Apps nucleares

Divulgación de la ciencia y tecnología nucleares para jóvenes

Verano 2016

No. 4

Polvo de estrellas

Por siempre joven

El universo parlante

Acelerar la salud alimentaria

Salud

Protección Radiológica

Industria

Horizonte nuclear

instituto nacional de investigaciones nucleares

Apps nucleares

EDITORIAL

Somos materia estelar
Lydia Paredes Gutiérrez 1

PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

Un ojo en el cielo
Desarrollo de drones 2
Lina Celis del Ángel Centeno

El *gadget* nuclear
Detector de radiación 4
Luis Mondragón Contreras

Inteligencia artificial
Diseño de robots 6
José Armando Segovia de los Ríos

SALUD

Por siempre joven
Radicales libres 8
Martha Patricia Cruces Martínez

Viaje fantástico por la radiación
Dosis de radiación 11
Eva Leticia Rojas Calderón

HORIZONTE NUCLEAR

El universo parlante
Ondas gravitacionales 13
Mario Alberto Rodríguez-Meza

AMBIENTE

Frenar al efecto invernadero
Captura de CO_2 17
Francisco Granados Correa

El costo real de las energías
Cálculo de externalidades 19
Eva Margarita Melgar Paniagua

INDUSTRIA

Descubrir nuevos materiales
Análisis de materiales 21
Rafael Basurto Sánchez

Acelerar la salud alimentaria
Haz de electrones 23
Rubén Gómez Cervantes

DIRECTORIO

Dra. Lydia Paredes Gutiérrez
Directora General

Dr. Federico Puente Espel
Director de Investigación Científica

Dr. Pedro Ávila Pérez
Director de Investigación Tecnológica

Ing. José Walter Rangel Urrea
Director de Servicio Tecnológicos

M.A. Hernán Rico Núñez
Director de Administración

Mtra. María de los Ángeles Medina
Titular del Órgano Interno de Control

Dr. Julián Sánchez Gutiérrez
Secretario Técnico

Concepción creativa y coordinación editorial
Lic. Elizabeth López Barragán
Coordinadora de Promoción y Divulgación Científica

Asistencia de redacción
Victor Octavio Hernández Ávila

Diseño
Patricia Talledos Meléndez

Fotografía
Pável Azpeitia de la Torre
Armando Iturbe German
123RF

Ilustraciones
Angélica Balderrama

Formación e impresión
Comersia Impresiones, S.A de C.V

Apps Nucleares es una publicación semestral de divulgación científica del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) para jóvenes

No. 4, verano 2016
Registro en trámite

elizabeth.lopezbarragan@inin.gob.mx
ININmx
@inin_mx
www.inin.gob.mx

Todos estamos hechos de materia estelar. Ahora sabemos —gracias al avance del conocimiento científico— que todo se cocinó en los corazones ardientes de las estrellas. Por eso, aunque no aparezcas en la televisión o no tengas miles de seguidores en las redes sociales, eres auténticamente una estrella.

Hoy en día, reconocer que el universo es infinito parece una obviedad, pero nuestra perspectiva cósmica es relativamente nueva. Hace apenas un poco más de cuatro siglos nuestro mundo estaba ajeno al resto del cosmos. El universo era lo que veíamos a simple vista. Apenas vislumbrábamos la vastedad del espacio y no teníamos idea de la inmensidad pasmosa del tiempo cósmico.

Empezamos a ensanchar nuestra mirada cuando Galileo miró por primera vez a través de un telescopio. La ciencia y sus instrumentos nos han dado el poder de ver lo que nuestros sentidos no captan. Estamos por cumplir un año apenas de haber detectado por primera vez los "murmullos en el espacio-tiempo" del universo, como han sido reconocidas ahora las ondas gravitacionales, cuya existencia predijo hace 100 años Albert Einstein.

Con el verano no sólo llegan las vacaciones sino también la posibilidad de volver a establecer contacto contigo a través de nuestra publicación de divulgación científica, con la que te invitamos a seguir emocionándonos con la aventura del conocimiento para continuar ensanchando nuestra mirada.

