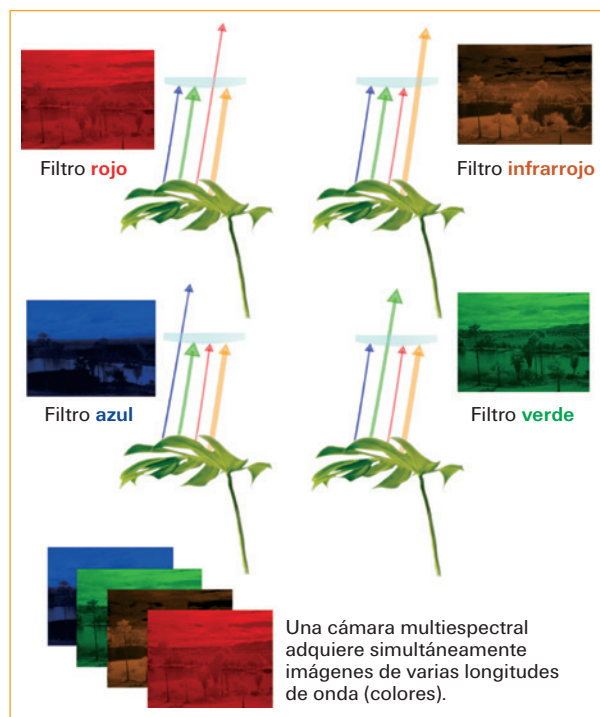


Figura 3. Una cámara multispectral adquiere de manera simultánea imágenes de varias longitudes de onda.

resultante, el valor de cada píxel indica la intensidad de dicho color que tiene el objeto analizado.

Índice NDVI

Mencionamos que el índice de vegetación es una fórmula matemática que utiliza la intensidad reflejada en varias longitudes de onda para estimar el estado de salud de las plantas. El índice más utilizado es el llamado de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés). La idea de este índice se origina en la firma espectral de las plantas. El NDVI varía de -1 a 1 y se calcula a partir de la luz roja y del infrarrojo cercano reflejado por las plantas. Su principio es sencillo: la vegetación saludable absorbe la mayor parte de la luz roja que recibe y, al mismo tiempo, refleja la mayor parte del infrarrojo. Si la vegetación se encuentra poco saludable o es escasa, se refleja más luz roja y menos luz infrarroja. El NDVI

se calcula para cada píxel de una imagen mediante la siguiente fórmula:

$$Píxel_{NDVI} = \frac{Píxel_{Infrarrojo} - Píxel_{Rojo}}{Píxel_{Infrarrojo} + Píxel_{Rojo}}$$

La Figura 4 presenta un ejemplo de cómo funciona el NDVI. La imagen de la izquierda ilustra una escena que incluye plantas, agua, suelo y nubes. La imagen de la derecha es el correspondiente NDVI. Podemos ver que en las zonas con plantas verdes el NDVI toma valores cercanos a 1 ; típicamente las plantas saludables tienen un NDVI entre 0.2 y 0.9 , mientras que los troncos de los árboles, el suelo y las rocas tienen un NDVI cercano a 0 . Las zonas que absorben el infrarrojo, como ciertos tipos de nubes y el agua, toman valores negativos.

En el caso de las imágenes multiespectrales satelitales se usa exactamente el mismo principio. La imagen de México en el lado izquierdo de la Figura 5

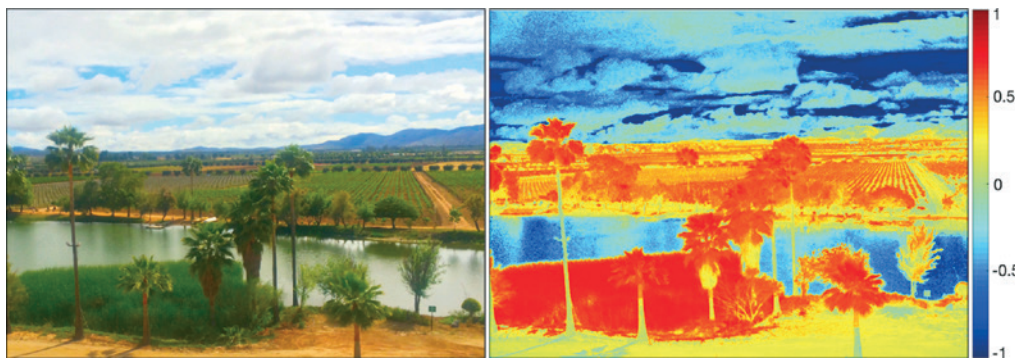


Figura 4. Imagen multiespectral de un paisaje.

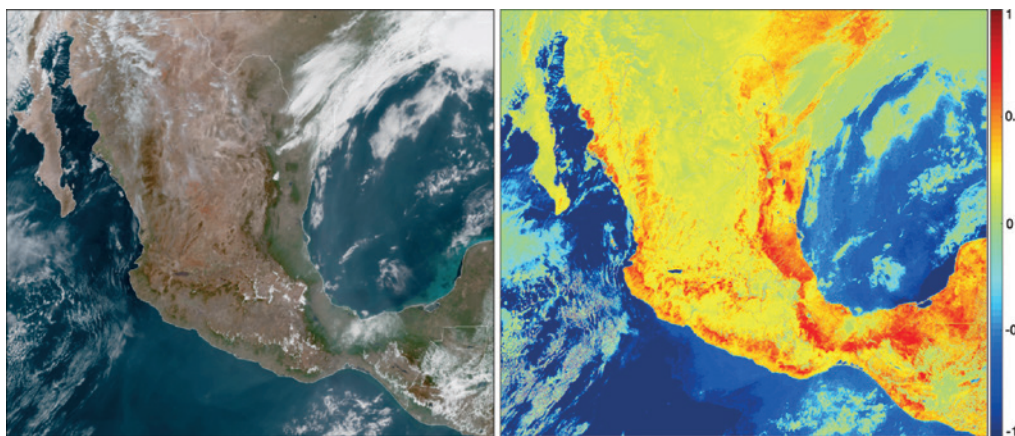
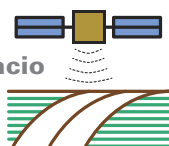


Figura 5. Imagen satelital multiespectral. Cortesía del programa GOES de la NOAA.



Recuadro 2. Bandas espectrales

En el contexto de la teledetección, una banda espectral puede ser considerada como una especie de ventana que únicamente permite observar una zona particular del espectro electromagnético. De manera un poco más específica, una banda espectral se refiere a un rango limitado de longitudes de onda dentro del espectro electromagnético que los sensores de una cámara multispectral están configurados para detectar. La Figura 6 muestra un ejemplo en el que el espectro visible y el infrarrojo se dividen en cuatro bandas espectrales que básicamente corresponden a lo que percibimos como los colores azul, verde y rojo, así como una parte del infrarrojo cercano. Idealmente, la respuesta espectral dentro de una banda de interés debe ser 1; es decir, debe dejar pasar toda la luz correspondiente a dicha región del espectro electromagnético. En cambio, debe ser 0 fuera de la banda espectral; es decir, bloquear toda la luz fuera de la zona de interés.

Es muy útil poder observar lo que sucede a través de una banda espectral, ya que nos permite analizar mejor muchos fenómenos sin tener la distracción de lo que sucede en otras bandas espectrales. Por ejemplo, la banda correspondiente al color azul se utiliza para el mapeo de aguas costeras, la discriminación del tipo de suelo y la clasificación forestal. La banda correspondiente al verde permite clasificar distintos tipos de vegetación, así como identificar características de objetos construidos por el ser humano, como edificios o carreteras. La banda correspondiente al rojo permite estimar la salud de las plantas, así como identificarlas; también contribuye a identificar algunas características de los objetos construidos por el ser humano. La banda correspondiente al infrarrojo cercano permite medir la humedad del suelo y es muy útil para la discriminación de agua y tierra.

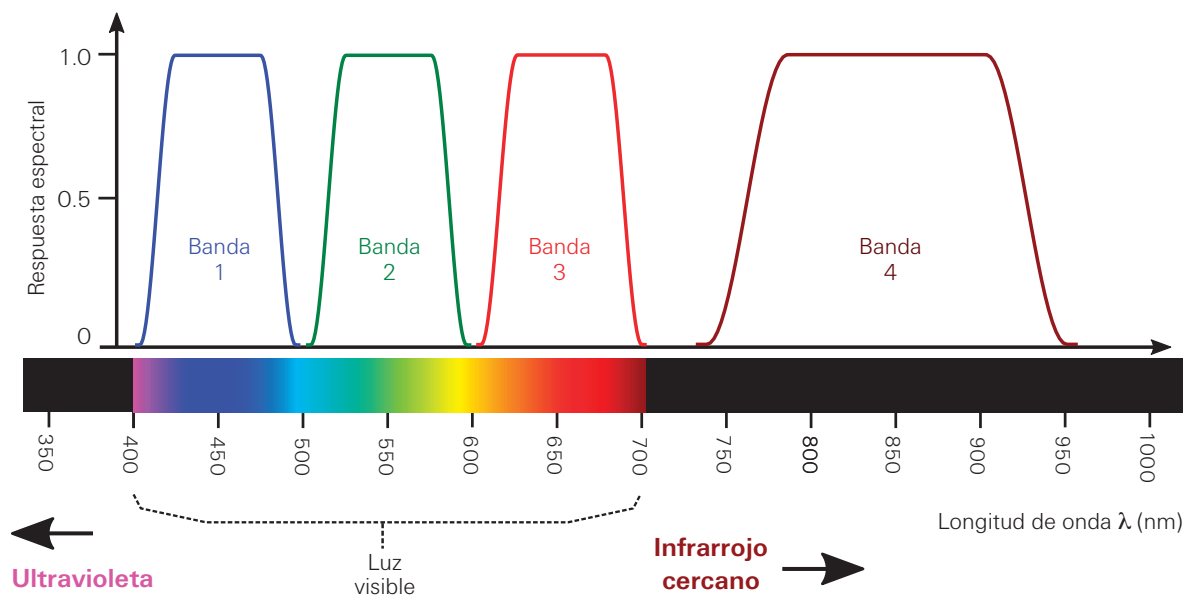


Figura 6. División de cuatro bandas en el espectro visible y el infrarrojo.

fue tomada el 4 de abril de 2019. Podemos ver cómo la zona litoral del Golfo de México y casi toda la zona del Pacífico tienen una abundante vegetación, mientras que la zona del Altiplano norte y la Península de Baja California presentan mucho menor densidad de plantas.

Como mencionamos, el uso de cámaras multispectrales a bordo de los satélites nos ayuda a estimar la salud de las plantas. Además, existen muchas otras aplicaciones para estos dispositivos; por ejemplo, el mapeo de aguas costeras, la clasificación forestal, la identificación de edificios y zonas urbanas,

la medición de la humedad en el suelo, la predicción de huracanes, etcétera. No obstante, por otra parte, la basura espacial aumenta día con día, por lo que es necesario contar con un protocolo para desorbitar (quitar de su órbita) a los satélites que ya dejaron de funcionar.

Algunos de los avances que se esperan en este tipo de tecnologías serán las cámaras de mayor resolución que permitan distinguir objetos más pequeños. También habrá un incremento en el número de bandas espectrales para generar más datos de utilidad. Actualmente México no cuenta con satélites propios para estos fines; sin embargo, se compran imágenes multispectrales del territorio nacional a empresas extranjeras que cuentan con sus propios satélites.

Alan A. Calderón Velderrain

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

acalderon@cicese.edu.mx

Miguel A. Alonso Arévalo

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

aalonso@cicese.edu.mx

Enrique A. Hernández Elías

ThumbSat México, S. A. de C. V.

antonio@thumbsat.com



Lecturas recomendadas

ESA (2020), *ESA Kids*. Disponible en: <<https://www.esa.int/kids/es/Aprende>>, consultado el 5 de mayo de 2020.

ESA (2020), *European Space Agency* (canal de YouTube). Disponible en: <<https://www.youtube.com/user/ESA>>, consultado el 5 de mayo de 2020.

NASA (2020), *NASA* (canal de YouTube). Disponible en: <<https://www.youtube.com/user/NASAtlevision>>, consultado el 5 de mayo de 2020.

NASA (2020), *Space Place*. Disponible en: <<https://spaceplace.nasa.gov/sp/>>, consultado el 5 de mayo de 2020.

Blanca Mendoza y Marni Pazos



El latido de la Tierra: la resonancia Schumann

En nuestro planeta se presentan naturalmente oscilaciones cuyo tamaño es comparable con el perímetro terrestre, llamadas resonancias Schumann. Éstas son provocadas por la actividad eléctrica de la atmósfera. Sus variaciones nos permiten monitorear el clima y la actividad del Sol. Recientemente se ha sugerido que también pueden estar asociadas a los sismos y afectar a la salud humana.

Frecuentemente cuando llueve vemos relámpagos, los cuales son manifestaciones de la actividad eléctrica en nuestra atmósfera. En cualquier momento, planetariamente ocurren cerca de 2000 tormentas eléctricas que producen aproximadamente 50 relámpagos cada segundo. Las regiones que más contribuyen a este fenómeno se encuentran en las partes tropicales de América, África y Asia.

La atmósfera terrestre posee una capa llena de partículas cargadas (es decir que está ionizada); dicha capa inicia aproximadamente a 90 km de altura sobre la superficie terrestre y se llama ionosfera. Entre la superficie de nuestro planeta y la parte baja de la ionosfera, se crea una cavidad por la cual viajan las ondas electromagnéticas generadas por los relámpagos. Esta región actúa como un resonador para ondas cuya longitud es comparable al radio de la Tierra, en la banda conocida como frecuencias extremadamente bajas. Un resonador es un sistema que oscila naturalmente en frecuencias llamadas resonantes.

A estas resonancias, generadas por la actividad eléctrica global, se les conoce como resonancia Schumann (RS). La idea de que ocurren resonancias electromagnéticas globales de una fuente natural ya había sido presentada por Nikola Tesla en 1905, pero el primer modelo teórico de las resonancias





globales fue desarrollado por Winfried Otto Schumann en 1952. Las primeras mediciones de ellas fueron logradas por Martin Balser y Charles Wagner en 1960.

Las observaciones indican que la frecuencia fundamental de la resonancia Schumann tiene una longitud de onda cercana al perímetro de la Tierra, y sus armónicos tienen longitudes de onda que son submúltiplos de la longitud de onda fundamental (véase la Figura 1). En la Tabla 1 presentamos los valores de las frecuencias en Hertz (Hz) y de las longitudes de onda en kilómetros (km).

Como la resonancia Schumann se produce entre la parte baja de la ionosfera y la superficie terrestre, los cambios que ocurren en la ionosfera o dentro de la cavidad alteran las frecuencias y amplitudes. A continuación, abordamos algunos fenómenos que modifican los parámetros de la resonancia Schumann.

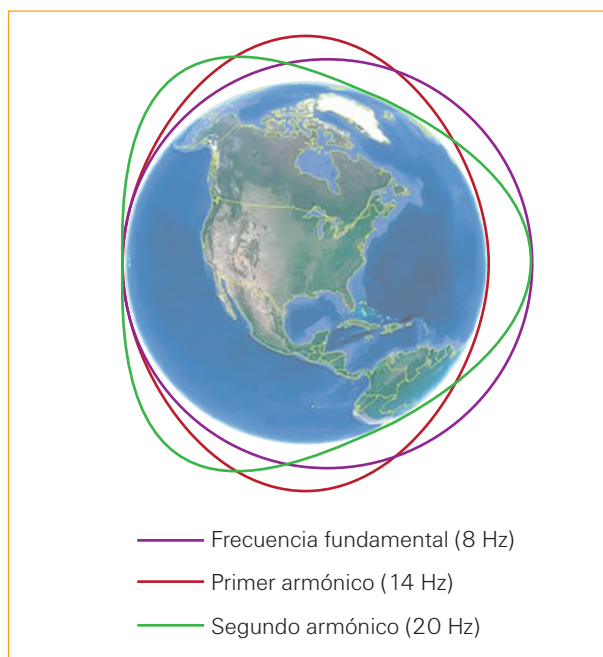


Figura 1. Frecuencia fundamental y los dos primeros armónicos de la resonancia Schumann.

Tabla 1. Frecuencias y longitudes de onda observadas de la frecuencia fundamental y los primeros tres armónicos de la resonancia Schumann.

Armónico	Frecuencia aproximada (Hz)	Longitud de onda (km)
Frecuencia fundamental	8	37 500
Primero	14	21 428
Segundo	20	15 000
Tercero	26	11 538

¿Puede la actividad humana afectar a la resonancia Schumann?

Existen señales producidas por la actividad humana que pueden interferir en la banda de la resonancia Schumann: desde el suministro de energía eléctrica, hasta los pasos de una persona al caminar. Uno de los armónicos de la resonancia Schumann se encuentra aproximadamente en 60 Hz, y las redes de transmisión eléctrica en las regiones en donde se emplea corriente alterna funcionan en esa frecuencia. Por tanto, las líneas eléctricas son una fuente de perturbación. Por ello, para evitar las señales inducidas por vibraciones en el terreno e incluso las producidas por el viento, los sensores que se emplean

para medir la resonancia Schumann se colocan bajo tierra.

La temperatura global también la perturba

Se ha determinado que entre mayor es la temperatura atmosférica hay más tormentas eléctricas y, por tanto, más relámpagos. Entonces, en el contexto del cambio climático, en el que tenemos una temperatura cada vez mayor, habrá más relámpagos. Por ello, las perturbaciones de la resonancia Schumann sirven para monitorear la temperatura terrestre.

¿Qué hay de la actividad solar?

La actividad solar envía sus productos hacia el medio interplanetario y éstos impactan a la Tierra. Entre dichos productos están unas partículas cargadas muy energéticas, que penetran la atmósfera terrestre, modifican a la ionosfera y, en consecuencia, a la resonancia Schumann. También hay emisiones electromagnéticas o de partículas cargadas muy energéticas que provienen desde fuera del Sistema Solar y alteran a la ionosfera y a la resonancia Schumann. Hay numerosos trabajos que prueban la existencia de la relación entre la actividad solar y tales perturbaciones.

Los sismos y la resonancia Schumann

Es posible que haya una emisión electromagnética en el rango de las frecuencias extremadamente bajas, que proviene de la región sísmica y que genera anomalías en la ionosfera. A su vez, esto perturba la resonancia Schumann. Sin embargo, la relación entre los sismos y estas perturbaciones todavía está en estudio y no hay una conclusión al respecto.

¿Los seres vivos pueden ser afectados?

El cerebro humano genera ondas electromagnéticas cuyas frecuencias están entre 1 y 40 Hz; en particular, a las ondas cuyas frecuencias van entre 8 y 12 Hz se les llama ondas alfa, y a las que van entre

14 y 21 Hz se les llama ondas beta. Estas ondas forman parte de los ritmos biológicos. Es claro que el rango de estas ondas cerebrales está dentro del rango de la resonancia Schumann, por lo que es muy tentador pensar que las perturbaciones en la resonancia Schumann pueden afectar a nuestras ondas cerebrales. Sin embargo, este campo se está investigando y no hay conclusiones todavía.

La resonancia Schumann en otros cuerpos del Sistema Solar

Vimos que en nuestro planeta la presencia de una atmósfera con una parte ionizada, la ocurrencia de electricidad atmosférica y la existencia de una frontera sólida (la superficie terrestre) son condiciones que propician la generación de la resonancia Schumann. Es natural preguntarnos si en otros cuerpos del Sistema Solar se podrían reunir estas condiciones, pues entonces allí también existiría la resonancia Schumann.

Además de la Tierra, hay varios cuerpos que son candidatos, ya que cuentan con atmósfera y una parte de ella está ionizada. Además, se han detectado algunas otras características que producirían la resonancia Schumann. Daremos algunos ejemplos.