Lydia Paredes Gutiérrez

Es doctora y maestra en Ciencias en Física Médica por la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM). Estudió la Maestría en Ciencias en Ingeniería Nuclear en el Instituto Politécnico Nacional (IPN) y la Ingeniera en Energía por la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). Galardonada con la presea "Ignacio Manuel Altamirano" al mejor promedio de posgrado de la UAEM y el artículo científico del año 2010 por la Sección Latinoamericana de la American Nuclear Society, también ha sido nombrada egresada distinguida de la UAM y reconocida por su trayectoria profesional por la Fraternidad Institutense de la UAEM. A partir de junio de 2016, recibió el cargo de vicepresidente de la Sección Latinoamericana de la American Nuclear Society.

Es directora general del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) desde 2013, y vicepresidente del Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y Tecnología Nucleares en América Latina y El Caribe (ARCAL) del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Admira al artista Miguel Ángel Buonarroti. Una de sus caricaturas favoritas era *Los Supersónicos* y le encanta el pastel de queso con zarzamoras.

Un ojo en el cielo

Lina Celis del Ángel Centeno

La tecnología permite que podamos conocer más sobre el mundo que nos rodea. Los drones, por ejemplo, son capaces de acercarnos a lugares donde no podríamos acceder fácilmente, donde incluso podríamos arriesgar nuestra vida al hacerlo. Para que la ciencia pueda volar más alto, la tecnología aeronáutica ha sido clave.

Desde tiempos ancestrales volar ha sido uno de los anhelos más elevados de los seres humanos. Tú ¿no has soñado alguna vez que vuelas? Desde la mitología griega, con la historia de Dédalo, quien construyó unas alas con plumas y cera para poder escapar de la isla donde estaban presos él y su hijo Ícaro, hasta grandes inventores, como Leonardo da Vinci y los hermanos Wright, le dieron forma a los deseos del hombre de volar, pues sus inventos fueron predecesores de la aviación moderna.

La aparición de la aviación no tripulada se dio en la primera mitad del siglo XIX, aunque su mayor auge lo ha encontrado en este siglo. En el año 2003, cerca de 40 países ya contaban con programas de desarrollo y aplicación de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV, por sus siglas en inglés). Nueve años después, eran más de 50 naciones las que ya utilizaban estos artefactos para reconocimiento de zonas, recopilación de datos de inteligencia militar y ubicación de objetivos.

En la actualidad los UAV, así como los Sistemas de Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS, por sus siglas en inglés) han evolucionado al grado de ser muy comunes en nuestros días y son mejor conocidos como drones.

Seguramente has oído hablar de ellos, pero ¿sabes qué son? Los drones son vehículos capaces de volar y de ser comandados a distancia. Pueden ser tan pequeños como un insecto o tan grandes como un avión chárter. La mayoría de los drones han sido diseñados para llevar dispositivos como cámaras, sensores o algún otro equipo para la captura y transmisión de datos. Pueden ser controlados desde una ubicación remota o volar autónomamente a través de planes de vuelo preprogramados.

Existen diversos tipos de drones, desde los multicópteros (tipo rotatorio), vehículos que poseen un funcionamiento de vuelo semejante al de los helicópteros y pueden ser, dependiendo del número de motores con los que cuenta, monocópteros, tricópteros, cuadricópteros..., hasta los aviones de ala fija en sus diversas versiones.

El interés actual en realizar investigación tecnológica sobre drones se debe principalmente a su versatilidad, pues se adaptan con facilidad a nuevas aplicaciones y presentan grandes ventajas, como una mayor eficiencia energética y un significativo menor costo de operación comparado con los sistemas tripulados.

Las aplicaciones actuales de los drones son amplias y variadas, por ejemplo, en seguridad (facilitan las operaciones de seguridad o preservar pruebas), búsqueda y rescate (prevención y control de incendios, seguridad civil, búsqueda y rescate de personas), vigilancia (apoyo en el control de manifestaciones, actos públicos, oleoductos, instalaciones, movilidad, tráfico), video y fotografía aérea (eventos, películas, videos), inspecciones (líneas eléctricas, turbinas de viento, tuberías), reconocimiento geográfico (mapas y mallas, planificación urbana), sistema de envío no tripulado (traslado de paquetes, medicinas, víveres), monitoreo ambiental (muestras de agua en ríos y lagos, monitoreo agrícola, medición y vigilancia de la contaminación ambiental), ciencia e investigación (observar fenómenos naturales, como una erupción volcánica o documentar una excavación arqueológica) y muchas otras.

La industria nuclear no podía quedarse atrás con respecto de los usos de los drones, ya que representan un área de oportunidad, principalmente como una medida contra emergencias radiológicas. Los drones pueden emplearse en ambientes de altas toxicidades químicas y radiológicas sin poner en riesgo vidas humanas. Por ejemplo, en la central nuclear de Fukushima, después del accidente, han sido empleados para recopilar cifras

La mayoría de los drones han sido diseñados para llevar dispositivos como cámaras, sensores o algún otro equipo para la captura y transmisión de datos. Pueden ser controlados desde una ubicación remota o volar autónomamente a través de planes de vuelo preprogramados.

exactas de los niveles de radiación alrededor de la central nuclear, sin exponer a personal para realizar estas mediciones.

El Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) ha considerado de suma utilidad contar con un equipo de este tipo para el apoyo en situaciones de emergencia radiológica, en la vigilancia rutinaria de las instalaciones nucleares, así como en los casos de robo de material radiactivo.

El Departamento de Automatización e Instrumentación del ININ ha desarrollado un dron con la capacidad de medir radiación (en particular, para casos de emergencia radiológica). Esta aeronave está instrumentada con un detector de radiación gamma y un sistema de transmisión de datos y video de alta resolución en tiempo real, lo que le permite inspeccionar y conocer los niveles de radiación en las zonas de emergencia, ayudando a evitar la exposición innecesaria del personal de rescate o de la población. Además, es capaz de desarrollar vigilancia en trayectorias predefinidas, es decir, puede realizar patrones de vuelo y seguimiento, que son de utilidad en el levantamiento de niveles de dosis radiación en grandes superficies de terreno, con la posibilidad de generar sus respectivos mapas.

Los drones desarrollados en el ININ son útiles en múltiples áreas, ya que facilitan las actividades cotidianas de monitoreo y análisis de instalaciones, y son capaces de salvaguardar vidas al utilizarse en situaciones de emergencia. La tecnología de los drones nos da nuevas alas para afrontar los retos del futuro.

Lina Celis del Ángel Centeno

Estudió Ingeniería Electrónica en Instrumentación en el Instituto Tecnológico de Minatitlán (ITM). Está orgullosa de haber desarrollado el Sistema de Control para el Reactor Nuclear Colombiano IAN-R1, siendo esa la primera vez que México exportó tecnología nuclear.

Uno de sus libros favoritos es *El Principito* de Antoine Saint-Exupéry. Le encantan las albóndigas al chipotle y disfruta en general de la comida. Su signo zodiacal es Virgo. Admira a Leonardo da Vinci, ya que lo considera un genio universal con una imaginación infinita y una capacidad inventiva asombrosa. Practica golf los fines de semana.

El *gadget* nuclear

Luis Mondragón Contreras

¿Los *smartphones* y la tecnología nuclear juntos? Sí, aunque no lo creas así es. La investigación enfocada a la protección radiológica está aprovechando la oportunidad de utilizar los *gadgets* móviles. Así, a través del mismo aparato con el que escuchas música, ves videos, mandas mensajes y hablas por teléfono, actualmente es posible detectar y medir la radiación en el ambiente.

Los *smartphones* se han convertido en artefactos de uso diario. Prácticamente todos tenemos uno. Su popularidad se debe a que un solo dispositivo cumple con diversas funciones: además de la más básica como hablar por teléfono o mandar mensajes, también puede reproducir música, tomar fotos, jugar videojuegos y utilizar redes sociales. Y como te imaginarás la tecnología nuclear también está presente en estos aparatos.

Como sabes la radiación nuclear es la emisión espontánea de partículas o fotones provenientes de núcleos de átomos inestables. Se encuentra presente en el ambiente que nos rodea, e incluso dentro de nuestro cuerpo tenemos elementos radiactivos como el Carbono-14 (^{14}C) y el Potasio-40 (^{40}K). La radiación también puede ser producida de manera artificial (por ejemplo, en máquinas de rayos X o aceleradores de partículas). Una de sus características principales es que no tiene color, sabor, olor, textura ni sonido. Por ello, es imperceptible para los sentidos. De manera que si una persona se encuentra dentro de un campo de radiación, puede pasarle desapercibido.