Venus

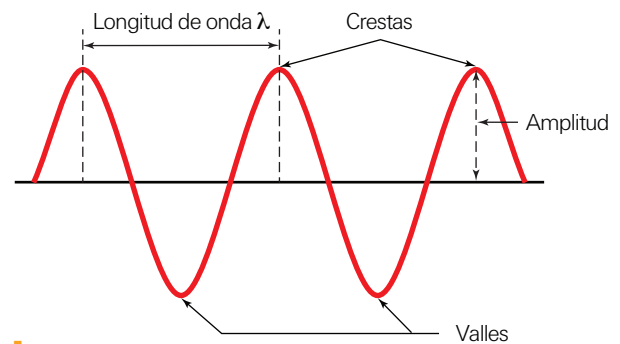
Hay evidencia de relámpagos proporcionada por algunas de las naves espaciales *Venera* que fueron lanzadas por la actual Rusia y que detectaron actividad eléctrica cuando llegaron a Venus entre 1982 y 1984. Entonces, ya que tiene una superficie sólida, en este planeta podría generarse resonancia Schumann, pero todavía no hay observaciones que comprueben esto.

Marte

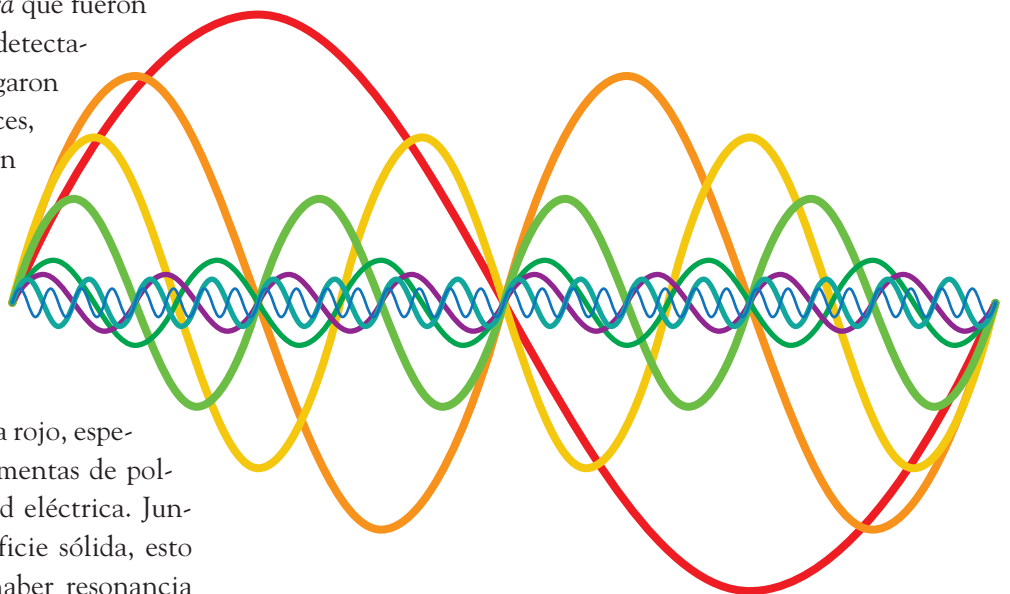
El polvo en la atmósfera del planeta rojo, especialmente durante las famosas tormentas de polvo marcianas, propicia la actividad eléctrica. Junto con la existencia de una superficie sólida, esto indicaría que en Marte debería haber resonancia

Recuadro 1. Parámetros de una onda

Una onda tiene varios parámetros que la caracterizan: su longitud de onda (λ), su amplitud (A) y su periodo (T). La longitud de onda es la distancia entre el mismo punto de dos oscilaciones consecutivas, en particular entre cresta y cresta o entre valle y valle. La amplitud es la distancia vertical entre la cresta y el punto medio de la onda. El periodo es el tiempo que tarda la onda en recorrer una distancia de una longitud de onda. La frecuencia de la onda es el número de veces que se repite la onda por unidad de tiempo y, por tanto, es el inverso del periodo.



Parámetros de una onda.





Schumann. Pero no hay todavía observaciones que lo corroboren.

Júpiter y Saturno

En los dos planetas más grandes del Sistema Solar se ha detectado actividad eléctrica atmosférica: en Júpiter, principalmente por la nave *Galileo*, que llegó al planeta en 1995; así mismo, en Saturno, principalmente por la nave *Cassini* y su sonda *Huygens*, que llegaron en 2004. Sin embargo, éstos son planetas gaseosos, en los que no existe una frontera sólida y el concepto de resonador no es claro. No hay todavía evidencia de que la resonancia Schumann pueda existir en ellos. Asimismo, suponemos que en Urano y Neptuno podría suceder algo similar, pero todavía no hay observaciones que nos guíen.

Titán

Los datos de la sonda *Huygens*, que en 2005 aterrizó en la superficie de la luna más grande de Saturno,

muestran la existencia de resonancia Schumann. Hay que puntualizar que sólo en la Tierra y en Titán se ha medido resonancia Schumann. Sin embargo, los datos de esta sonda parecen indicar que no hay actividad eléctrica atmosférica. Entonces, se propone que la resonancia Schumann observada pudiera generarse por corrientes eléctricas en la ionosfera de Titán inducidas por el campo magnético de Saturno, aunadas a la existencia de una superficie sólida.

Por todo lo anterior, concluimos que la resonancia Schumann permite estudiar no sólo otros fenómenos atmosféricos, sino también geofísicos y espaciales, y tal vez hasta biológicos.

La antena Schumann de México

En México tenemos una estación que empezó sus operaciones en 2013 y está especialmente diseñada para medir la resonancia Schumann. Se encuentra



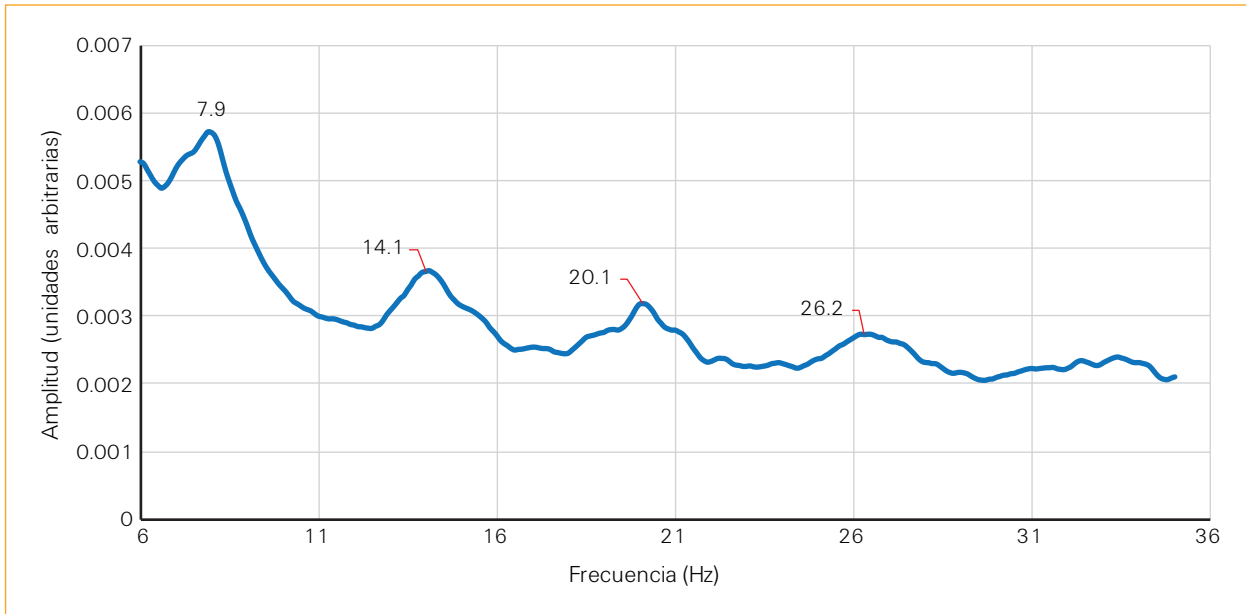


Figura 2. Observación de la frecuencia fundamental y los tres primeros armónicos de la resonancia Schumann medidos por la estación de Coeneo, Michoacán.

en Coeneo, Michoacán, y pertenece a la Universidad Nacional Autónoma de México; el equipo de la estación forma parte de los instrumentos del Laboratorio Nacional de Clima Espacial. La estación es única en la región de México, Centroamérica, el Caribe y la porción norte de Sudamérica. Se compone de dos antenas horizontales –perpendiculares entre sí– que detectan variaciones magnéticas, además de una antena vertical que detecta variaciones eléctricas. Un ejemplo de las mediciones que hemos logrado realizar se observa en la Figura 2.

Blanca Mendoza

Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México.
blanca@atmosfera.unam.mx

Marni Pazos

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México.
marni@unam.mx

Agradecimientos

Este artículo tuvo el apoyo del proyecto DGAPA-PAPIIT-IN100618.

Lecturas recomendadas

- Besser, B. P. (2007), “Synopsis of the historical development of Schumann resonances”, *Radio Sci.*, 42(2). Disponible en: <doi.org/10.1029/2006RS003495>, consultado el 7 de mayo de 2020.
- Nickolaenko, A. (2016), *Schumann Resonance for Tyros*, Japón, Springer Verlag.
- Pazos, M. et al. (2019), “Analysis of the effects of geomagnetic storms in the Schumann Resonance station data in Mexico”, *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 193:105091. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105091>, consultado el 7 de mayo de 2020.
- Price, C. (2016), “ELF Electromagnetic Waves from Lightning: The Schumann Resonances”, *Atmosphere*, 7(9):116. Disponible en: <doi.org/10.3390/atmos7090116>, consultado el 7 de mayo de 2020.
- Sierra, P., S. Vázquez, E. Andrade, B. Mendoza y D. Rodríguez-Orsorio (2014), “Development of a Schumann Resonance Station in Mexico: Preliminary Measurements”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 58(3):112-119.

Luis Xavier González Méndez y Ernesto Ortiz Fragoso

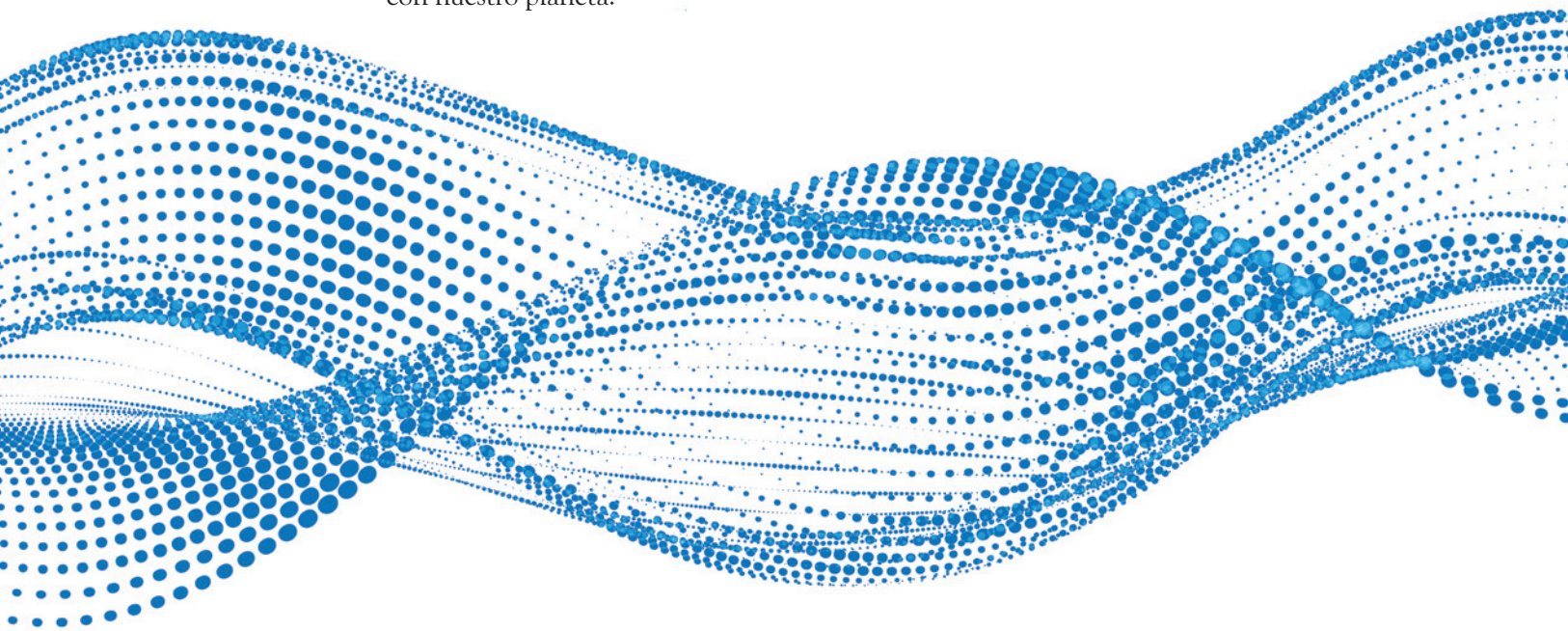


Los rayos cósmicos: una extraordinaria aventura espacial

Los rayos cósmicos son partículas que constantemente bombardean la parte superior de nuestra atmósfera. Su principal característica es el amplio rango de energía que cubren. Varias investigaciones sugieren que esta radiación puede afectar el clima y la biota. Actualmente, el origen de los rayos cósmicos sigue siendo objeto de investigación y se desarrollan diferentes experimentos y estudios para dilucidarlo. En México tenemos varios observatorios dedicados a su estudio.

Origen, composición y energía

La Tierra está en constante interacción con diferentes tipos de radiaciones que provienen del espacio exterior; por ejemplo, luz visible, ondas de radio, rayos ultravioleta, rayos X, rayos gama y rayos cósmicos. Estos últimos son partículas que bombardean la alta atmósfera de la Tierra por todas direcciones y pueden alcanzar las energías más altas del universo. Su estudio trata de explicar interrogantes como su origen, composición, mecanismos de aceleración y su interacción con nuestro planeta.



En 1912 el físico austriaco Víctor Hess descubrió los rayos cósmicos tras realizar una serie de ascensos en globo aerostático para estudiar la descarga que experimentaban unas delgadas placas de metal dentro de un **electroscopio**. Entonces se creía que los materiales radiactivos de las rocas emitían radiación ionizante que generaba dicha descarga; por ende, al alejarse de la superficie terrestre, esta radiación debía disminuir. Pero con cada ascenso Hess observó que los electroscopios tendían a descargarse en mayor medida conforme el globo incrementaba su altura. Esto lo llevó a concluir que la causa de la descarga de los electroscopios era una radiación de origen extraterrestre. El descubrimiento de la radiación cósmica lo hizo ganador del premio Nobel en 1936.

Los rayos cósmicos se catalogan en función de su energía: ultra alta energía ($\geq 10^{18}$ eV), alta energía ($\geq 10^{10}$ eV) y baja energía ($< 10^9$ eV). Con base en los últimos estudios, se sabe que los rayos cósmicos de ultra alta energía provienen de fuera de la Vía Láctea y son acelerados dentro del núcleo de una clase de galaxias denominadas activas (véase la Figura 1). Este tipo de galaxias tiene en su centro un hoyo negro supermasivo (millones de veces la masa del Sol) que acelera la materia cercana y provoca interacciones altamente energéticas, las cuales pueden producir rayos cósmicos que salen de la influencia del hoyo negro supermasivo y llegan a alcanzar a nuestra galaxia y al Sistema Solar.

Por otra parte, los rayos cósmicos de alta energía se producen dentro de la Vía Láctea, en eventos catastróficos llamados supernovas, en los que las estrellas masivas (más de cinco veces la masa del Sol) explotan y producen una onda de choque que se propaga a altas velocidades; esta onda de choque acelera a las partículas que encuentra a su paso (véase la Figura 1).

Por último, los rayos cósmicos de baja energía se producen por los diferentes fenómenos que ocurren en la atmósfera del Sol, como el viento solar, las fulguraciones y las

Electroscopio

Instrumento que permite cargar eléctricamente dos láminas delgadas, aisladas herméticamente, las cuales experimentan una fuerza de repulsión por poseer la misma carga.

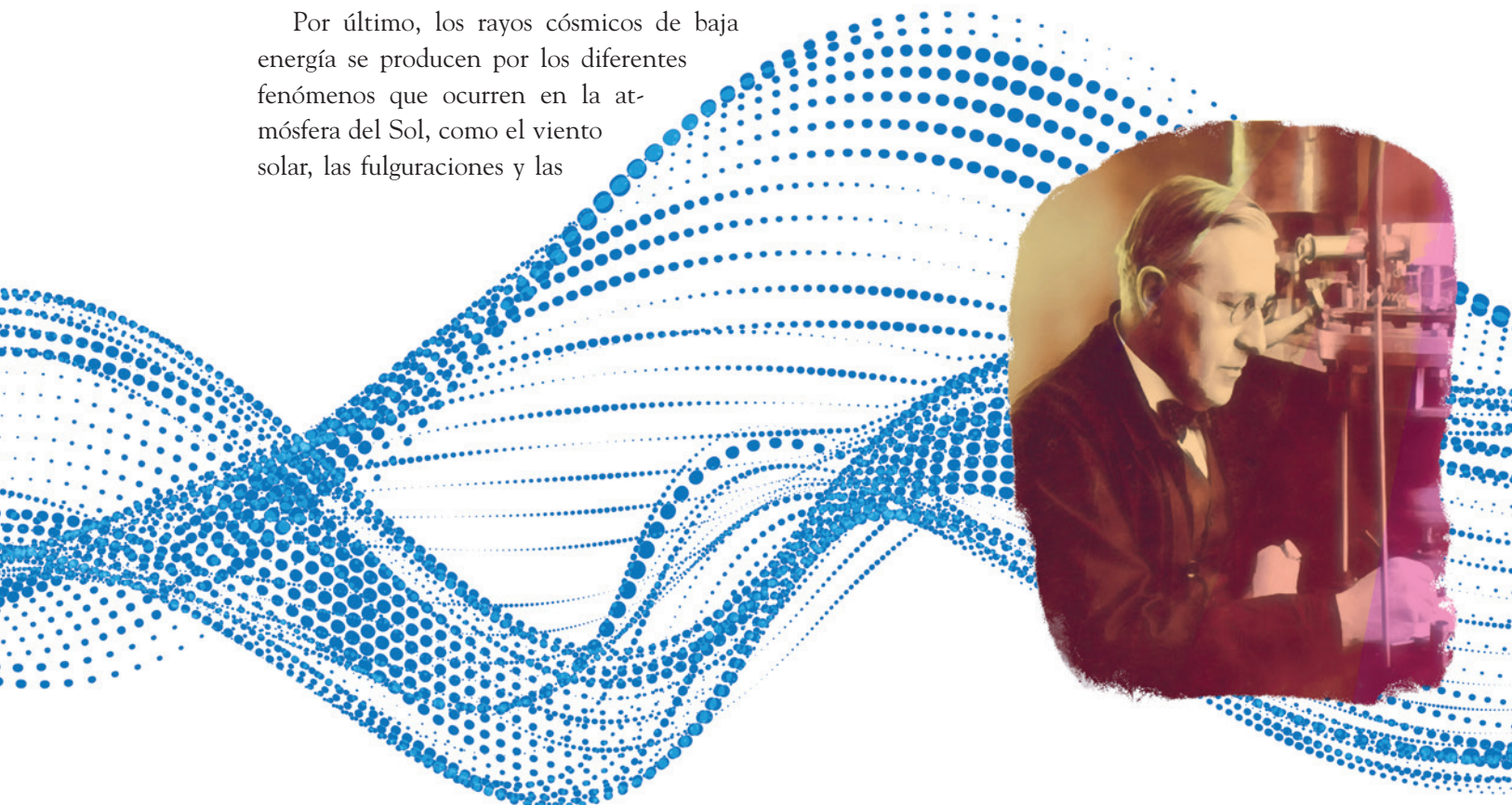




Figura 1. De izquierda a derecha, fuentes de rayos cósmicos de ultra alta energía (galaxia activa), de alta energía (supernova) y de baja energía (Sol). Imágenes tomadas de NASA, ESA y SDO, respectivamente.

eyecciones de masa coronal. Debido a la cercanía con nuestra estrella (unos 150 millones de km), los rayos cósmicos de alta energía son modulados por las emisiones solares, lo que provoca que los rayos cósmicos de baja energía dominen el flujo de partículas registradas que llegan a la atmósfera.

Gracias a los diferentes instrumentos diseñados para detectar estas partículas, sabemos que el flujo de rayos cósmicos de baja energía es de unas 10 000 partículas por m^2 por segundo. El flujo de los rayos cósmicos con energías mayores se reduce considerablemente; de este modo, para energías de 10^{15} eV, se detecta una partícula por m^2 por año. Para los rayos cósmicos de ultra alta energía, el flujo es de una partícula por km^2 por año (Otaola y Valdés-Galicia, 1992).

La composición de los rayos cósmicos se determina en función de la energía considerada y representa las condiciones físicas del medio en el que se produjeron y desde donde se propagaron. En promedio, se puede considerar que el flujo de rayos cósmicos está compuesto por 89% de protones, 10% de núcleos de helio y 1% de núcleos de otros elementos de la tabla periódica más pesados, electrones, neutrones y antimateria.

Isotrópica

Propiedad física que no presenta diferencias significativas con la dirección. Para los rayos cósmicos, implica que su flujo es constante en cualquier dirección.

Los rayos cósmicos en la atmósfera y su detección

Debido a que los rayos cósmicos son, en su inmensa mayoría, partículas cargadas, se ven afectados en su camino hacia la atmósfera terrestre por el campo geomagnético. De este modo, los rayos cósmicos me-

nos energéticos son desviados, siguiendo una espiral, por las primeras líneas del campo magnético terrestre. Por lo tanto, sólo las partículas más energéticas pueden atravesar las líneas del campo geomagnético e ingresar por las zonas ecuatoriales de la Tierra.

Los rayos cósmicos primarios que ingresan a la alta atmósfera terrestre generan interacciones en función de la energía original de la partícula incidente. Existen tres tipos de interacción: la excitación, la ionización y el rompimiento del núcleo atmosférico. Cuando los rayos cósmicos primarios de baja energía, emitidos por el Sol, pasan lo suficiente cerca de los átomos en la atmósfera superior, les transfieren energía y los excitan, lo que provoca que los átomos excitados emitan luz con distintas frecuencias o colores, para después regresar a su estado de energía original. Este proceso de excitación produce lo que conocemos como “auroras”. Por otra parte, cuando los rayos cósmicos primarios tienen mayor energía, se pueden producir colisiones con la estructura electrónica de los átomos o con el núcleo mismo. Es más frecuente que se produzcan colisiones con la estructura electrónica; en este caso, la partícula primaria choca y arranca un electrón del átomo atmosférico, lo que produce la ionización. Por último, la interacción menos frecuente, pero más energética, se produce cuando los rayos cósmicos primarios que penetran la atmósfera terrestre de forma **isotrópica** colisionan con los núcleos del material atmosférico; debido a estas colisiones nucleares se generan los rayos cósmicos secundarios, también conocidos como chubascos atmosféricos.

Existen tres componentes en el chubasco atmosférico: la hadrónica o nucleónica, la electromagnética y la dura o muónica (véase la Figura 2, Otaola y Valdés-Galicia, 1992). La componente hadrónica se produce cuando el átomo se rompe y genera hadrones o núcleos de elementos más ligeros. Mientras cuenten con energía suficiente, éstos continúan colisionando con los núcleos atmosféricos y provocando que la componente hadrónica se propague de forma longitudinal con la dirección del rayo cósmico primario (Grieder, 2001). Por otra parte, la componente dura o muónica está formada por muones y neutrinos resultantes del decaimiento de piones y kaones cargados de la componente hadrónica y de otros procesos menos dominantes. Por último, del decaimiento de piones neutros y, en menor cantidad, de muones y otras partículas, se forma la componente electromagnética, integrada por rayos gama de alta energía y electrones. Esta componente se multiplica vía la producción de pares y la emisión *bremsstrahlung*, que son procesos físicos llevados a cabo por los rayos gama y los electrones, respectivamente.

Últimamente se han impulsado las colaboraciones científicas internacionales para desarrollar observatorios que detecten los rayos cósmicos primarios y secundarios. Conforme ingresan a la atmósfera, las partículas interaccionan y pierden energía; por lo tanto, los rayos cósmicos primarios sólo pueden ser registrados por satélites. Para detectar los rayos cósmicos secundarios, se requieren observatorios a nivel de superficie o sobre globos y aviones, donde haya detectores específicos para cada una de las tres componentes del chubasco atmosférico.

En México tenemos varios observatorios dedicados a la detección de rayos cósmicos. El observatorio de rayos cósmicos de la Ciudad de México (a 2 274 msnm) está compuesto por un monitor de neutrones y un telescopio de muones. El observatorio de rayos cósmicos en la cima del volcán Sierra Negra (4 580 msnm) consta del telescopio de neutrones solares y el telescopio centellador de rayos cósmicos, que detectan las componentes hadrónica y muónica del chubasco atmosférico (véase la Figura 3). Otros experimentos en nuestro país que puede detectar chubascos atmosféricos son, por mencionar

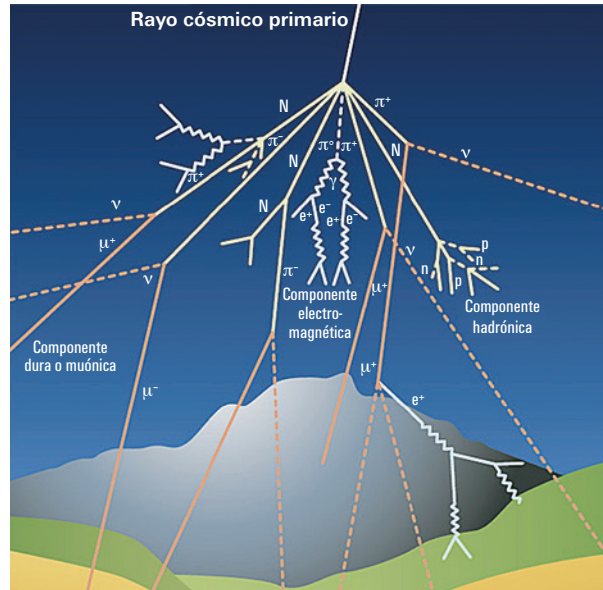


Figura 2. Representación de un chubasco atmosférico de rayos cósmicos. Tomada de AUGER.

algunos, los observatorios HAWC (High-Altitude Water Cherenkov), LAGO (Latin American Giant Observatory) y el proyecto Escaramujo.

Los rayos cósmicos, el clima y la biota

En 1953, los bioquímicos estadounidenses Stanley Miller y Harold Urey demostraron de manera expe-





rimental que un aminoácido simple puede producirse por descargas eléctricas inducidas en una mezcla de gases (Atri y Melott, 2014). Lo anterior fortalece la idea de que las descargas eléctricas en la atmósfera terrestre, muy probablemente, tuvieron un papel importante en el origen de la vida, al interaccionar con una “sopa” prebiótica (agua, metano, amónico, etcétera) y formar moléculas complejas como los aminoácidos, ácido ribonucleico, entre otros, que son necesarios precursores de la vida (Erlykin y Wolfendale, 2010).

La posible importancia de los rayos cósmicos en el origen de la vida se debe a la formación de los chubascos atmosféricos como fuente de partículas atmosféricas, y en particular de electrones, que son elementales para la generación de las descargas eléctricas. Todo lo relacionado con las condiciones eléctricas de la atmósfera, incluidas las descargas eléctricas, tiene que ver con los rayos cósmicos en el sentido de que representan una fuente importante de iones cerca de la superficie y son la fuente principal a altitudes mayores de unos pocos kilómetros (Erlykin y Wolfendale, 2010). Además,

se propone que los rayos cósmicos tienen alguna influencia en la producción de los núcleos de condensación de nubes, en el circuito eléctrico global en la atmósfera y en la nucleación de hielo y otros procesos microfísicos en las nubes, lo que sugiere un vínculo entre los rayos cósmicos, las nubes y el clima (Kirkby, 2008).

Desde la formación de la Tierra (hace 4 500 millones de años) y hasta nuestros días, el entorno astronómico ha sido variable y, con él, el espectro de rayos cósmicos. Existen tres fuentes principales que generan los cambios en la intensidad de la radiación cósmica: el campo geomagnético, el Sol –por medio del viento solar y de sus eventos explosivos, como las ráfagas y las eyecciones de masa coronal– y las fuentes de rayos cósmicos. Los dos primeros influyen en las variaciones presentes en la intensidad de partículas de baja energía, mientras que la tercera fuente influye en todo el rango de energías (Erlykin y Wolfendale, 2010).

La vida en la Tierra se ha desarrollado bajo una constante interacción con la radiación cósmica, cuyas fuentes son entidades astrofísicas: desde los



Figura 3. Observatorios de rayos cósmicos en la Ciudad de México (2 274 msnm) y en la cima del volcán Sierra Negra (4 580 msnm).

remanentes de supernovas hasta las grandes explosiones en nuestra propia estrella, el Sol. Los eventos caracterizados por grandes incrementos de radiación cósmica, tanto fotones (por ejemplo, rayos X o rayos gama) como protones y otros núcleos de alta energía, presentan un peligro potencial para la biósfera.

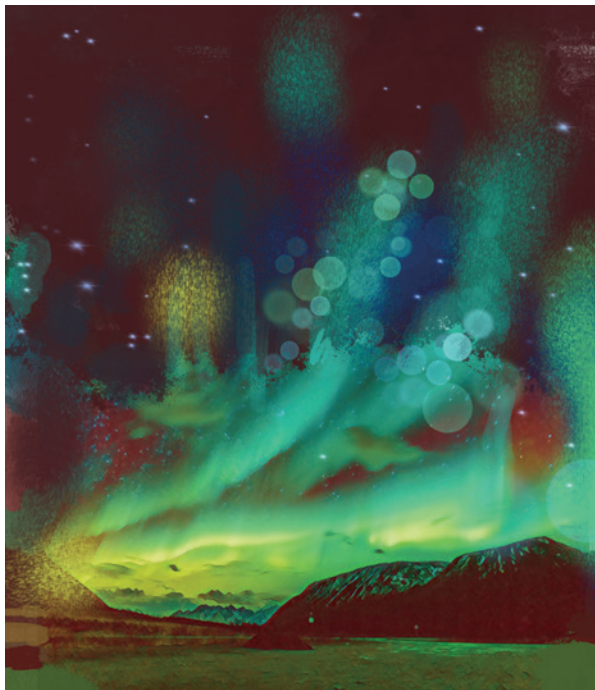
Para cualquier especie, un mecanismo que participa incluso a intensidades moderadas es la ionización de la atmósfera terrestre, lo que conduce a cambios químicos —específicamente en la disminución del ozono estratosférico— y, con ello, a un aumento en el flujo de la radiación ultravioleta (UV) proveniente del Sol a la superficie terrestre. La radiación UV es extremadamente peligrosa para la mayor parte de la vida en la Tierra debido a su absorción por el material genético del ADN y la posterior ruptura de enlaces químicos, lo que a menudo conduce a la mutación o muerte celular; por ejemplo, la radiación UV es letal para los microorganismos que se encuentran en la base de la cadena alimenticia en el océano (Melott y Thomas, 2011).

Luis Xavier González Méndez

Laboratorio Nacional de Clima Espacial/Servicio de Clima Espacial México, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.
xavier@igeofisica.unam.mx

Ernesto Ortiz Fragoso

Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México.
eortiz@encit.unam.mx



Lecturas recomendadas

- Atri, D. y A. L. Melott (2014), "Cosmic rays and terrestrial life: A brief review", *Astroparticle Physics*, 53:186-190.
- Erlykin, A. D. y A. W. Wolfendale (2010), "Long term time variability of cosmic rays and possible relevance to the development of life on Earth", *Surv. Geophys*, 31:383-398.
- Grieder, P. K. F. (2001), *Cosmic rays at Earth*, Ámsterdam, Elsevier Science.
- Kirkby, J. (2008), *Cosmic Rays and Climate*, Ginebra, CERN.
- Melott, A. L. y B. C. Thomas (2011), "Brief review and census of intermittent intense sources", *Astrobiology*, 11(4):343-361.
- Otaola, J. A. y J. F. Valdés-Galicia (1992), *Los Rayos Cósmicos: Mensajeros de las Estrellas*, México, Fondo de Cultura Económica (Colección La Ciencia Desde México, 108).

Juan Américo González Esparza y Eduardo Pérez Tijerina

Ciencia espacial y protección civil

Los eventos de la actividad solar pueden afectar la operación y confiabilidad de los sistemas tecnológicos críticos: satélites, telecomunicaciones, sistemas de posicionamiento global, así como redes de generación y distribución de energía eléctrica. Dado que se trata de un tema de seguridad y soberanía, en 2016 se creó el Laboratorio Nacional de Clima Espacial con el objetivo de alertar, monitorear y estudiar los efectos del clima espacial en México.

Imaginemos que un día nos despertamos y en todas las cadenas de televisión, los noticiarios de radio de la mañana y las redes sociales se difunde un comunicado de prensa que anuncia, con alarma, que acaba de ocurrir una tormenta solar. En México, el Servicio de Clima Espacial informa que a las 6:35 am, hora local del centro, los satélites GOES de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA)¹ de Estados Unidos de América detectaron una enorme explosión en la superficie del Sol, la más intensa que se ha registrado en los últimos 30 años. Las observaciones fueron confirmadas por dos sondas de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA); las cámaras del satélite SDO² fotografiaron el sitio de la explosión, y el telescopio del satélite SOHO³ captó la eyección de una gigantesca nube de material solar que se dirige hacia la Tierra a más de 3 000 km por segundo.

A las 6:50 am se registran los primeros efectos de la explosión solar en diferentes regiones del mundo; se notifican las primeras pérdidas de satélites y diversas fallas en los sistemas de telecomunicaciones. Por ello, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) emite un aviso para que los vuelos se restrinjan y todos los aviones que están en el aire aterricen.

¹ Véase: <www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux>.

² Véase: <sdo.gsfc.nasa.gov>.

³ Véase: <sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime/c3/512/>.





El Sistema Nacional de Protección Civil en México anuncia que emitirá comunicados constantemente para informar acerca de la evolución del fenómeno. Todos los servicios de clima espacial de varios países se encuentran en estado de alerta máxima e intercambian información y datos. Siguiendo sus protocolos, notifican a sus respectivas autoridades de protección civil y a sus jefes de gobierno. Existe el temor de que la nube de material solar tenga las características precisas para generar el mayor daño posible, que se trate de una “tormenta solar perfecta”. En ese caso, los daños serían globales y catastróficos.

Diecisiete horas más tarde del primer anuncio, a las 11:30 pm, los servicios de clima espacial reciben los datos del satélite *DSCVR* de la NOAA⁴ (el cual está ubicado en la línea Sol-Tierra) y confirman el peor escenario posible: la nube tiene las características de una tormenta solar perfecta. De inmediato se activan los protocolos de emergencia. Veinte minutos después, 11:50 pm, la nube solar impacta el campo magnético de la Tierra. Se reportan *más fallas de satélites* y sistemas de telecomunicaciones, además de que todas las tecnologías que utilizan sistemas de posicionamiento global (GPS) presentan errores. Esa noche, en varios países, incluido México, se observa la aparición de una intensa aurora boreal roja. Un par de horas después de la media noche nos enteramos de la pérdida de energía eléctrica en muchas regiones de la Tierra. No hay internet. No hay banca electrónica. Se interrumpen los suministros de agua, gas y gasolina. Hay un apagón global...

Este escenario imaginario y catastrófico, que bien pudiera ser el guion de una película de Hollywood, es un tema que nos preocupa con mucha seriedad a los científicos que nos dedicamos a estudiar el Sol y sus efectos sobre nuestro planeta.

El Sol y las tormentas solares

El Sol es la principal fuente de energía para toda la vida en la Tierra. De las cien mil millones de es-

trellas que existen tan sólo en nuestra galaxia, a ninguna otra la podemos observar con tanto detalle y ninguna influye tanto sobre nuestra supervivencia.

Nuestra estrella más cercana (a 150 millones de km) es un objeto fascinante, lleno de dinámica, complejidad y belleza. Es una gigantesca bola de gas cuya superficie tiene una temperatura de 6000 K y su interior tiene un motor nuclear que genera toda su energía. El Sol gira (rotación) y tarda 27 días en completar una vuelta.

En la superficie de nuestra estrella aparecen regiones oscuras, las cuales llamamos manchas solares. Éstas concentran campos magnéticos muy intensos que, por la rotación del Sol, se pueden tensar y empujar (véase la Figura 1). La dinámica de las manchas solares provoca que se almacene energía magnética y puedan producirse explosiones.

El número y tamaño de las manchas solares tiene un comportamiento cíclico de aproximadamente 11 años; no están ahí todo el tiempo. Por ejemplo, en 2019 y 2020, la superficie del Sol ha aparecido prácticamente lisa, sin manchas, y con muy pocas explosiones. Esta etapa se conoce como el mínimo del ciclo solar. Sin embargo, en cuatro o cinco años (2024-2025), el Sol va a cambiar, comenzarán a surgir manchas y ocurrirán tormentas más frecuentes e

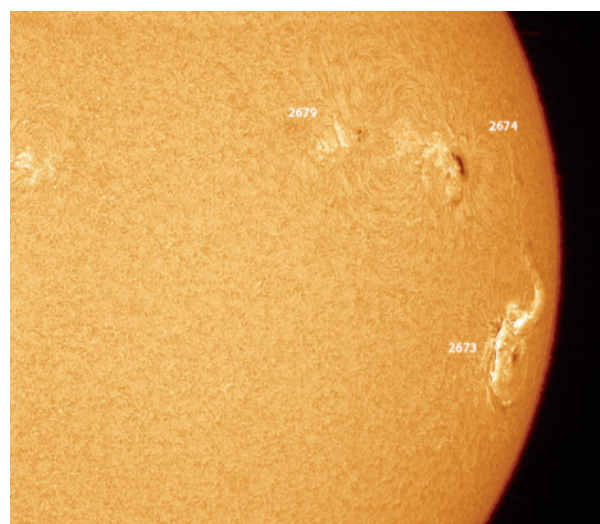


Figura 1. Imagen solar en H-Alpha, tomada el 8 de septiembre de 2017. La fotografía muestra la cromosfera solar y las regiones activas 2673, 2674, y 2679. Cortesía del Laboratorio de Ciencias Geoespaciales de la Escuela Nacional de Estudios Superiores de Morelia, UNAM.

⁴ Véase: <www.swpc.noaa.gov/products/real-time-solar-wind>.



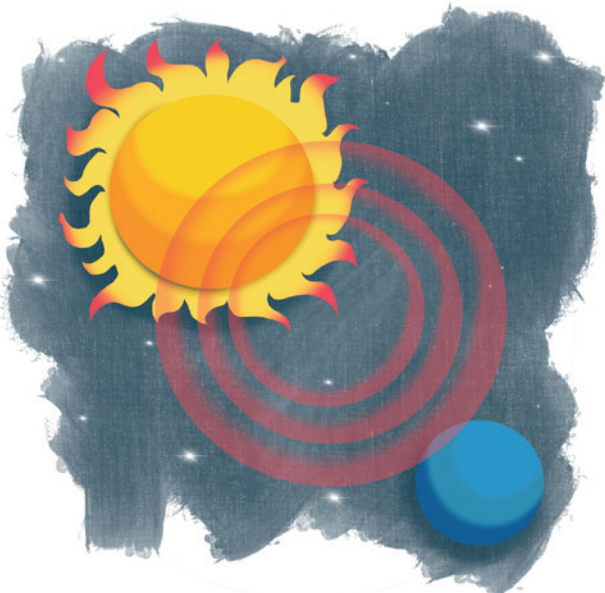
Figura 2. Imagen de una aurora boreal. Cortesía de César Cantú.

intensas; estaremos entonces en el siguiente máximo del ciclo.

Cuando ocurre una tormenta solar, hay un súbito destello de luz que dura algunos minutos, la materia que está cerca de la explosión se calienta, se aceleran las partículas y se desprende una gigantesca nube de material solar, la cual comienza a propagarse por el espacio. Algunas de estas nubes pasan por la órbita de la Tierra.