El ININ ha diseñado un módulo que permite usar un teléfono celular o una tableta como un monitor de radiación de bajo costo para la detección y medición de la radiación: una aplicación en protección radiológica al alcance de la mano.

El Departamento de Electrónica de la Gerencia de Sistemas, del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), ha diseñado un módulo que permite utilizar un teléfono celular o una tableta como un monitor de bajo costo para la detección y medición de la radiación: una aplicación en protección radiológica al alcance de la mano. ¿No te parece sorprendente?

Para que un teléfono celular o tableta pueda utilizarse como monitor de radiación es necesario adicionarle un módulo independiente que tiene la capacidad de detectar la radiación, medirla y enviar los datos correspondientes al dispositivo móvil, además de instalarle una aplicación que sirve para el manejo gráfico y funcional del monitor de radiación, aprovechando algunas de las características de los dispositivos de última generación, como sus pantallas táctiles para el despliegue y manejo de información, capacidad para el procesamiento y almacenamiento de datos, conectividad (*bluetooth, wi-fi* o a redes 4G, 3G y 2G) para transmisión de datos y la función del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), entre otras.

El módulo de detección está constituido por un detector de radiación, una fuente de alto voltaje, un circuito amplificador y acondicionador de pulsos, una tarjeta Arduino (plataforma de código abierto de *software* y *hardware* libres), con conectividad *bluetooth* y una batería de 9 voltios (v).

El detector de radiación es tipo Geiger-Muller (detector gaseoso usado para medir niveles de radiación). Se compone de un tubo de metal, un filamento de acero inoxidable (que se encuentra en el centro del tubo) y una ventana de mica. Las partículas que detecta pasan únicamente a través de la ventana de mica que está enfrente del detector y los fotones pueden penetrar por cualquier parte del tubo. También contiene gas neón a baja presión, pues cuando la radiación interacciona con el gas puede ionizarlo (liberar algunos electrones de sus átomos) y de esta manera producir pulsos eléctricos.

La tarjeta Arduino incorpora un microcontrolador que es fácil de programar, por lo que tiene múltiples aplicaciones en el desarrollo de proyectos electrónicos. La tarjeta tiene la función de contar el número de pulsos en el monitor de radiación, provenientes del circuito acondicionador en un intervalo de tiempo definido (por segundo o minuto) y después envía el dato a un dispositivo móvil mediante una conexión inalámbrica.

Al igual que las computadoras personales, los dispositivos móviles tienen un sistema operativo que se encarga del manejo de las funciones y programas propios del teléfono o la tableta. La aplicación para el monitor de radiación se desarrolló en el lenguaje de programación Java para dispositivos móviles con sistema operativo Android, debido a su popularidad y por ser de código abierto (libre).

Lo que hace a este módulo más versátil para detectar la radiación es su capacidad de mostrar gráficamente la información recolectada, gracias a la capacidad de procesamiento, tanto del módulo como de los *gadgets* portátiles utilizados. También hace posible medir la radiación en diferentes unidades, además de realizar conversiones fácilmente. Es aproximadamente 60% más pequeño que otros monitores y es capaz de detectar partículas (radiación alfa y beta) o fotones (gamma).

La tecnología móvil pasa por un momento importante, debido a su portabilidad, accesibilidad y bajo costo, y por supuesto a las variadas y múltiples aplicaciones que existen para ellos. Por ello, el ININ ha desarrollado este módulo para detectar y medir radiación en el ambiente a través de uno de estos populares dispositivos móviles.

Luis Mondragón Contreras

Estudió la Licenciatura, Maestría y Doctorado en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Toluca (ITT).

El libro *Ética para Amador* es uno de sus preferidos. Le gusta la comida mexicana y el pan de dulce. Su signo es Piscis. En su infancia le gustaban *Los Picapiedra, Don gato y su pandilla* y *La liga de la justicia*. Disfruta de salir a correr e ir al cine. Admira a Thomas Alva Edison.

Inteligencia artificial

José Armando Segovia de los Ríos

Los robots y sistemas automatizados se han vuelto fundamentales en prácticamente todas las industrias y en múltiples laboratorios de investigación. El Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) cuenta con un robot semiautónomo capaz de cumplir con las misiones que le sean encomendadas.