Sin embargo, nuestro planeta tiene una protección intrínseca que impide que las partículas de esas nubes de material solar penetren a la atmósfera. Esta protección se debe al campo magnético de la Tie-

rra, el cual ha sido un factor muy importante para el desarrollo de la vida. No obstante, esta coraza no es infalible, y en ocasiones las nubes solares pueden romperla por algunas horas. En ese caso, se abre una compuerta y las partículas solares entran a nuestra atmósfera. Dichas partículas producen las auroras boreales y australes (véase la Figura 2), además de que generan una serie de fenómenos físicos que afectan la operación y confiabilidad de los sistemas tecnológicos que resultan críticos para la sociedad moderna: satélites, telecomunicaciones, GPS y redes de generación y distribución de energía eléctrica. Todas estas tecnologías son vulnerables a los efectos de las tormentas solares (véase la Figura 3).



Evento Carrington

■ La Tierra ya ha sufrido, en su historia reciente, los estragos de una tormenta solar perfecta. Esto ocurrió hace 161 años y se conoce como el evento Carrington. La mañana del 1 de septiembre de 1859, el astrónomo británico Richard Carrington realizaba su observación diaria; desde hacía varias decenas de meses registraba todos los días las manchas solares y estudiaba su evolución. A las 11:00 am, mientras proyectaba sobre una hoja de papel la imagen de la superficie solar captada por su telescopio y terminaba su dibujo, ocurrió una poderosa explosión en el Sol. Carrington observó un destello de luz sobre la imagen oscura de la mancha que duró aproximada-



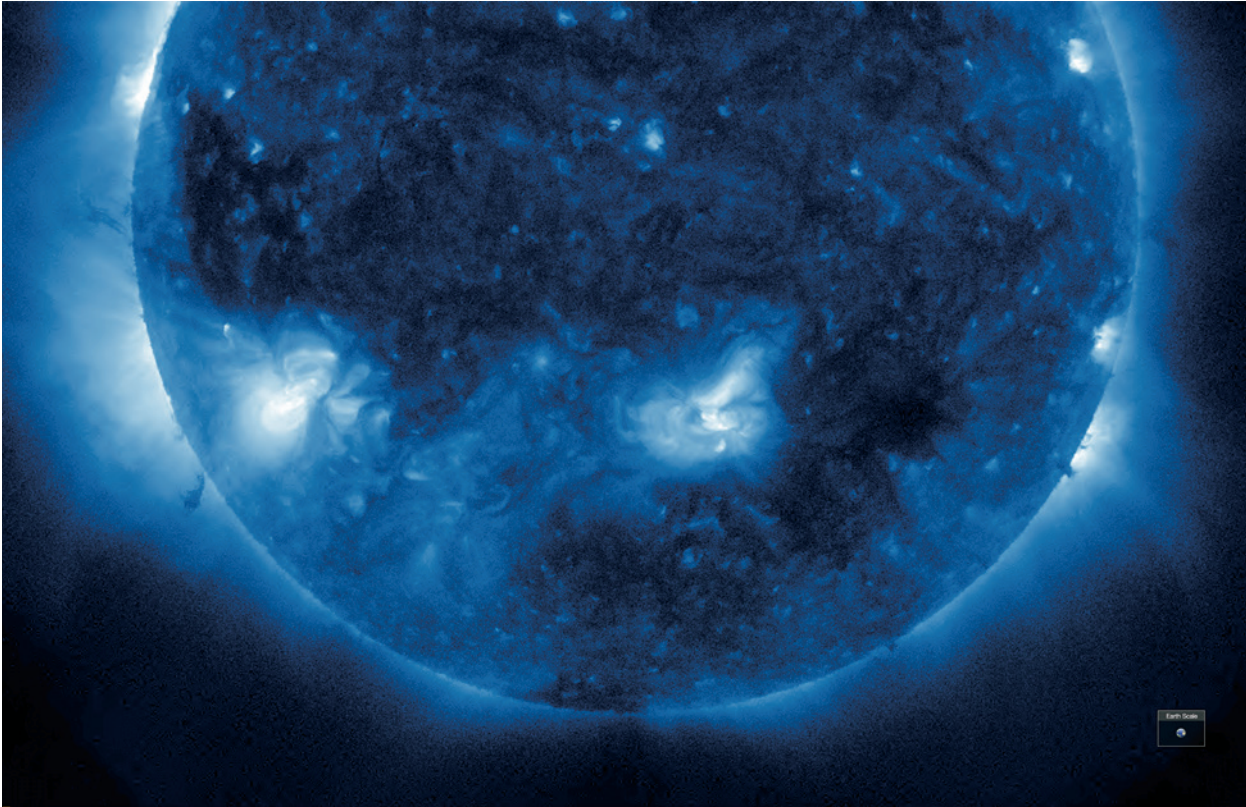
mente cinco minutos. Sin saberlo en ese momento, acababa de observar la primera tormenta solar captada por un telescopio.

Diecisiete horas después del estallido solar, en la madrugada del 2 de septiembre de 1859, se produjo el despliegue de auroras boreales más extenso del cual se tiene registro en la historia reciente. El cielo nocturno se iluminó de rojo. La aurora del evento Carrington cubrió todo el planeta; en México encontramos reportes de al menos siete sitios, en diferentes regiones del país, donde se observó este asom-

broso fenómeno natural. Es importante hacer notar que no hubo noticias de fallecimientos inusuales o cambios bruscos de temperatura. No está demostrado que las tormentas solares tengan efectos directos sobre la salud de los seres vivos. La enorme distancia entre la Tierra y el Sol, la corta duración del estallido, así como la atmósfera y el campo magnético terrestre nos protegen. Además, la razón por la cual tampoco se reportaron grandes daños o pérdidas económicas asociadas al evento Carrington es muy simple: en el siglo XIX no había satélites ni sistemas



Figura 3. Infografía "Clima espacial" del Sistema Nacional de Protección Civil.



Imágen del satélite Solar Dynamics Observatory. NASA/SDO. Tomada de: www.Helioviewer.org

de telecomunicaciones, GPS o redes de generación y transmisión de energía eléctrica. Estos desarrollos tecnológicos no se habían inventado todavía.

En otro evento muchos años más tarde, en julio de 2012, ocurrió una poderosa tormenta solar cuya nube fue captada por la nave espacial *STEREO* de la NASA. Aunque tenía las características de una tormenta solar perfecta, afortunadamente, la nave en ese momento estaba muy lejos de la Tierra y la nube no pasó cerca de nuestro planeta. ¡Nos salvamos!

Debemos estar preparados

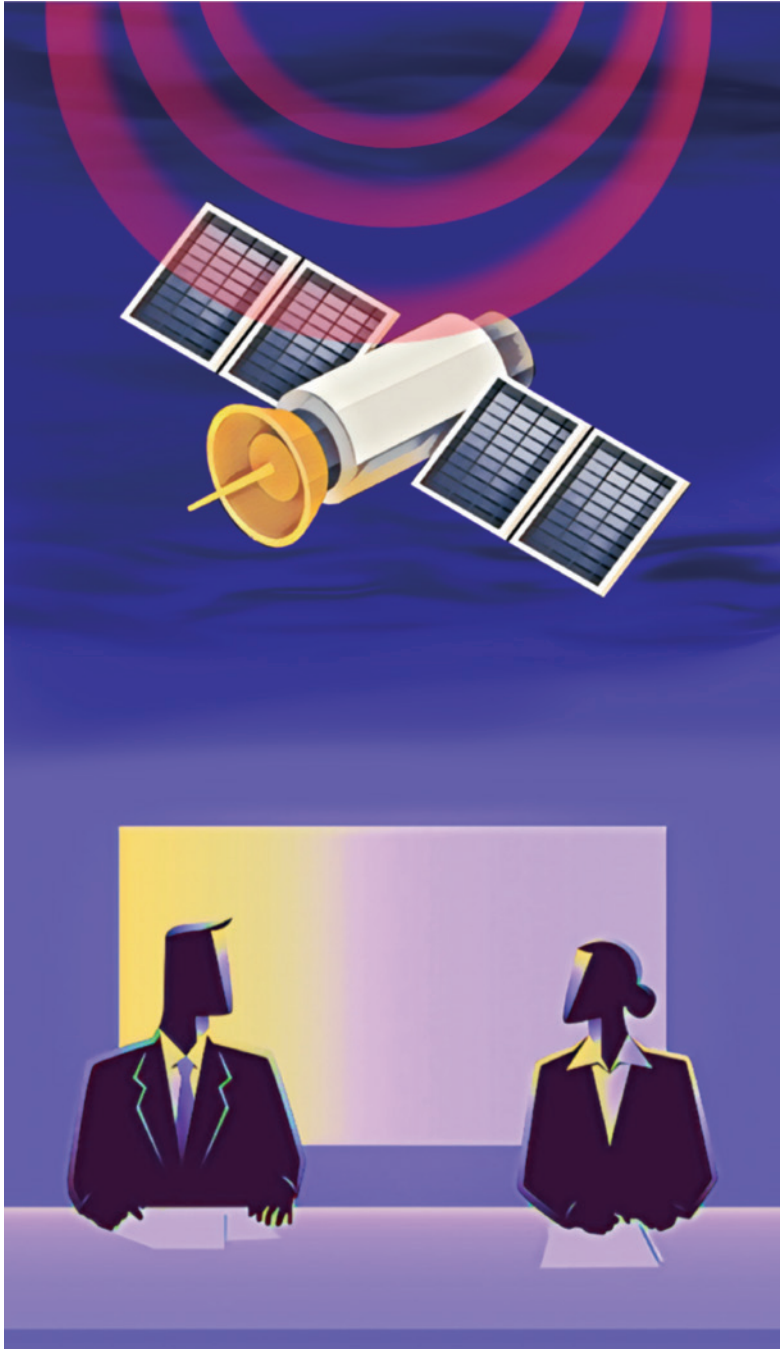
Los efectos de una tormenta solar severa constituyen una amenaza a la seguridad de todo el planeta. ¿Qué tienen que hacer los países ante este fenómeno natural que pone en riesgo la confiabilidad y operación de los servicios tecnológicos críticos para nuestra sociedad? Diferentes organismos en el mundo fomentan la colaboración científica internacional para el estudio y monitoreo del clima espacial. In-

cluso, varios gobiernos han empezado a desarrollar estrategias para mitigar los posibles daños a sus sistemas tecnológicos, así como protocolos internos para incrementar la resiliencia ante estos fenómenos naturales.

En México se modificó la Ley General de Protección Civil en 2014 y se incluyeron las tormentas solares entre los riesgos que pueden amenazar la seguridad nacional. Ese mismo año se creó el Servicio de Clima Espacial del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)⁵ y en 2016 se estableció el Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE).⁶ En 2015 se conformó el grupo de trabajo de Clima Espacial en México, convocado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), la Agencia Espacial Mexicana (AEM) y el Instituto de Geofísica de la UNAM. El grupo trabaja con representantes

⁵ Véase: <www.sciesmex.unam.mx>.

⁶ Véase: <www.lance.unam.mx>.



de diferentes agencias para establecer un sistema de alerta y un protocolo de reacción con el objetivo de incrementar la resiliencia del país ante estos fenómenos naturales.

En el LANCE participan cinco catedráticos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) e investigadores de la UNAM y de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). El labora-

torio desarrolla diferentes investigaciones en física solar, medio interplanetario, rayos cósmicos, ionosfera y campo geomagnético.

Asimismo, el LANCE coordina y opera una red de instrumentos en tierra para medir los efectos de las tormentas solares sobre el territorio mexicano (véase la Figura 4). Estos datos son importantes en términos de soberanía y seguridad nacional, ya que indican la confiabilidad de operación de los sistemas satelitales, de telecomunicaciones y GPS; además, definen la vulnerabilidad de la red eléctrica nacional ante las tormentas magnéticas. En mayo de 2019 el LANCE certificó bajo la norma internacional ISO 9001 el servicio de alerta de clima espacial que brinda al Sistema Nacional de Protección Civil; este sistema de alerta temprana da aviso al Cenapred cuando ocurre un evento de clima espacial que puede afectar significativamente al país.

El Plan Nacional de Desarrollo (2019-2024) incluye entre sus objetivos la construcción de un país más resiliente, sostenible y seguro. México necesita desarrollar una gestión integral de riesgos que incluya, entre otras acciones, la investigación del Sol, el monitoreo de su actividad y el establecimiento de planes de prevención. El objetivo es incrementar nuestra capacidad de respuesta ante la amenaza de este fenómeno natural (véase la Figura 5). Así como en el caso de los sismos, huracanes e inundaciones, no podemos predecir cuándo va a ocurrir la próxima



Figura 4. Antena del observatorio MEXART (Mexican Array Radiotelescope) en Coeneo, Michoacán, instrumento principal del Laboratorio Nacional de Clima Espacial.



Figura 5. Discusión de un evento solar en el cuarto de situaciones del Laboratorio Nacional de Clima Espacial.

tormenta solar perfecta; puede ser en cien años o puede ocurrir dentro de cinco o seis, no lo sabemos. Lo que tenemos seguro es que va a ocurrir, y por ello debemos estar preparados.

Juan Américo González Esparza

Laboratorio Nacional de Clima Espacial, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.
americo@igeofisica.unam.mx

Eduardo Pérez Tijerina

Laboratorio Nacional de Clima Espacial, Facultad de Físico-Matemáticas, Universidad Autónoma de Nuevo León.
eduardo.perezjt@gmail.com

Lecturas recomendadas

- Carrington, R. C. (1860), "Description of a singular appearance seen in the Sun on September 1, 1859", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 20: 13-15.
- Cuevas-Cardona, C. y J. A. González-Esparza (2018), "El evento Carrington: la tormenta solar perfecta", *¿Cómo ves?*, 241:24.
- Executive Office of the President of the United States (2019), *National Space Weather Strategy and Action Plan*. Disponible en: <www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2019/03/National-Space-Weather-Strategy-and-Action-Plan-2019.pdf>, consultado el 12 de mayo de 2020.
- Giegengack, R. (2015), "The Carrington coronal mass ejection of 1859", *Proceedings of the American Philosophical Society*, 159(4):421-433.
- González-Esparza, J. A. (2018), "Servicio de Clima Espacial", *Ciencia y Desarrollo*, 295:36.
- González-Esparza, J. A. et al. (2017), "Mexican Space Weather Service (SCiESMEX)", *Space Weather*, 15(1):3-11. Disponible en: <doi.org/10.1002/2016SW001496>, consultado el 12 de mayo de 2020.
- TEDx Talks (2019), "LA TORMENTA SOLAR PERFECTA | Juan Américo González Esparza | TEDxUniversidadMichoacana", *YouTube*. Disponible en: <youtu.be/ejcbkegEZv4>, consultado el 12 de mayo de 2020.

José Francisco Valdés Galicia y Juan Antonio Sánchez Guzmán



El programa espacial de la UNAM

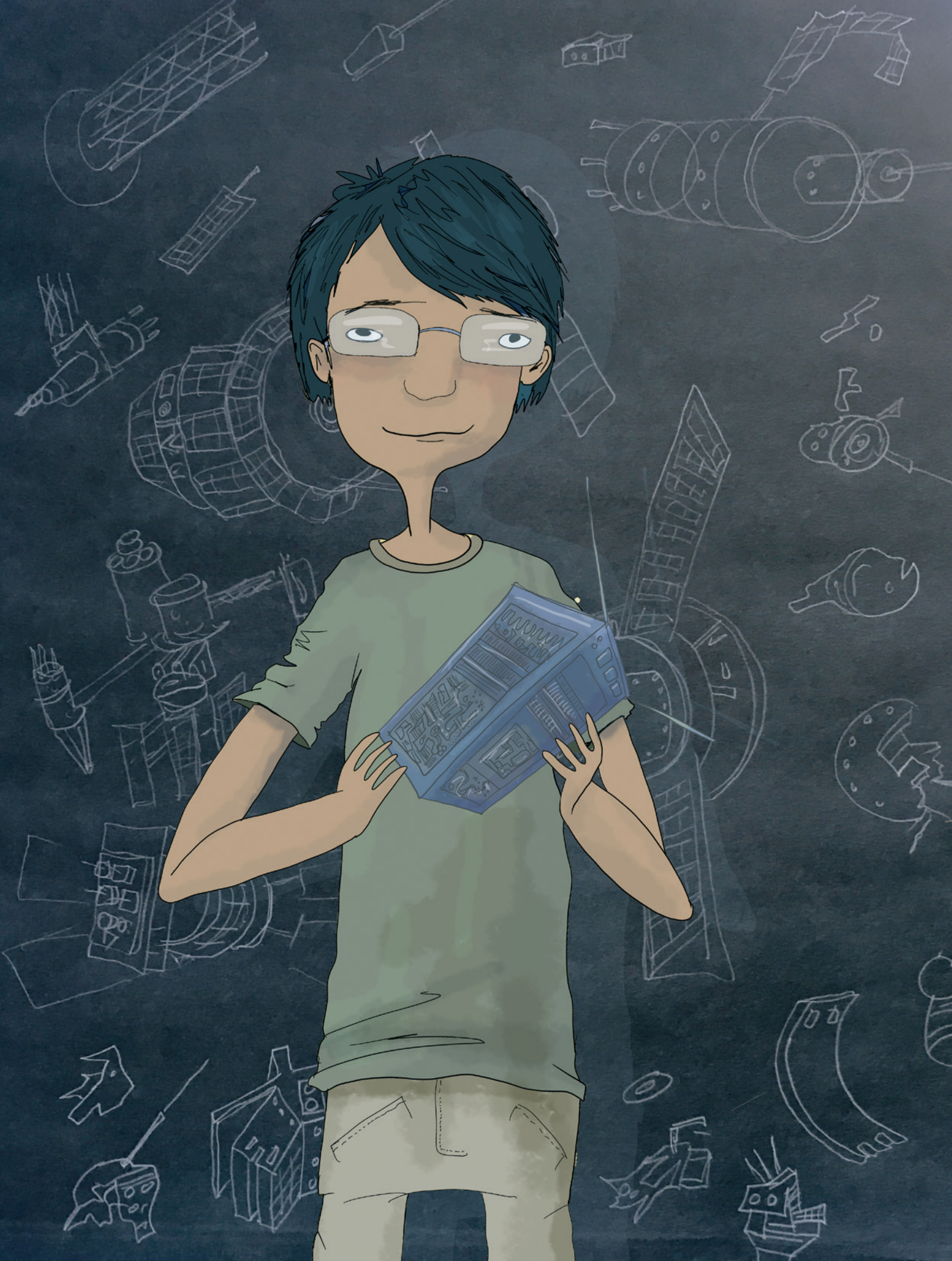
“Ah, but a man’s reach should exceed his grasp,
or what’s a heaven for?”

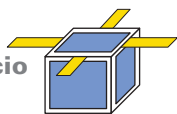
ROBERT BROWNING

Con base en experiencias previas en el ámbito de la ciencia y la tecnología espaciales, a finales de 2017 la Universidad Nacional Autónoma de México creó el Programa Espacial Universitario. Sus actividades hasta el momento se han centrado en iniciar el diseño de un nanosatélite mexicano, organizar un concurso universitario de satélites enlatados, así como realizar actividades de divulgación y participación en la educación a nivel de licenciatura.

A partir de la segunda mitad del siglo XX, con el desarrollo de la investigación y la tecnología espaciales se abrió un nuevo horizonte científico, económico, político, social y cultural. La posibilidad de llegar a lugares sólo imaginados por la ciencia ficción despertó el interés de muchos países por generar conocimiento y nuevo desarrollo tecnológico.

La investigación del espacio cercano a la Tierra y el avance en las tecnologías asociadas a ello han derivado en multitud de cambios y beneficios para la humanidad que se han integrado como parte de nuestra vida diaria, por lo que difícilmente reconocemos de dónde provienen. ¿Podemos imaginar nuestra vida sin los teléfonos celulares? Éstos y muchos otros medios de comunicación, así como la predicción de la formación y el desarrollo de ciclones y tormentas atmosféricas, el monitoreo de bosques, selvas, cultivos, dispersión urbana y diversos aspectos de los fenómenos volcánicos, además de una vasta cantidad de actividades humanas, se realizan gracias al desarrollo de la ciencia y la tecnología espaciales (CTE).





En México se cultivan diferentes campos de investigación y tecnología espaciales desde hace al menos siete décadas. En particular, las actividades espaciales en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) se han desarrollado tanto en los aspectos científicos y tecnológicos como en diversas ramas de las humanidades y las ciencias sociales. Mencionamos dos momentos importantes: el desarrollo del primer satélite mexicano, el UNAMSAT, lanzado al espacio exitosamente en 1996, y la participación de numerosos universitarios en la elaboración de la ley que mandató la creación de la Agencia Espacial Mexicana.

A finales de 2017 la UNAM creó el Programa Espacial Universitario (PEU), con el objetivo de promover proyectos de ciencia y tecnología espaciales, además de impulsar una educación integral en el área espacial y proponer estudios estratégicos que apoyen a la toma de decisiones, la elaboración de políticas públicas y la atención de necesidades de las telecomunicaciones, teleeducación y telemedicina, además de la industria aeroespacial, entre otras. El PEU hasta el momento ha desarrollado principalmente tres actividades, que presentaremos a continuación.

¿Un satélite mexicano?

Un sueño largamente acariciado en nuestro país es el de tener satélites mexicanos. Encaminado a este fin, el PEU ha promovido el Taller Satelital Mexicano (TSM), el cual tiene como un propósito importante el de acortar la brecha tecnológica que se tiene con otros países en el área espacial; esto, aprovechando la miniaturización electrónica que reduce significativamente los costos. Lo anterior nos permitirá integrarnos a la carrera espacial con nuevos desarrollos tecnológicos de gran utilidad para México.

Para conformar el taller se invitó a instituciones relevantes en el sector, como el Centro de Desarrollo Aeroespacial del Instituto Politécnico Nacional, el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Elec-



trónica, así como la Agencia Espacial Mexicana. El primer objetivo del TSM es hacer un satélite que nos brinde experiencia, genere conocimiento y desarrolle nuestras capacidades para replicar y crear tecnología propia.

Un gran incentivo para la creación del TSM fue la Jornada de Trabajo UNAM-NASA, organizada por el PEU. Ambas instituciones presentaron algunos de sus proyectos en el ámbito de los nanosatélites, y la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio de Estados Unidos de América (NASA) ofreció ayudar con el lanzamiento de un nanosatélite hecho en México.

La definición de la misión y de los potenciales usuarios del nanosatélite tipo CubeSat se realizó por medio de reuniones y entrevistas con entidades gubernamentales, como el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred); el Subsistema Nacional de Información Geográfica, Medio Ambiente, Ordenamiento Territorial y Urbano del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi), y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Se concluyó que la misión del TSM será hacer un nanosatélite que capte imágenes en el espectro visible e infrarrojo cercano para estimar la salud de la vegetación y el suelo, además de monitorear algunas actividades humanas y geológicas.

De esta manera, se apoyará a una mejor planeación agrícola, el estudio del crecimiento y la movilidad poblacional, y la protección asociada a riesgos causados por fenómenos naturales.

En particular, la instrumentación desarrollada para el satélite podrá identificar la densidad de la vegetación y la madurez de los cultivos, además de estudiar la vegetación flotante cercana a las costas mediante la evaluación del daño de algas tóxicas y en los humedales. Las imágenes obtenidas también brindarán información acerca de otras situaciones que pudieran poner en riesgo a la población civil, tales como la modificación de los cuerpos de agua debido a sequías o inundaciones, o bien la dispersión de materiales y cenizas como producto de erupciones volcánicas.

Las imágenes, con las necesarias adaptaciones de las lentes de sus cámaras, podrían complementar a las que actualmente se obtienen de satélites como *Landsat 8*, operado por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos de América, pero tendrían mayor resolución espacial y una mayor recurrencia sobre el territorio nacional.

Al mismo tiempo, este nanosatélite servirá para validar el funcionamiento de la tecnología nacional (captación de imágenes, telemetría y control, estabilización y actitud de la órbita, computadora a bordo, estación terrena y control de operaciones, control térmico y fuentes de energía), fortalecer la infraestructura en materia espacial para construcción y pruebas terrenas, impulsar a los grupos de investigación y formar recursos humanos especializados en ciencia y tecnología espaciales. Adicionalmente, se empezarán a generar experiencias y tecnologías propias que sean la base de proyectos más ambiciosos para la observación de la Tierra, considerando que también pudieran realizarse a bordo de vehículos espaciales.

Construir y operar un satélite que capte imágenes de utilidad social tendría la meta adicional de empezar a generar experiencia y tecnología propias que fueran la base para proponer proyectos más ambiciosos, tanto para la observación de la Tierra como en otros campos que pueden desarrollarse mediante vehículos espaciales.

Sin duda, el diseño, construcción y lanzamiento de un satélite mexicano proveerá a nuestro país de habilidades y conocimientos importantes para reducir la dependencia tecnológica en el ámbito de las ciencias y tecnologías espaciales, y sería parte importante del sustento para un Plan Nacional Espacial en el que las contribuciones autóctonas sean significativas y, por tanto, se encaminen hacia la solución de problemas propios.

■ Concurso de satélites enlatados

■ Otra de las actividades en las que el PEU ha hecho un esfuerzo importante es la de promover el desarrollo de habilidades estudiantiles; para ello se realiza el concurso de satélites enlatados, uno de los más populares entre los estudiantes universitarios interesados en la ciencia y la tecnología espaciales. El objetivo es proporcionarles experiencia práctica en un proyecto con tecnología espacial. Un satélite enlatado (CanSat) es la simulación de un satélite real, integrado dentro del volumen y forma de una lata de un tamaño aproximado a las de refresco (véanse las Figuras 1 y 2).

En el Concurso de Satélites Enlatados CanSat 2017-2108, el desafío fue incorporar todos los subsistemas principales que se encuentran en un satélite. Los estudiantes fueron responsables por completo de la misión, que consistió en diseñar el satélite,



Figura 1. Satélite enlatado (CanSat) integrado dentro del volumen y forma de una lata de un tamaño aproximado a las de refresco. Imagen del concurso CanSat 2018-2019.

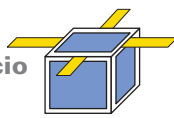


Figura 2. Satélite enlatado (CanSat). Imagen del concurso CanSat 2018-2019.

integrar los componentes, preparar el lanzamiento, analizar los datos recibidos y escribir un reporte con los resultados. Cada equipo contó con un asesor; en el caso de aquella edición del concurso, debió ser personal académico de la UNAM. La convocatoria incluyó dos categorías: MIZTLI (nivel licenciatura) e IYARI (medio superior).

En la misión destacaron tres actividades que el CanSat debía llevar a cabo:

1. Transmitir información de presión, temperatura, orientación y aceleración durante el trayecto de subida y durante la caída libre desde una altura aproximada de 200 m. Con estos datos se calculó la velocidad en todo el trayecto y la altura máxima lograda.
2. Llevar en su interior un huevo de gallina, que debió sobrevivir al impacto de la caída libre.
3. Seguir transmitiendo una vez que tocó tierra.

El concurso se dividió en siete etapas, que iniciaron con el registro y la distribución de tareas en cada equipo, el desarrollo de cálculos mecánicos para cumplir los requerimientos de la misión, la elaboración de los documentos denominados *Preliminary*

Design Review (PDR) y *Critical Design Review* (CDR), la aceptación y el lanzamiento de los satélites enlatados, y la entrega de un reporte científico con los resultados. Estos pasos constituyen una misión satelital completa, tal como la realizan los profesionales en las agencias espaciales internacionales. Al final de la competencia, los equipos ganadores fueron aquellos que más puntos acumularon a lo largo de las siete etapas mencionadas.

En la versión 2018-2019 del concurso se hizo una convocatoria nacional que generó gran interés, ya que se inscribieron estudiantes de licenciatura de 23 universidades distintas localizadas en 11 estados del país. También se añadieron requerimientos adicionales a los del concurso anterior para acercarlo más a las características de los concursos internacionales de su tipo (véase la Figura 3).

Para 2019-2020, la convocatoria se difundió en toda la región iberoamericana. Además de los participantes nacionales, se inscribieron equipos de otros 12 países de Latinoamérica. La misión a cumplir con el CanSat es incluso más complicada que en los concursos anteriores.

Los equipos ganadores del concurso mexicano participan en un concurso internacional en Stephenville, Texas. En 2018 el equipo “Siqueiros”, representativo de la UNAM, obtuvo el séptimo lugar entre más de 100 equipos provenientes de 95 universidades de diversos puntos del planeta. Este resultado resalta la importancia de mantener un programa de apoyo a los estudiantes involucrados en proyectos de ciencia y tecnología espaciales.



Figura 2. Equipos participando en el concurso CanSat 2018-2019.

Con el fin de promover el interés por participar en futuros concursos, invitamos a los lectores a consultar frecuentemente la página de internet del PEU: <www.peu.unam.mx>.

Hay que promover, educar y divulgar la ciencia y la tecnología espaciales

■ Para tener un diagnóstico y tomar decisiones en el área, es necesario contar con fuentes de información. Para ello, el PEU compiló un Catálogo de Proyectos Espaciales, los cuales son contribuciones desde la ciencia para la toma de decisiones y la elaboración de políticas públicas en el sector espacial para protección civil, explotación de recursos naturales, demografía, telecomunicaciones, divulgación de las ciencias y tecnologías espaciales, entre otros. Adicionalmente, el PEU se integró al Comité de Clima Espacial encabezado por el Cenapred, donde ya algunos de los proyectos del catálogo se están poniendo en práctica.

Con el fin de fortalecer la formación de recursos humanos en el país en materia espacial, el PEU participa como entidad asesora en la licenciatura de Ingeniería Aeroespacial, recientemente creada en la Facultad de Ingeniería de la UNAM; asimismo, en el Congreso Nacional en Salud Espacial en 2019; en estancias de verano de estudiantes mexicanos en la Universidad de Arizona, y en estancias de estudiantes visitantes de universidades de otros estados para realizar sus tesis de licenciatura en la UNAM.

Un reconocimiento importante al PEU se dio en la Convención de las Naciones Unidas para la Exploración y Uso Pacífico del Espacio Exterior (UNISPACE+50) en 2019, donde participó como entidad representativa de la UNAM con una conferencia invitada.

¿Para qué se necesita un Programa Espacial Universitario?

■ En el poco tiempo transcurrido desde la creación del PEU, hemos empezado a cubrir la demanda de

la comunidad universitaria de contar con una herramienta para apoyar, canalizar e impulsar sus intereses. Nos hemos encontrado con una comunidad activa y colaborativa, que buscaba un camino por donde conducir sus iniciativas o relacionarse con otros actores en el ámbito de la ciencia y la tecnología espaciales.

Vislumbramos que a partir del PEU se generará un desarrollo armónico de las capacidades existentes en la UNAM en el área, para así conformar un plan universitario integral que aproveche distintos nichos de oportunidad y tienda a consolidar una ciencia espacial de calidad y un desarrollo tecnológico autónomo. El PEU puede funcionar como un canal de colaboración con otras instituciones nacionales y también aprovechar las capacidades de las instituciones internacionales con las cuales se establezcan relaciones.

José Francisco Valdés Galicia

Programa Espacial Universitario, Universidad Nacional Autónoma de México.
jfvales@unam.mx

Juan Antonio Sánchez Guzmán

Programa Espacial Universitario, Universidad Nacional Autónoma de México.
juanantonio@cic.unam.mx

Lecturas recomendadas

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2016), *Achieving Science with CubeSats: Thinking Inside the Box*, Washington, D. C., The National Academies Press. Disponible en: <doi.org/10.17226/23503>, consultado el 11 de mayo de 2020.

Poljanšek, K., et al. (2017), *Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less. Executive Summary*. EUR 28034 EN, Luxemburgo, Publications Office of the European Union. Disponible en: <doi.org/10.2760/451402>, consultado el 11 de mayo de 2020.



Novedades científicas
Desde el Conacyt
De actualidad
Reseñas

Juan Antonio Reyes Agüero, Claudia Heindorf y Juan Rogelio Aguirre Rivera

Olga Costa y la fiesta de la diversidad frutícola de México

En *La vendedora de frutas* Olga Costa representó una parte de la diversidad frutícola de México: 58 especies y 10 variantes. Las frutas proceden de distintas regiones: son mesoamericanas (46 %), les siguen las de oriente lejano (30 %), oriente cercano (13 %), las de origen sudamericano (6.0 %), y en menor cantidad (4.5 %) las de África, aunque de aquí también procede nuestra especie, *Homo sapiens*.

Olga Costa y *La vendedora de frutas*

En algún día de 1925, a los 12 años la niña Olga Kostakowsky Fabricant descendió del *Espagne* en el puerto de Veracruz con sus papás y su hermana menor, Lya. El casi imperceptible rocío de las flores, la diversidad de colores que contrastaba con el gris-guerra de Europa, los tonos morenos de la gente y los aromas de la brisa marina empezaron a diluir la nacionalidad germana y la ascendencia rusa de Olga. A la niña le encantaron las voces de los vendedores callejeros, el novedoso idioma español y el ambiente del hotel donde se hospedaron, pues tuvieron que esperar en vano en el puerto por sus equipajes perdidos. Esas impresiones y muchísimas más moldearon a aquella niña ruso-germana para convertirla en Olga Costa (1913-1993), pintora mexicana de renombre, Premio Nacional de Bellas Artes en 1990. A contracorriente de los muralistas mexicanos, Olga se alejó de los dogmas estéticos que impusieron, y evitó discriminar tendencias y valores en el arte. En su iconografía de personas, paisajes, flores, plantas y frutas, Olga buscó captar los símbolos y asuntos populares desde una perspectiva etnográfica que superaba el folclorismo.

El pintor Fernando Gamboa, subdirector del Instituto Nacional de Bellas Artes en 1950, sabía del gusto pictórico de Olga por los frutos de México, y le solicitó que hiciera un cuadro con todos ellos. La petición fue para incluirlo en la Exposición de Arte Antiguo y Moderno Mexicano que se presentaría un año después en el Museo de Arte Moderno de París. En ese entonces, el gobierno estaba empeñado



en exhibir el llamado milagro mexicano, acorde con la modernidad de la posguerra, pero a la vez pretendía destacar el orgullo por las raíces prehispánicas y la amalgama mestiza de la nación.

Ya puesta a cumplir el encargo, muy probablemente Olga evitó pintar una naturaleza muerta, pues quería representar algo palpitante, muy vivo. Tampoco fue opción pintar un bodegón, que siempre tiene un tufillo medieval, y evadió el convencional cuerno de la abundancia, por su fuerte carga de lugar común para simbolizar la riqueza. Entonces, más fiel a su estilo, prefirió pintar la fiesta de la agrodiversidad frutícola que danza por los mercados de México, un cuadro que mostrara la alegría de los puestos de fruta; en cierta forma, una cornucopia *sui generis*. Así, 26 años después de su arribo a Veracruz,

concluyó su pintura *La vendedora de frutas* (1951, óleo sobre lienzo, 2.7 × 1.5 m, Museo de Arte Moderno, Ciudad de México), en la que plasmó sus impresiones que comenzaron cuando llegó a México.

■ Las frutas de *La vendedora*

■ El local de fruta que Olga pintó (véase la Figura 1) corresponde a un puesto semipermanente, que en México suelen establecerse alrededor de los mercados. Las frutas están acomodadas en el piso, otras sobre lo que parece ser paja y algunas esteras azules, y también hay más dispuestas sobre huacales de huejote (*Salix oxylepis*), cestos y canastos de mimbre (*Salix chilensis*, *Taxodium mucronatum*), carrizo (*Arundo donax*) y sobre cajones de tablas (*Pinus* sp.).



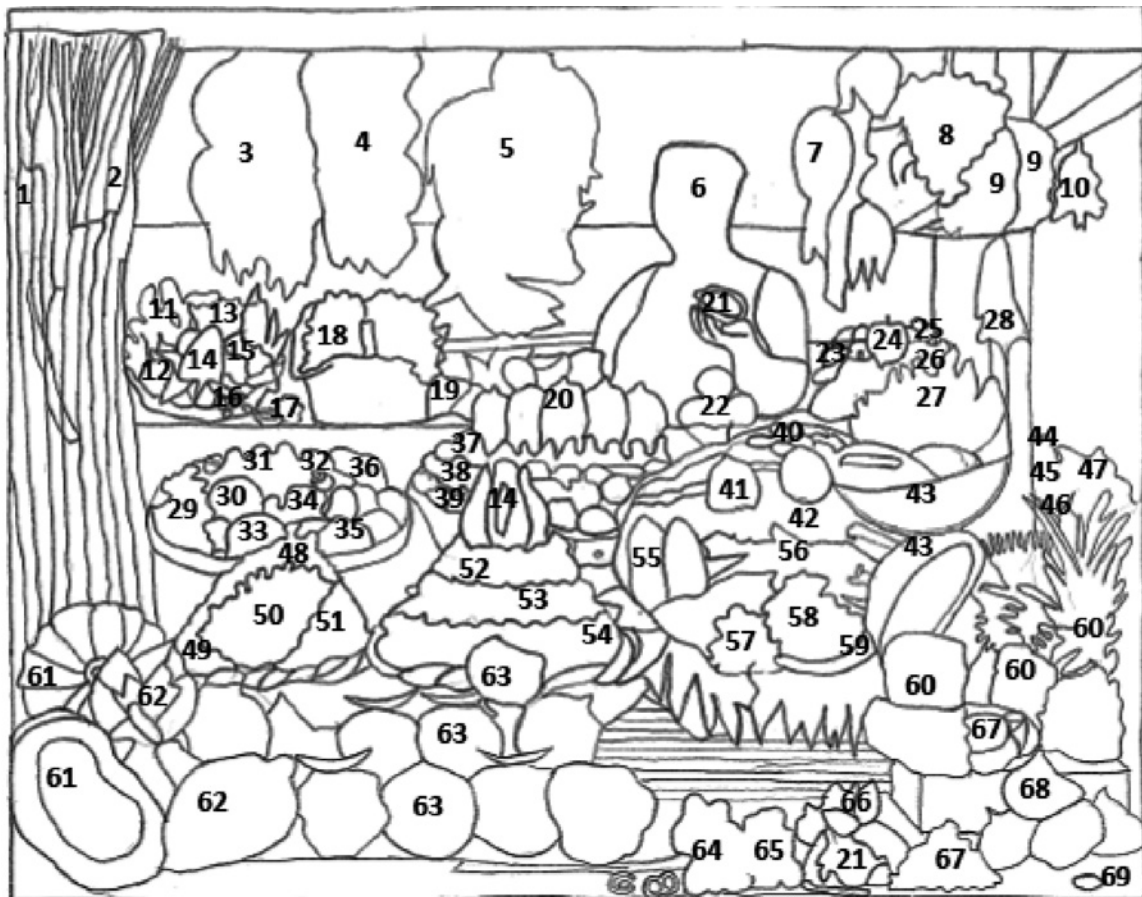
Figura 1. *La vendedora de frutas*, de Olga Costa (1951, óleo sobre lienzo, 2.7 × 1.5 m, Museo de Arte Moderno, Ciudad de México). De acuerdo con el museo, no se ha localizado al propietario de los derechos de la pintura [12/07/2019].

Los canastos están adornados con pliegos de colores (que en México se llama papel de China) y con hojas de palma camedor (*Chamaedorea* sp.).

Si bien la encomienda de Gamboa estimaba a las frutas como actrices de la pintura, Olga colocó a la vendedora como lo sustantivo del cuadro; por eso domina al centro de la imagen. Representa a *Homo sapiens*, la especie que hace posible la domesticación y, con ello, la generación de la agrobiodiversidad exhibida. Está vestida de manera simple y práctica, con elegantes aretes de forma de escudo o *chimalli*. A diferencia de algunas pinturas de caballete de Diego Rivera, aquí la mujer no está recogiendo flores ni está de espaldas; aparece de frente en el foco central de la imagen, con una mirada serena y una sonrisa que muestra orgullo, fuerza y poder. Olga coloca a *La vendedora* como una mujer dueña de su espacio, con fuerza de espíritu y dignidad. Su personalidad y carisma afloran al contacto visual del posible comprador de fruta.