El término "robot" fue usado por primera vez en 1920 en el teatro, en una obra llamada *Robots Universales Rossum* (R.U.R.) de Karel Capek, que trata sobre seres artificiales y su interacción con el mundo, aunque la idea —como casi todo en nuestra civilización— data de la antigua Grecia y se ha mantenido vigente en novelas como *Yo robot* de Isaac Asimov. En la realidad, los primeros trabajos con robots industriales se llevaron a cabo en laboratorios nucleares, como el de Oak Ridge y Argonne National Laboratories de Estados Unidos, por la necesidad de manipular de forma segura materiales radiactivos.

Aunque se ha popularizado la imagen de la semejanza física entre robots y seres humanos, no necesariamente son así. Un robot puede ser una máquina tan simple como un brazo manipulador o tan raro como un gran perro sin cabeza, como el "BigDog".

Los robots son de una variedad muy amplia en cuanto a forma y capacidades se refiere. Se pueden clasificar en dos grupos: manipuladores y móviles.

El Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) hace uso de sistemas automáticos y robotizados, debido a que trabaja con sustancias radiactivas en sus actividades de investigación, en los servicios que ofrece y en el almacenamiento o supervisión de los desechos radiactivos. Por tales razones, el ININ cuenta con el Departamento de Automatización e Instrumentación, que pertenece a la Gerencia de Ciencias Aplicadas, para el desarrollo de este tipo de sistemas.

Los robots son de una variedad muy amplia en cuanto a forma y capacidades se refiere. Se pueden clasificar en dos grupos: manipuladores y móviles. Los manipuladores son máquinas que desarrollan un trabajo a partir de un punto fijo y son usados en diversas aplicaciones de la industria, como rociador de pintura, soldadura de puntos y de arco, montaje de partes automotrices y manejo de materiales, entre muchas otras. Por su parte, los robots móviles desarrollan su trabajo a través de desplazamientos sin tener un punto de anclaje y normalmente se desenvuelven en ambientes no estructurados, por lo cual su inteligencia debe ser mayor para enfrentarse a situaciones no previstas, y son usados en el transporte de todo tipo de objetos, supervisión de sitios y vigilancia.

En el ININ se transportan frecuentemente materiales radiactivos, con la finalidad de que puedan ser procesados o trasladados a su lugar de resguardo. Por ejemplo, se produce yodo (^{131}I) mediante la desintegración radiactiva de telurio (^{131}Te) y telurio metaestable (^{131}mTe), los cuales se obtienen de dióxido de telurio (TeO_2) irradiado en el reactor nuclear TRIGA MARK III. Antes, el producto obtenido se depositaba en un contenedor de plomo de forma cilíndrica de aproximadamente 200 kilogramos (kg) para proteger al personal encargado de su manejo, posteriormente se colocaba en un carro de tres ruedas para ser transportado hasta las celdas de procesamiento

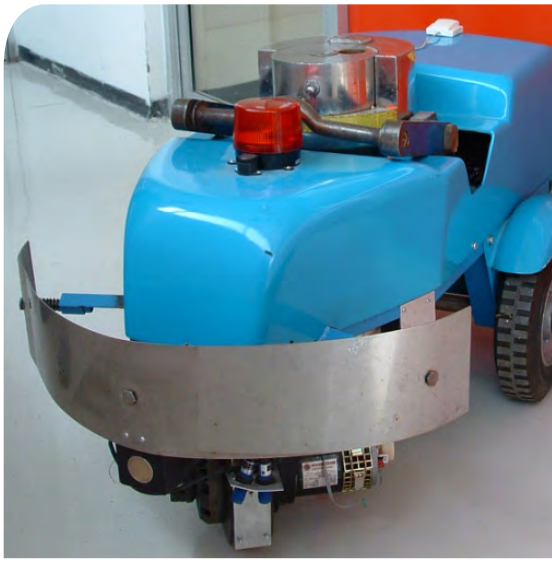
(que tienen las condiciones adecuadas de blindaje). El recorrido era de 200 metros (m). El carro que cargaba la fuente radiactiva era tirado por un operador y empujado por otro.