Era muy difícil que Olga pudiera incluir las cerca de 200 especies de frutas nativas de México, pero usó el lienzo con maestría para lograr representar la riqueza frutícola más conocida en el centro del país. Dominan los colores amarillos, contrastados con rojos y cobrizos. La perspectiva de profundidad la logró con piñas, cocos, calabazas y papayas en la parte inferior de la pintura, en contraste con las frutas pequeñas en la parte media del puesto; luego, una diadema de cañas, plátanos, guayas, guajes y pirules provoca que *La vendedora* destaque aún más.

La crítica de arte Carly Goodkin (2013) percibió lo salvaje e indómito en la fruta pintada, pero el cuadro representa exactamente lo contrario. *La vendedora* muestra el poder de la humanización de la biota al sostener con elegancia, en su mano izquierda, una pitaya orejona, como una muestra de lo que la especie humana ha transformado. El arreglo de la fruta en el puesto lo dispuso para atraer y provocar el gusto, la vista, el olfato, la añoranza y el sentido





estético de las marchantes, motivadas seguramente con un ondulante “¡Pásele! ¿Qué va a llevar? ¿Qué se le ofrece?”

Olga recibió 5 000 pesos de pago (unos 58 000 pesos actuales). El cuadro maravilló a Gamboa, quien le pidió dos pinturas más en ese estilo: una que plasmara la riqueza de los panes mexicanos y otra de dulces tradicionales, pero Olga se negó a hacerlas.

La artista registró en su cuadro una riqueza biológica de 58 especies de frutas (véase el Cuadro 1).

Algunas se repiten como variantes; por ejemplo, se aprecian cuatro de plátano (costillón, hembra, macho y morado); tres de caña (morada, blanca y piñatera); dos de manzana (roja y amarilla); dos de mango (criollo y manila); dos de aguacate (tierra media y alta); dos de pera (común y verde); dos de ciruela mesoamericana (amarilla y roja), y dos de guayaba (blanca y rosa). Al sumar las especies y sus variantes, la riqueza total en el cuadro es de 69 diferentes (incluida la especie humana).

Cuadro 1. Las especies en *La vendedora de frutas* de Olga Costa.

Núm.	Nombres*		Región de origen (Harlan, 1992)
	Común	Científico	
1	Caña blanca	<i>Saccharum officinarum</i> L.	Oriente lejano
2	Caña morada	<i>Saccharum officinarum</i> L.	Oriente lejano
3	Plátano costillón	<i>Musa paradisiaca</i> L.	Oriente lejano
4	Plátano hembra	<i>Musa paradisiaca</i> L.	Oriente lejano
5	Plátano macho	<i>Musa paradisiaca</i> L.	Oriente lejano
6	Humana	<i>Homo sapiens</i> spp. <i>sapiens</i>	África
7	Banana	<i>Musa acuminata</i> Colla	Oriente lejano
8	Coyol	<i>Acrocomia aculeata</i> (Jacq.) Lodd. ex Mart.	Mesoamérica
9	Pirul	<i>Schinus molle</i> L.	Sudamérica
10	Guaya	<i>Melicoccus bijugatus</i> Jacq.	Mesoamérica
11	Mango	<i>Mangifera indica</i> L.	Oriente lejano
12	Pera verde	<i>Pyrus communis</i> L.	Oriente lejano
13	Capulín	<i>Prunus serotina</i> Ehrh.	Mesoamérica
14	Mamey	<i>Pouteria sapota</i> Moore y Stearn	Mesoamérica
15	Tamarindo	<i>Tamarindus indica</i> L.	África
16	Tetetz de Mezcala	<i>Neobuxbaumia mezcalaensis</i> Backeb.	Mesoamérica
17	Guamúchil	<i>Pithecellobium dulce</i> Benth.	Mesoamérica
18	Uva	<i>Vitis vinifera</i> L.	Oriente cercano
19	Pitaya	<i>Stenocereus pruinosus</i> Buxb.	Mesoamérica
20	Cidra	<i>Citrus medica</i> L.	Oriente lejano
21	Pitaya orejona	<i>Hylocereus undatus</i> Britton y Rose	Mesoamérica
22	Naranja	<i>Citrus sinensis</i> Osbeck	Oriente lejano
23	Higo	<i>Ficus carica</i> L.	Oriente cercano
24	Chirimoya	<i>Annona cherimola</i> Mill.	Mesoamérica
25	Guayaba fresa	<i>Psidium littorale</i> Raddi	Mesoamérica
26	Durazno	<i>Prunus persica</i> Batsch	Oriente cercano
27	Plátano morado	<i>Musa paradisiaca</i> L.	Oriente lejano
28	Guaje	<i>Leucaena esculenta</i> Benth.	Mesoamérica
29	Kumquat	<i>Fortunella margarita</i> Swingle	Oriente lejano

Núm.	Nombres*		Región de origen (Harlan, 1992)
	Común	Científico	
30	Pomelo	<i>Citrus maxima</i> Merr.	Oriente lejano
31	Aguacate de tierra media	<i>Persea americana</i> L.	Mesoamérica
32	Aguacate de tierra alta	<i>Persea americana</i> L.	Mesoamérica
33	Melón	<i>Cucumis melo</i> L.	Oriente cercano
34	Caqui	<i>Diospyros kaki</i> L.	Oriente lejano
35	Zapote negro	<i>Diospyros nigra</i> Perrier	Mesoamérica
36	Mango manila	<i>Mangifera indica</i> L.	Mesoamérica
37	Pera	<i>Pyrus communis</i> L.	Oriente cercano
38	Manzana roja	<i>Malus domestica</i> Borkh.	Oriente cercano
39	Manzana amarilla	<i>Malus domestica</i> Borkh.	Oriente cercano
40	Limón mexicano	<i>Citrus aurantifolia</i> Swingle	Oriente lejano
41	Saromuyo	<i>Annona squamosa</i> L.	Mesoamérica
42	Tejocote	<i>Crataegus mexicana</i> Moc. y Sessé	Mesoamérica
43	Sandía	<i>Citrullus lanatus</i> Matsum. y Nakai	África
44	Ciruela amarilla	<i>Spondias purpurea</i> L.	Mesoamérica
45	Zapote blanco	<i>Casimiroa edulis</i> La Llave	Mesoamérica
46	Ciruela roja	<i>Spondias purpurea</i> L.	Mesoamérica
47	Granada	<i>Punica granatum</i> L.	Oriente cercano
48	Ciruela europea	<i>Prunus domestica</i> L.	Oriente cercano
49	Zarzamora	<i>Rubus leibmanii</i> Focke	Mesoamérica
50	Níspero	<i>Eriobotrya japonica</i> Lindl.	Oriente lejano
51	Fresa	<i>Fragaria ananassa</i> Duchesne	Sudamérica
52	Guayaba blanca	<i>Psidium guajava</i> L.	Mesoamérica
53	Mandarina	<i>Citrus reticulata</i> Blanco	Oriente lejano
54	Lima chichona	<i>Citrus</i> sp.	Oriente lejano
55	Guanábana	<i>Annona muricata</i> L.	Mesoamérica
56	Caña piñatera	<i>Saccharum officinarum</i> L.	Oriente lejano
57	Chicozapote	<i>Manilkara zapota</i> P. Royen	Mesoamérica
58	Granada china	<i>Passiflora ligularis</i> Juss.	Mesoamérica
59	Jinicuil	<i>Inga edulis</i> Mart.	Mesoamérica
60	Piña	<i>Ananas comosus</i> Merr.	Sudamérica
61	Calabaza	<i>Cucurbita moshata</i> Duchesne	Mesoamérica
62	Papaya	<i>Carica papaya</i> L.	Mesoamérica
63	Coco	<i>Cocos nucifera</i> L.	Oriente lejano
64	Xoconostle	<i>Opuntia joconostle</i> A. Web.	Mesoamérica
65	Tuna blanca	<i>Opuntia albicarpa</i> Scheinvar	Mesoamérica
66	Tuna naranjona	<i>Opuntia megacantha</i> Salm-Dyck	Mesoamérica
67	Cacahuete	<i>Arachis hypogaea</i> L.	Sudamérica
68	Jícama	<i>Pachyrhizus erosus</i> Urban	Mesoamérica
69	Guayaba rosa	<i>Psidium guajava</i> L.	Mesoamérica

* La asignación de los nombres comunes y científicos ha sido un reto y se hicieron los mayores esfuerzos por consignar los correctos. Sólo se incluyó un nombre común de entre los varios que cada fruta tiene.



La jícama y la caña, aunque se representan como frutas, botánicamente son una raíz tuberizada y un tallo, respectivamente, y los tetetzos de Mezcala son botones florales. De algunas frutas hay varias formas de presentación; por ejemplo, el coco que Olga pintó cubierto con su fibra, despojado de ella y en porciones listas para comer; de la piña presenta diferentes grados de madurez, además de piña mondada o pelada y rebanada; la jícama también la pintó con cáscara y en rebanadas. Varias frutas están abiertas parcial o totalmente, para despertar el apetito del comprador; entre ellas, la pitaya orejona en la mano de *La vendedora*, también el mamey, la chirimoya, la guanábana, la granada china, la papaya, el coco, el pomelo, los xoconostles, el zapote blanco, la tuna naranjona, y allá, en el último rincón, junto a la firma de Olga, una guayaba rosa.

Aunque Goodkin (2013) afirma que todas las frutas ilustradas son “típicas de Latinoamérica, productos tradicionales sin influencia europea”, no es así, pues hay representantes de varios centros del mundo en donde se originó la agricultura y la civilización. Si bien, sí predominan las frutas de origen mesoamericano (46 %), como tuna, guanábana, papaya, zapote y pitaya; les siguen en importancia las frutas que algún día llegaron de oriente lejano (30%), como limón, naranja, mango, plátano y

caña; así como del oriente cercano (13%): melón, higo, manzana, uva y durazno. El porcentaje de ambas regiones orientales (43.3%) es tan importante como la cantidad de fruta de origen mesoamericano y es muy superior a la cantidad de fruta de origen latinoamericano (6.0%), como piña, cacahuete y fresa. El porcentaje más bajo (4.5%) corresponde a especies de África, como la sandía y el tamarindo, y a este origen se agrega *Homo sapiens*, nuestra especie, representada en la pintura por *La vendedora*.

Juan Antonio Reyes Agüero

Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

reyesaguero@uaslp.mx

Claudia Heindorf

Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

claudia.heindorf@tutanota.com

Juan Rogelio Aguirre Rivera

Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

rogelio.aguirre@uaslp.mx

Lecturas recomendadas

Goodkin, C. (2013), *La desnuda rebelde y el bodegón subversivo: una reinterpretación del arte de Olga Costa y María Izquierdo* (tesis de licenciatura), Claremont, Claremont McKenna College. Disponible en: <http://scholarship.claremont.edu/cmc_theses/759>, consultado el 27 de enero de 2019.

Guadarrama Peña, G. (2011), “Sirenas y naturalezas. Los murales desconocidos de Olga Costa y José Chávez Morado”, *Crónicas*, 14:73-84. Disponible en: <<http://revistas.unam.mx/index.php/cronicas/article/viewFile/24576/23156>>, consultado el 27 de enero de 2019.

Harlan, J. R. (1992), *Crops and man*, 2.ª ed., Wisconsin, American Society of Agronomy.

Mapes, C. y F. Basurto (2016), “Biodiversity and edible plants of Mexico”, en R. Lira, A. Casas y J. Blancas

(eds.), *Ethnobotany of Mexico: Interactions of people and plants in Mesoamerica* (pp. 83-131), Nueva York, Springer.

Morales, S. (1989), “La pintora del color, Olga Costa: de los horrores de su infancia al miedo del homenaje que le rinde el FIC”, *Proceso*, 675:52-53. Disponible en: <<https://publicacionesdigitales.proceso.com.mx/library/filter?years=1989>>, consultado el 27 de enero de 2019.

Stakhnevich, Y. (2011), “Mexico through the Russian gaze: Olga Costa in Guanajuato”, *Bridgewater Review*, 30(2):10-13.

Tibol, R. (2002), *Ser y ver. Mujeres en las artes visuales*, México, Plaza y Janés.



Desde el Conacyt*



Ecosistema Nacional Informático Covid-19 del Conacyt

Desde las primeras noticias sobre la aparición del brote de un nuevo coronavirus, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) estableció una vinculación cercana y una coordinación constante con las autoridades de salud.

Como cabeza de sector en ciencia, tecnología e innovación y como integrante del Consejo de Salubridad General, el Conacyt ha contribuido, desde la investigación científica y el desarrollo tecnológico, en la búsqueda de soluciones para combatir la pandemia de Covid-19 en México, en colaboración con las políticas establecidas por la Secretaría de Salud.

Sobresale el lanzamiento de un Pronaii (Proyecto Nacional de Investigación e Incidencia) específico para el Covid-19. El objetivo de este Pronaii consiste en convocar a la comunidad científica y a los sectores privado y social a presentar propuestas y colaborar de manera conjunta en el combate a la pandemia.

Uno de los logros del Pronaii Covid-19 es el Ecosistema Nacional Informático Covid-19 (ENI/COVID-19), que utiliza herramientas en ciencia de datos, tecnologías inteligentes y cómputo para generar información que ayuda a la toma de decisiones sobre la pandemia, sobre 5 ejes principales:

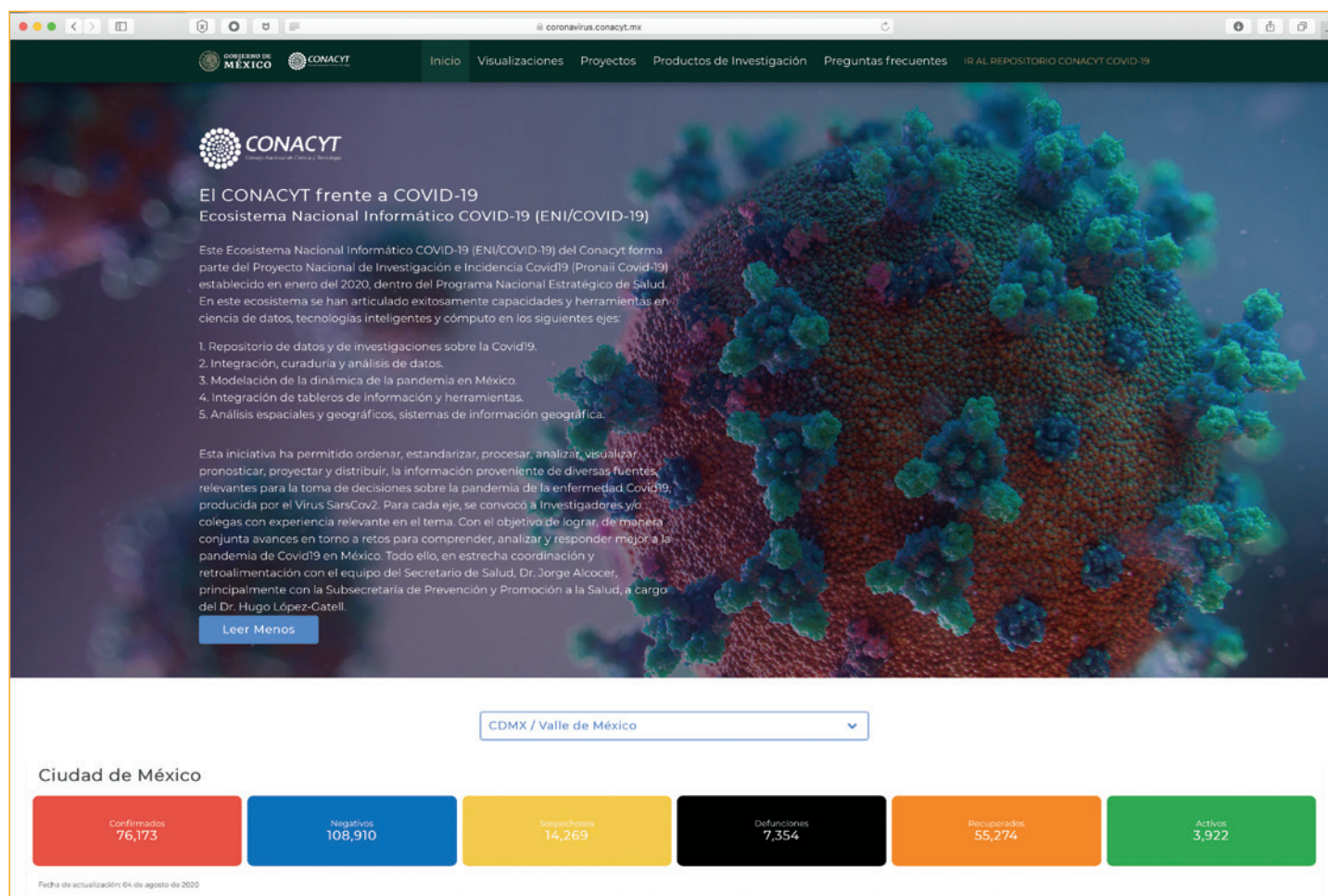
- Repositorio de datos y de investigaciones sobre la Covid-19
- Integración, curaduría y análisis de datos
- Modelación de la dinámica de la pandemia en México
- Integración de tableros de información y herramientas
- Análisis espaciales y geográficos, sistemas de información geográfica



Ejes del ENI/COVID

■ Para el desarrollo de cada eje del ENI/COVID se convocó a investigadores y/o colegas con experiencia relevante en el tema para comprender, analizar y responder mejor a la pandemia de la Covid-19, la enfermedad causada por el virus

* El contenido de esta sección es responsabilidad del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.



Página de internet: <https://coronavirus.conacyt.mx>

SARS-CoV-2. El trabajo en cada uno de los ejes mantiene una estrecha colaboración y retroalimentación con el equipo del Secretario de Salud, Dr. Jorge Alcocer; principalmente, con la Subsecretaría de Prevención y Promoción a la Salud, a cargo del Dr. Hugo López-Gatell.

Repositorio de datos y de investigaciones sobre la Covid-19

Es el medio de Acceso Abierto que el Conacyt ha habilitado para la consulta de recursos de información de libre acceso sobre el Covid-19. Con el apoyo del Centro de Investigación e Innovación en TIC (INFOTEC, Centro Público de Investigación del Conacyt), se pusieron a disposición del público los recursos de información derivados de las investi-

gaciones realizadas en todo el mundo referentes a esta epidemia global, con la intención de mantener informada a la sociedad a través de materiales de consulta y artículos científicos de calidad sobre este tema, provenientes de diversas editoriales y fuentes que han abierto los resultados y recursos preliminares de investigaciones.

Actualmente, incluye un gran número de trabajos científicos que documentan diferentes aspectos moleculares y epidemiológicos de evolución de la Covid-19. Este repositorio cuenta ya con una gran cantidad de visitas.

Integración, curaduría y análisis de datos

En estrecha colaboración con la Secretaría de Salud, el CentroGeo y el Centro de Investigación

en Matemáticas (CIMAT), Centros Públicos de Investigación del Conacyt, la UNAM y la CONABIO se trabaja en una plataforma de ciencia de datos geolocalizados e inteligencia artificial capaz de arrojar información predictiva de modelación epidemiológica, con patrones espacio-temporales.

Esta herramienta aportará análisis complementarios a los informes técnicos que ya elabora la Secretaría de Salud, con información crucial para definir los lineamientos de las políticas públicas ante la pandemia. Cabe señalar que, para este proyecto, el Conacyt trabaja de manera coordinada con los bancos de datos del Instituto de Diagnóstico y Referencia Epidemiológicos (INDRE).

■ **Modelación de la dinámica de la pandemia en México**

■ La Covid-19 es una enfermedad contagiosa cuya dinámica depende de aspectos muy complejos, por ello se utilizan modelos matemáticos útiles para predecir y pronosticar cómo van evolucionando los picos epidémicos en las diferentes regiones del país.

Modelo AMA: permite estimar la evolución del número de casos de la enfermedad en zonas metropolitanas a partir de los registros de los casos confirmados diarios, las defunciones acumuladas y la demanda hospitalaria diaria, dividida en camas normales y de unidades de cuidados intensivos, publicados diariamente por la Secretaría de Salud. Este modelo ha sido desarrollado por el equipo conformado por Marcos Capistrán y Andrés Christen, del Centro de Investigación en Matemáticas (Cimat, Centro Público de Investigación del Conacyt), y por Antonio Capella, del Instituto de Matemáticas de la UNAM.

Modelo Gompertz: modelo flexible que permite proyectar regiones en diferentes etapas de la pan-

demia; además, es adaptable al incorporar intervenciones; sigue la dinámica de su ecuación diferencial correspondiente, por lo que fue tomado como un modelo empírico con propiedades afines al comportamiento de una epidemia. Fue diseñado por los doctores Rogelio Ramos y Graciela González del Cimat.

■ **Integración de tableros de información y herramientas**

■ Se trata de tableros de datos sobre la información del nuevo coronavirus publicados en la plataforma oficial del Gobierno de México, para transmitir, de forma amigable, información sobre el comportamiento de la pandemia en el territorio nacional. Fueron desarrollados por el equipo del Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial (Centro Geo, Centro Público de Investigación del Conacyt), integrado por los doctores Pablo López y Oscar Siordia.

■ **Análisis espaciales y geográficos, sistemas de información geográfica**

■ Consiste en análisis espaciales y geográficos, a través de sistemas de información geográfica, que permiten encontrar municipios con altas tasas de casos confirmados y aquellos lugares vulnerables donde es probable que se disperse la pandemia

Gracias a esta iniciativa, ahora es posible ordenar, estandarizar, procesar, analizar, visualizar, pronosticar, proyectar y distribuir la información proveniente de diversas fuentes para la toma de decisiones sobre la actual pandemia.

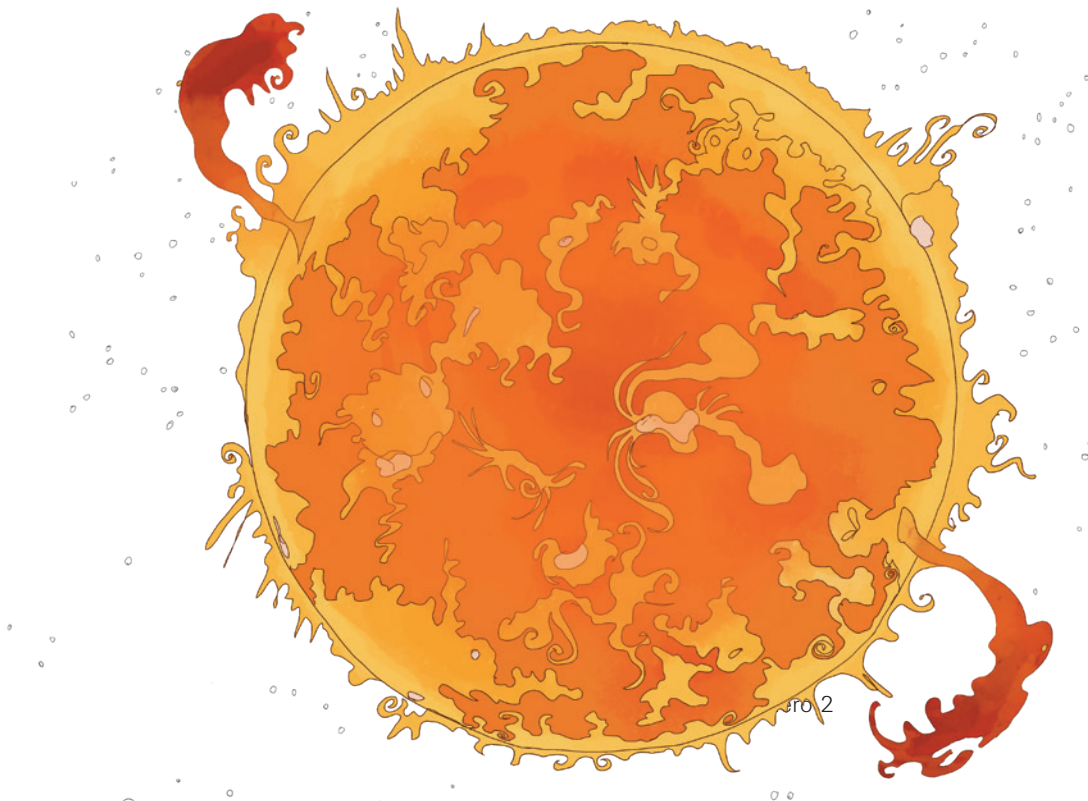
<https://coronavirus.conacyt.mx/>

Tiempos difíciles para la estrella Betelgeuse

La estrella Betelgeuse está destinada a producir una supernova dentro de los próximos cien mil años, al término de su fase actual como supergigante roja. A finales de 2019 causó interés e inquietud por una rápida y marcada pérdida de brillo; esto abrió la especulación de que su explosión podría estar próxima y, en respuesta, impulsó la pronta investigación de este fenómeno.

La estrella alfa de la constelación de Orión

Betelgeuse debió ser conocida por los humanos desde que empezaron a identificar a los astros más brillantes del firmamento. Es la estrella brillante roja que marca el hombro de Orión, el cazador, una de las constelaciones más conspicuas del cielo invernal (véase la Figura 1), fácilmente identificable por las





dito: IAU, <www.iau.org/public/themes/constellations/>.

tres estrellas alineadas que conforman “el cinturón”: Anilam (ϵ Ori), Alnitak (ζ Ori) y Mintaka (δ Ori). Orión es coronada al noreste por Betelgeuse (clasificada como α Orionis, la estrella más brillante de la constelación, en el *Almagesto* de Ptolomeo), y al suroeste por la gigante azul Rigel (β Ori). Tanto Betelgeuse como Rigel figuran entre las “estrellas

náuticas”, guías indispensables de los navegantes y exploradores de otras épocas.

Sin embargo, desde noviembre de 2019, la pérdida de brillo de una estrella tan notoria como Betelgeuse no podía pasar desapercibida, incluso en tiempos en que la noche es desbordada por la luz urbana y se convierte en una extensión del día.

■ Caracterización de las estrellas

■ El brillo de un objeto celeste se cuantifica con su magnitud aparente. El sistema de magnitudes tiene su origen en la percepción de los astros por el ojo humano, que ordenó a las estrellas por brillo decreciente de la primera a la sexta magnitud. El advenimiento de las placas fotográficas a finales del siglo XIX, y de los dispositivos optoelectrónicos un siglo después, hizo necesario refinar el esquema pretelescópico de magnitudes con sistemas fotométricos que definen **bandas** del espectro electromagnético que coinciden con nuestra percepción de los colores. Uno de los primeros sistemas fue el UBVR_I, desarrollado por Harold Johnson y Alan Cousins, que considera el azul (B, por *blue*), visual (V) y rojo (R), así como las extensiones inmediatas al ultravioleta (U) y al infrarrojo (I).

Estos sistemas fotométricos heredan el carácter logarítmico de la respuesta del ojo humano, por lo que corresponde un aumento de cinco magnitudes a una disminución de brillo de un factor de cien; además, emplean como referencia la estrella Vega, la cual define también un color estelar estándar, al ser su magnitud cero en todas las bandas.¹ El sistema de magnitudes le asigna a Betelgeuse una magnitud visual nominal $V = 0.42$, equivalente a 68% del brillo de Vega en la misma banda. El color rojo de α Orionis se traduce en una magnitud negativa en las bandas roja e infrarroja ($R = -1.17$, $I = -2.45$). Así, Betelgeuse es la estrella más brillante del cielo nocturno en las extensiones del sistema fotométrico al infrarrojo.

Las diferencias entre las magnitudes de una misma estrella en dos bandas definen los *índices de color*. Por ejemplo, el índice (B–V) es igual a +1.85 para la roja Betelgeuse, +0.63 para el Sol, y –0.03 para Rigel. El color está estrechamente ligado a la temperatura en la superficie: las estrellas azules, como Rigel, son las más calientes; las rojas son las más frías; las estrellas amarillas, como el Sol, tienen temperaturas intermedias. Estas temperaturas superficiales se cuantifican en grados Kelvin: la temperatura de Ri-

gel es 12 100 K,² la del Sol es 5 770 K, y la de Betelgeuse, 3 600 K.

Asimismo, las estrellas se diferencian por sus luminosidades; esto es, se mide la cantidad de energía emitida como radiación por unidad de tiempo. Su estimación requiere medir el brillo (la magnitud aparente) y la distancia. Dichas luminosidades estelares abarcan un rango muy amplio de valores: las estrellas más luminosas, como Betelgeuse, superan al Sol por factores de diez mil, o incluso cien mil, mientras que el Sol es a su vez diez mil veces más luminoso que las estrellas más frías y pequeñas. La temperatura (T) y las dimensiones de la estrella (el radio, R) se relacionan directamente con la luminosidad (L):

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

En la ecuación, σ es la **constante de Stefan-Boltzmann**. Así, Betelgeuse, una estrella más fría pero mucho más luminosa que el Sol, tiene necesariamente dimensiones mucho mayores. El diámetro físico de Betelgeuse resulta ser enorme: unas 880 veces el del Sol. Es un ejemplo prototípico de una estrella supergigante roja.

■ El diagrama HR y la evolución estelar

■ Uno de los grandes logros de la astrofísica contemporánea fue comprender la naturaleza de las estrellas a partir de la clasificación presentada por Ejnar Hertzsprung y Henry Russell alrededor de 1910. De manera independiente, ambos científicos clasificaron a las estrellas en un diagrama de color y luminosidad (véase la Figura 2); notaron que la mayoría de ellas se sitúa en una franja delgada, de inclinación aproximadamente diagonal, que va de estrellas frías (rojas) y poco luminosas a estrellas más calientes (azules) y luminosas. Esta línea se denomina la secuencia principal. El diagrama HR identifica un segundo grupo, menos prominente, de estrellas de alta luminosidad y baja temperatura: la rama de las gigantes. Por encima de las gigantes están algunas cuantas estrellas de luminosidad extrema: las super-

¹ En observaciones posteriores se ha sugerido que Vega es ligeramente variable, lo que motivó al refinamiento de la definición de la magnitud cero.

² A la temperatura en grados centígrados se suma 273.16 para obtener la temperatura en grados Kelvin.

■ Bandas fotométricas

Intervalos de longitud de onda que se emplean en astronomía para medir la luz de los distintos astros.

Por ejemplo, la banda B define la radiación electromagnética con longitud de onda entre 430 y 450 nanómetros. La banda V, entre 541 y 559 nanómetros.

■ Constante de Stefan-Boltzmann

Constante de proporcionalidad entre F , el flujo de energía en forma de radiación electromagnética que emite un cuerpo a una temperatura

T , y la cuarta potencia de la temperatura. La relación $F = \sigma T^4$ se conoce como ley de Stefan-Boltzmann.

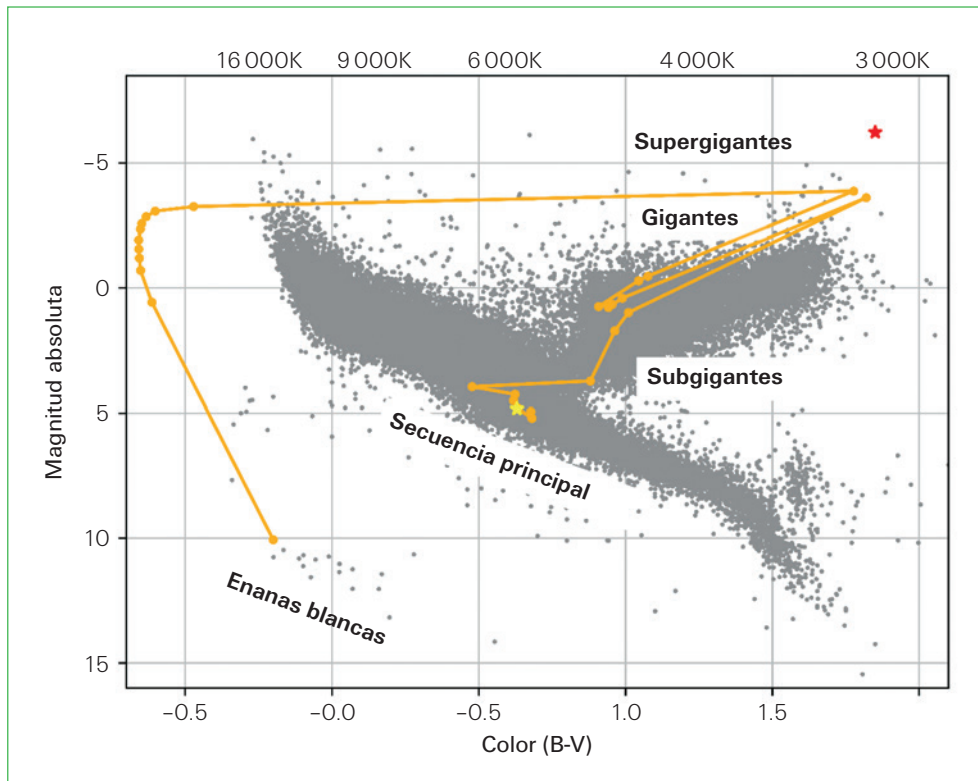


Figura 2. Diagrama Hertzsprung-Russell generado con datos del satélite *Hipparcos*. El eje horizontal muestra el índice de color (B-V), indicador de la temperatura superficial; el eje vertical muestra la magnitud absoluta, indicador de la luminosidad. Se señalan la secuencia principal, las ramas de los gigantes y supergigantes, y las enanas blancas. Se muestra la posición actual del Sol con la estrella amarilla y la de Betelgeuse en rojo. En anaranjado aparece la trayectoria evolutiva del Sol.

gigantes, con Betelgeuse y Antares (α Scorpius) en el extremo rojo del diagrama. Por último, en la parte opuesta se encuentra otro grupo de estrellas azules de muy baja luminosidad, del orden de 1% la solar: las enanas blancas. El diagrama HR motivó el desarrollo de modelos basados en las reacciones nucleares que producen vastas cantidades de energía en el interior de las estrellas.

Entre las décadas de 1930 y 1950 se desarrolló la física nuclear, herramienta teórica necesaria para entender el funcionamiento de las estrellas. Estos astros se forman por la contracción gravitacional de gigantescas nubes de gas, con las partes más densas que alcanzan presiones y temperaturas suficientes para iniciar las cadenas de reacciones nucleares necesarias para producir helio a partir de hidrógeno, y así generar la energía requerida para balancear la fuerza gravitacional. Al alcanzar el equilibrio, la estrella se sitúa en la parte de la secuencia principal corres-

pondiente a su masa: las poco masivas, en la región de estrellas frías y poco luminosas; las muy masivas, en la región de estrellas calientes y altamente luminosas. La masa determina la estructura y la evolución de cada estrella, mientras que la composición química tiene un papel secundario. Bellatrix (γ Ori), estrella que marca el hombro izquierdo de Orión, es un buen ejemplo de una estrella masiva de secuencia principal: con una masa estimada entre ocho y nueve veces la del Sol, Bellatrix tiene una temperatura superficial de 21 500 K y una luminosidad 6 400 veces la solar.

Dada la drástica dependencia de la luminosidad con la masa (L proporcional a $M^{3.5}$, arriba de dos masas solares), el hidrógeno disponible para mantener el equilibrio se consume mucho más rápidamente en las estrellas masivas, que tienen, en consecuencia, una existencia mucho más corta. El Sol ha permanecido en la secuencia principal casi cinco mil mi-

llones de años y seguirá en ella un tiempo similar; en contraste, Bellatrix consumirá el hidrógeno disponible en treinta millones de años; en cambio, una estrella con veinte masas solares, en tan sólo diez millones de años.

Una vez que se agota el hidrógeno en el núcleo, la estrella pierde el equilibrio y su núcleo se comprime bajo su propio peso, mientras que las capas externas de la estrella se expanden. Al término de la fase de secuencia principal, las condiciones internas de las estrellas con suficiente masa permiten que el helio se fusione en carbono, en una reacción nuclear resonante conocida como triple alfa. Las estrellas que brillan gracias a la fusión de helio migran a la región de las gigantes y supergigantes rojas del diagrama HR (así lo hará el Sol; véanse el Recuadro 1 y la Figura 2). Al interior de las estrellas más masivas las

condiciones son eventualmente propicias para que el núcleo de carbono se fusione con helio y forme elementos más pesados. Este proceso llega a un callejón sin salida cuando se produce hierro, el elemento más estable con relación a su masa. Las estrellas que han fabricado un núcleo de hierro están predestinadas a un final catastrófico: explotar como supernova.

■ La existencia breve e intensa de Betelgeuse

■ Se cree que Betelgeuse se formó en la región OB-1a de Orión, situada unos nueve grados al suroeste de la posición actual de Betelgeuse, o cuatro al suroeste del cinturón de Orión. Un poco más especulativa es la hipótesis de que tuvo una compañera, eventualmente engullida, que explicaría la rotación relativamente rápida, dado su tamaño. Betelgeuse pasó unos ocho millones de años consumiendo hidrógeno, como una estrella muy caliente, pero con un tamaño cien veces menor al actual y con la mitad de luminosidad. Entonces debió aparecer en el cielo como una estrella de segunda magnitud marcadamente azul. Pero hace medio millón de años, más o menos, agotó su reserva de hidrógeno y, al empezar a generar energía transformando helio en carbono y oxígeno, fue enrojeciendo y creciendo hasta adquirir las dimensiones actuales. El carbono y oxígeno se han ido acumulando en el centro y comprimiéndose en esta región a la par que desplazan al helio e hidrógeno a las zonas más externas.

Una vez que termine la fusión de helio, el desenlace vendrá rápido. Cuando el centro de la estrella alcance densidades de cientos de kilogramos por centímetro cúbico y temperaturas cercanas a 900 millones de grados, el carbono empezará a reaccionar de formas múltiples y generará elementos como neón, sodio, magnesio y aluminio. Tan sólo mil años después, la densidad será tal que el neón empezará a transmutarse en oxígeno, magnesio y silicio, entre otros elementos. Y siete meses después, las condiciones extremas permitirán que el oxígeno se transforme en una variedad de elementos, particularmente silicio y azufre, y en menor proporción cloro, argón, potasio y calcio. A doce días del final, el núcleo adquirirá temperaturas de 3 300 millones de grados y

Recuadro 1. La vida del Sol

Se estima que el Sol tiene 4 500 millones de años, en los cuales ha brillado generando energía al transformar hidrógeno en helio. Nuestra estrella ha aumentado paulatinamente en tamaño y luminosidad a medida que ha consumido hidrógeno, de forma que su luminosidad será 40% mayor dentro de 3 500 millones de años. Dejará la secuencia principal en unos 6 500 millones de años, con el doble de luminosidad, y se transformará rápidamente en una gigante roja a medida que su núcleo acumule helio inerte, el cual desplazará al hidrógeno que se irá quemando en regiones cada vez más externas. Su núcleo se irá contrayendo mientras que la superficie de la estrella se expandirá hasta alcanzar diez veces su tamaño actual, lo cual culminará en una violenta y súbita ráfaga termonuclear de quemado de helio. Este *flash* de helio hará que el Sol momentáneamente alcance un tamaño mayor a 150 veces el actual, y expulse la cuarta parte de su masa. Entonces comenzará una fase de unos 100 millones de años de relativa estabilidad, en la que el Sol estará transformando helio en carbono. Al agotarse el helio, el Sol tendrá ráfagas episódicas y violentas que terminarán en la expulsión de más material, con lo que se formará una nebulosa planetaria. En el centro de esta nebulosa quedará una estrella enana blanca muy caliente; el resto del núcleo del Sol se colapsará al tamaño de la Tierra e irá enfriándose y apagándose lenta e inexorablemente con el tiempo.

densidades de 40 toneladas por centímetro cúbico, que provocarán el consumo desesperado de silicio en una red compleja de procesos de nucleosíntesis y desembocarán en la copiosa producción de níquel y, sobre todo, hierro.

Cuando se consuma el silicio, el núcleo de hierro será incapaz de generar energía y la gravedad no podrá ser contrarrestada. Roto el equilibrio, Betelgeuse se colapsará violentamente bajo su propio peso hasta comprimir el núcleo a un diámetro de unos 15 km; el núcleo rebotará y eyectará todo el material que caía sobre él con velocidades de decenas de kilómetros por segundo, con lo cual creará una poderosa onda de choque que barrerá todo el material y lo encenderá para desencadenar la supernova. Este tipo de explosiones crean elementos químicos más pesados que el hierro.

Aunque con algo de incertidumbre, se estima que pasarán poco menos de cien mil años antes de que Betelgeuse explote. Al hacerlo se manifestará en nuestro cielo como una espectacular estrella de magnitud -12 , de brillo comparable al de la Luna llena y claramente visible en el día. Lo que quede de su núcleo se colapsará bajo su propio peso, lo cual generará uno de los objetos más exóticos del universo: una estrella de neutrones con 1.5 masas solares en un diámetro de tan sólo 20 kilómetros.

Betelgeuse inestable

 El consenso entre los especialistas es que Betelgeuse se encuentra en la fase de supergigante roja.³ Muchas estrellas en esta fase tienen un comportamiento inestable, como se observa en la que ahora nos interesa. En 1840 fue reportada como una estrella variable por John Herschel, quien estimó un rango de variabilidad de 1 a 1.2 magnitudes. A finales del siglo XX, se estableció que las variaciones contienen una componente periódica, con un aumento de 0.2 a 0.4 magnitudes, que se repite aproximadamente cada 425 días. Hay evidencia de una componente

adicional más lenta, de alrededor de seis años, parcialmente caracterizada. Las disminuciones más fuertes de brillo registradas en años recientes fueron de alrededor de media magnitud, equivalentes a una reducción de 60 % de su brillo nominal.

A mediados de noviembre de 2019 el brillo de Betelgeuse empezó a disminuir día con día, a partir de una magnitud de $V = +0.6$, dos décimos (0.18) superior a la nominal. La pérdida de brillo fue reportada en un telegrama astronómico el 8 de diciembre (ATEL 13341), con un valor $V = +1.12$, equivalente a 52 % del brillo nominal. El 23 de diciembre, el mismo grupo reportó (ATEL 13365) una caída a $V = +1.28$, y el 20 de enero de 2020, a $V = +1.50$ (37 % del brillo nominal). Estos primeros reportes abrieron la especulación de que la estrella estaría sufriendo una contracción súbita, y su explosión podría ser inminente. El brillo mínimo se registró a principios de febrero de 2020 (véase la Figura 3), cuando Betelgeuse alcanzó una magnitud de alrededor de $V = +1.65$, según el reporte de la cuenta de Twitter @betelbot, que fue creada apenas en enero, cuando la estrella ya era noticia y se había vuelto viral. ¡El brillo en el espectro visible había caído a la tercera parte del nominal en cien días!

Motivados en parte por la inquietud del público, así como por un fenómeno de interés intrínseco, varios grupos se dieron a la tarea de realizar observaciones complementarias para entender mejor qué estaba pasando. Estas mediciones, en el infrarrojo, espectros en el visible e incluso imágenes de la superficie de la estrella, han ayudado a comprender este episodio en la vida de α Orionis.

Nueva luz sobre Betelgeuse

 El 24 de febrero de 2020 se reportaron (ATEL 13518) nuevas observaciones de Betelgeuse en el infrarrojo. Las mediciones de las estrellas brillantes tienen la singularidad de requerir telescopios de dimensiones modestas con buena instrumentación; estas observaciones se realizaron en la noche del 20 de febrero con un telescopio de 76 cm a longitudes de onda entre 1.2 y 8.8 micras, muy cerca del mínimo en el visible. Los resultados mostraron un

³ Sima Qian, historiador chino del siglo I a. d. n. e., describió a Sirio como una estrella blanca, a Antares como roja, a Betelgeuse como amarilla y a Bellatrix, azul. Esta nota abrió especulaciones sobre el estado evolutivo de Betelgeuse.

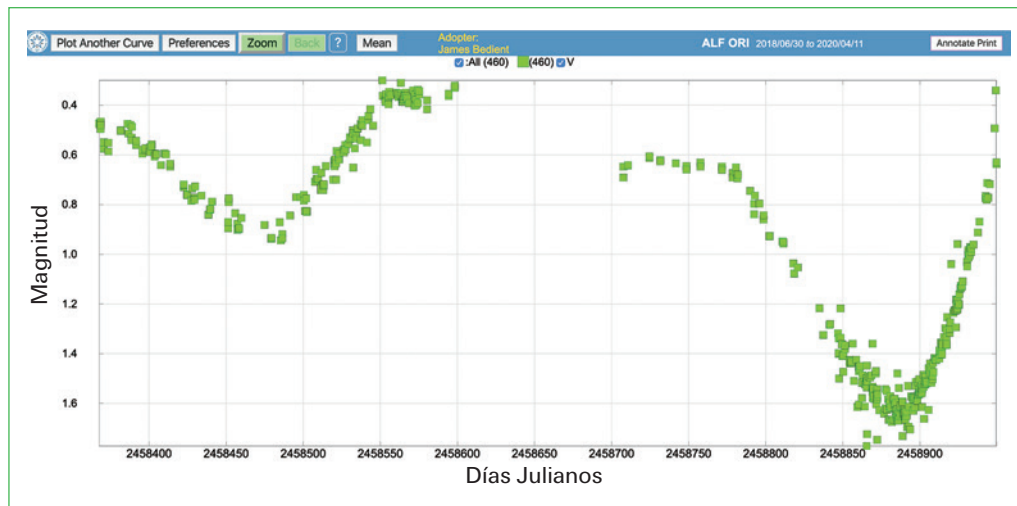


Figura 3. Curva de luz de Betelgeuse, la cual abarca 650 días entre el 30 de junio de 2018 (JD 2458300) y el 10 de abril de 2020 (2458950). Nótese la primera caída a $V=+0.9$ alrededor de JD 2458475 (diciembre de 2018), y el mínimo más profundo, de magnitud $V=+1.6$, sobre JD 2458890 (febrero de 2020). Crédito: generada con datos de astrónomos no profesionales disponibles en el sitio de la American Association of Variable Star Observers (AAVSO, <aavso.org/LCGv2>).

brillo similar al de décadas atrás, lo cual acotó la posible disminución en el infrarrojo a no más de 10 o 20 por ciento.

Por su distancia (190 pársecs = 620 años luz) y sus dimensiones, es posible obtener imágenes de Betelgeuse, aunque con un nivel limitado de detalle. Si bien el disco estelar abarca sólo 1/20 de **segundo de arco** en el cielo,⁴ los mejores telescopios pueden distinguir los rasgos principales de Betelgeuse, así como estudiar su entorno inmediato. En 1921, Albert Michelson y Francis Pease emplearon un interferómetro y reportaron la primera medición del diámetro angular de Betelgeuse en el óptico. Obtuvieron un valor de 0.047 segundos de arco, con 10% de incertidumbre. Observaciones posteriores fueron consistentes con este valor, al mismo tiempo que evidenciaron la presencia de material alrededor de la estrella, expulsado por la misma hasta distancias de diez radios estelares. En 2011 la cámara infrarroja VISIR, instalada en uno de los cuatro telescopios de ocho metros del VLT (Very Large Telescope) en el desierto de Atacama en Chile, mostraron que parte de la emisión en el infrarrojo intermedio se

debe a la absorción y reemisión de luz por el polvo que rodea a la estrella. Las observaciones de febrero 2020 muestran que este flujo no ha variado, lo cual sugiere que el polvo ha seguido recibiendo la misma cantidad de radiación de la estrella.

Por otra parte, las imágenes obtenidas en el ultravioleta por el telescopio espacial *Hubble* en 1996 muestran un halo 2.2 veces mayor al tamaño de Betelgeuse debido a la presencia de una cromósfera extendida alrededor de la estrella. Mediciones en el violeta entre noviembre de 2019 y febrero de 2020 indican que la actividad cromosférica también se ha mantenido estable. Todo indica que el entorno de Betelgeuse continuó siendo iluminado sin un cambio notorio.

Entre las mejores imágenes del disco de Betelgeuse destacan las del sistema de óptica activa SPHERE, montado en uno de los telescopios VLT. Casualmente, este instrumento obtuvo imágenes de la misma estrella en enero de 2019, las cuales permitieron un análisis comparativo con las obtenidas en diciembre de 2019, durante la fase de disminución de brillo. Estas imágenes (véase la Figura 4) muestran de manera muy clara que hay una región oscura en la mitad sur de la estrella, ausente once meses antes.

⁴ El Sol subtiende 1920 segundos de arco, un poco más de medio grado.

Segundo de arco
Ángulo que subtiende un arco de longitud 1/1 296 000 de la circunferencia. Un grado (1/360 de circunferencia) se divide en 60 minutos de arco; un minuto de arco, en 60 segundos de arco.

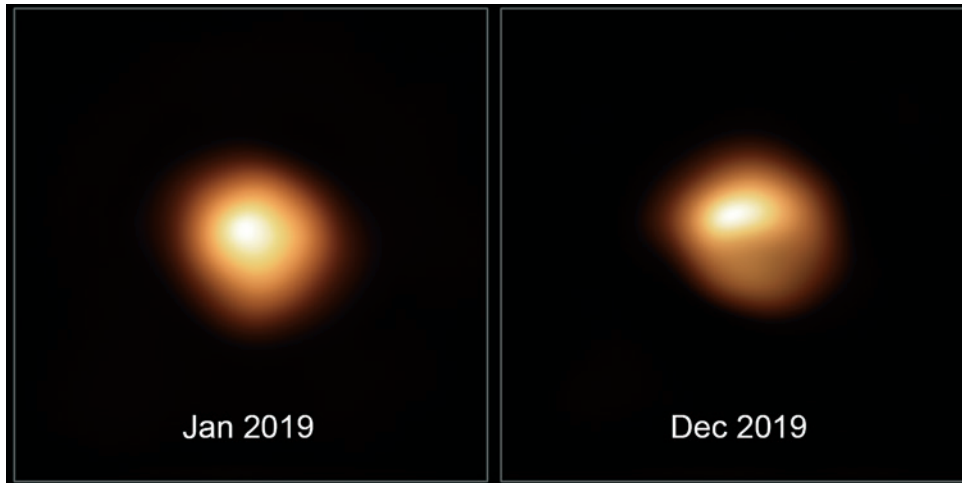


Figura 4. Imágenes de Betelgeuse obtenidas con el sistema SPHERE en uno de los telescopios VLT. A la izquierda, la imagen obtenida en enero de 2019; a la derecha, la de diciembre de 2019, que muestra el hemisferio sur oscurecido. Crédito: ESO, <www.eso.org/public/news/eso2003/>.

Las mediciones espectroscópicas mostraron que la temperatura de la estrella no ha disminuido apreciablemente. Así, el conjunto de observaciones indica que Betelgeuse ha radiado la misma cantidad de energía, y que la pérdida de brillo en el espectro visible muy probablemente se explica por el oscurecimiento parcial de su superficie debido al polvo expulsado por la estrella recientemente, el cual se interpuso en nuestra línea de visión. Los datos sugieren que la distribución de este polvo debe tener dimensiones relativamente grandes, por lo cual absorben la luz de la misma forma a lo largo del espectro visible. Es probable que en los próximos meses se sigan realizando observaciones, las cuales nos permitirán entender aún mejor los procesos que ocurren en esta estrella y en su entorno. Betelgeuse seguirá siendo una estrella especial, aun cuando no seamos testigos del espectáculo de verla explotar como supernova en los próximos miles de años.

Alberto Carramiñana

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
alberto@inaoep.mx

Lecturas recomendadas

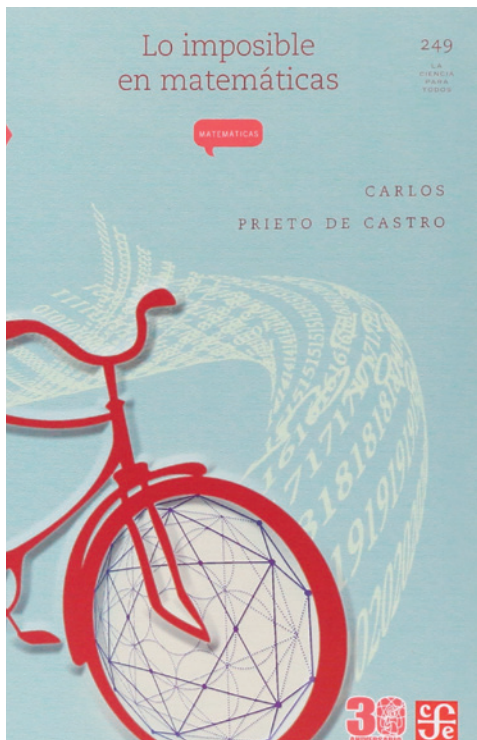
- Dolan, M. M. *et al.* (2016), “Evolutionary tracks for Betelgeuse”, *Astrophysical Journal*, 819:7.
- Gilliland, R. L. y A. K. Dupree (1996), “First image of the surface of a star with the Hubble Space Telescope”, *Astrophysical Journal*, 463:L29-L32.
- Harper, G. M. *et al.* (2017), “An updated 2017 astrometric solution for Betelgeuse”, *Astrophysical Journal*, 154(1):1-6.
- Michelson, A. A. y F. G. Pease (1921), “Measurement of the diameter of α Orionis with the interferometer”, *Astrophysical Journal*, 53:249-259.
- Sackmann, I. J., A. I. Boothroyd y K. E. Kraemer (1993), “Our Sun. III. Present and future”, *Astrophysical Journal*, 418:457.
- SIMBAD (2020), *SIMBAD Astronomical Database*. Disponible en: <<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>>, consultado el 15 de mayo de 2020.
- The Astronomer’s Telegram (2020), *The Astronomer’s Telegram*. Disponible en: <www.astronomersteletgram.org>, consultado el 15 de mayo de 2020.
- Woosley, S. E., A. Heger y T. A. Weaver (2002), “The evolution and explosion of massive stars”, *Rev. Mod. Phys.*, 74(4):1015-1071.

Gabriela Araujo Pardo
Instituto de Matemáticas, Universidad Nacional Autónoma de México



Lo imposible en matemáticas

de Carlos Prieto



Prieto de Castro, C. (2017), *Lo imposible en matemáticas* (La Ciencia para Todos, núm. 249), México, FCE.

El autor de este libro, Carlos Prieto de Castro, es un reconocido y querido matemático del Instituto de Matemáticas de la Universidad Nacional Autónoma de México, quien realizó su doctorado en la Universidad de Heidelberg, en Alemania. Este libro y otros dos más, titulados *Aventuras de un duende en el*

mundo de las matemáticas y *Sarando vuelve al mundo de las matemáticas*, igualmente publicados en la colección La Ciencia para Todos, del Fondo de Cultura Económica, ponen de manifiesto que una de sus pasiones es la divulgación de las matemáticas. Además, es reconocido por impartir elegantes clases, principalmente en áreas de geometría y topología, tanto en licenciatura como en posgrado.

En esta obra, Carlos expone de manera simple y ligera los tres problemas clásicos e irresolubles de la matemática griega:

1. La cuadratura del círculo, que consiste en construir con regla y compás un cuadrado que tenga la misma área que tiene un círculo dado.

2. La duplicación del cubo, que consiste en construir con regla y compás un cubo cuyo volumen sea el doble del de un cubo dado.
3. La trisección del ángulo, que consiste en construir con regla y compás un ángulo que mida la tercera parte de la medida de un ángulo dado.

Adicionalmente, explica otros varios problemas que el autor califica como “imposibles”, los cuales resultan muy interesantes y son fundamentales, pues están relacionados con conteo y números inconmensurables, geometría, embaldosados, álgebra y teoría axiomática.

El libro comienza con una frase que atrapa rápidamente al lector: “Lo importante ocurre siempre en un día cualquiera”. Todos los problemas y discusiones de matemáticas se abordan en el comedor de la casa familiar de Sotero, un joven estudiante de matemáticas cuyo padre es maestro de matemáticas; su madre es una mujer culta que siempre está interesada en los problemas matemáticos que se discuten en casa y su hermana es estudiante de arquitectura. En estas tertulias familiares también aparece Julio, quien estudia ingeniería y es amigo de la infancia de Sotero; precisamente, el libro comienza el día en que Julio y Sotero se conocen.

Cabe destacar que el autor dedica la publicación a la memoria de Sotero Prieto (1884-1935), un reconocido ingeniero y matemático mexicano que apoyó con enorme entusiasmo a la creación de una carrera en matemáticas en México y representó a los mexicanos de manera oficial y extraoficialmente en congresos y otros encuentros en el extranjero.

PRONAI COVID-19

CALENDARIO JUNIO-AGOSTO

Horario: 11:00 a 13:00 hrs
Transmisión por: Facebook LIVE

JUNIO 5

Pronósticos de demanda hospitalaria por brotes epidémicos de Covid-19: Modelo AMA

Dr. Marcos Capistrán Ocampo
Investigador del CIMAT (Conacyt)

Dr. Andrés Christen Gracia
Investigador del CIMAT (Conacyt)

Dr. Antonio Capella Kort
Investigador del Instituto de Matemáticas (UNAM)

Dra. María Elena Álvarez-Buylla Rocas
Directora General del Conacyt

JULIO 3

Métodos moleculares para la detección de SARS-CoV-2

Dr. Carlos Arias Ortiz, IBT-UNAM
Coordinador Pronai de Virología del Conacyt

Dra. Susana López Charretón, IBT-UNAM
Investigadora biomédica especializada en rotavirus

Dra. María Elena Álvarez-Buylla Rocas
Directora General del Conacyt

Con la presencia de encargados de los laboratorios de detección de SARS-CoV-2 de los CPI del Conacyt aprobados por el INDRE

JULIO 10

Sistemas de información geográfica y tableros de datos Covid-19

Mtra. Karime González Zuccolotto
Adscrita al Laboratorio de Datos del GeoInt (Conacyt)

Mtro. Pablo López Ramírez
Investigador del Centro Geo (Conacyt)
Responsable de DataLab (GeoInt/Conacyt)

Dr. Óscar Sánchez Siordia
Coordinador del Centro Geo, Sede Yucatán

Dra. María Elena Álvarez-Buylla Rocas
Directora General del Conacyt

JULIO 17

Modelaje matemático y predicción de la dinámica de Covid-19

Dra. Graciela González Farías
Investigadora del CIMAT (Conacyt)

Dr. Raúl Sierra Alcocer
Investigador de la CONABIO

Dr. Mario Graff
Investigador del Infotec (Conacyt)

Dra. María Elena Álvarez-Buylla Rocas
Directora General del Conacyt

JULIO 31

La pandemia de Covid-19 en perspectiva histórica

Dra. América Molina Del Villar
Directora General del CIESAS (Conacyt)

Dra. Carmen de la Peza Casares
Directora Adjunta de Desarrollo Científico (Conacyt)

AGOSTO 14

Desarrollo de vacunas Covid-19

Dr. Arturo Reyes-Sandoval
Investigador en Jenner Institute (Universidad de Oxford, Reino Unido)

Dra. María Elena Álvarez-Buylla Rocas
Directora General del Conacyt

AGOSTO 28

Inmunidad a SARS-CoV-2 en México

Dr. Constantino López-Macías
Jefe de la Unidad de Investigación Médica en Inmunología (Centro Médico Siglo XXI del IMSS)

Dra. Delia Aideé Orozco Hernández
Directora Adjunta de Desarrollo Tecnológico, Vinculación e Innovación (Conacyt)



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



CONSEJO DIRECTIVO julio 2017 - julio 2020

Presidente

José Luis Morán López

Vicepresidente

Estela Susana Lizano Soberón

Tesorera

María Ester Brandan

Secretarios

Carlos Artemio Coello Coello

Alipio Gustavo Calles Martínez

Presidentes de las Secciones Regionales de la AMC

Sección Centro-Occidente: María Patricia Arias Rozas

Sección Centro-Sur: María del Carmen Cisneros Gudiño

Sección Noreste: Oliverio Santiago Rodríguez Fernández

Sección Noroeste: Alfredo Ortega Rubio

Sección Sur-Sureste: Soledad María Teresa Hernández Sotomayor

En nuestro próximo número
octubre-diciembre de 2020:

MÉXICO ANTE EL SARGAZO