Como imaginarás, para mejorar la seguridad en su transporte se propuso el diseño y construcción de un vehículo robotizado que pudiera ser operado a distancia. Este robot debía ser capaz de ejecutar las órdenes recibidas mediante teleoperación (acción que permite controlar la dirección y velocidad del robot), así como contar con algunas capacidades de autonomía. El objetivo era ofrecer mayor comodidad y seguridad en el transporte, por lo que se equipó al robot móvil de sensores ultrasónicos, para la detección de posibles obstáculos, y de sensores fotoeléctricos, para seguir la trayectoria de una línea guía y facilitar el desplazamiento autónomo. Esta técnica conocida en robótica móvil como seguimiento de línea dio origen al robot TRASMAR (Transportación Asistida de Materiales Radiactivos).

El robot fue diseñado a partir de una estructura de movimiento tipo triciclo, empleando para la rueda delantera un conjunto motriz Schabmuller que cuenta con dos motores de corriente directa, uno de 500 watts (w) para la motricidad y otro de 100 w para la dirección. Las dos ruedas traseras están fijas a un eje y son capaces de girar libremente.

Originalmente la teleoperación del TRASMAR era manipulada por un dispositivo de control remoto (como el de los televisores) y hace poco se cambió por un mando similar a los usados en videojuegos, que se conecta con el robot mediante *bluetooth.* De esta manera, el control del robot se realiza desde cualquier punto dentro de un radio de 10 m, que es el alcance brindado por este tipo de conexiones inalámbricas, lo que representó mayor flexibilidad para su uso.

Sin duda, el progreso realizado en robótica le echa una muy buena mano al desarrollo e innovación de múltiples industrias.

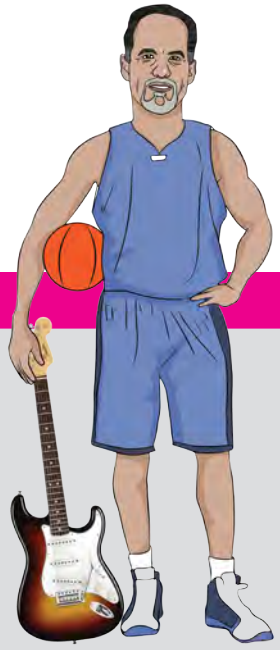


Se equipó al robot móvil TRASMAR (Transportación Asistida de Materiales Radiactivos) de sensores ultrasónicos, para la detección de posibles obstáculos, y de sensores fotoeléctricos, para seguir la trayectoria de una línea guía y facilitar el desplazamiento autónomo.

José Armando Segovia de los Ríos

Estudió Ingeniería Electromecánica en el Instituto Tecnológico de Toluca (ITT), Maestría en Ciencias en el Instituto Tecnológico de la Laguna y el Doctorado en Control de Sistemas con especialidad en Robótica Móvil en la Université de Technologie de Compiègne, Francia.

Uno de sus libros favoritos es *Dr. Zhivago* de Borís Pasternak, Premio Nobel de Literatura en 1958. Admira a Julio Verne y a Leonardo Da Vinci. Le habría gustado ser músico. Le gusta tocar la guitarra y practicar basquetbol y voleibol.



Por siempre joven

Martha Patricia Cruces Martínez

El exceso de radicales libres en las células genera estrés oxidante, un proceso que puede resultar dañino para los organismos al acelerar el envejecimiento, dañar al material genético y causar diversas enfermedades degenerativas. Evitar dicho proceso puede ser la clave para mantenerse en plenitud ¿no crees?

¿Alguna vez has pensado en ser joven por siempre? La eterna juventud ha sido objeto de interés de todo mundo a lo largo de la historia y motivo de múltiples películas y libros, como el *Retrato de Dorian Gray*. Fue el historiador griego Heródoto quien narró la primera referencia conocida sobre la eterna juventud en el siglo IV a.C. ¡Piénsalo! Mantener nuestras capacidades físicas y mentales en plenitud es un ideal, algo así como acceder a la eterna juventud ¿no te parece?

El envejecimiento se caracteriza por una disminución de los procesos fisiológicos y un incremento en los procesos degenerativos. Aunque existen múltiples factores que lo aceleran, la teoría de los radicales libres nos dice que la acumulación del daño provocado por éstos en las macromoléculas es el principal responsable del envejecimiento.

Los radicales libres son moléculas inestables porque han perdido electrones y su exceso causa estrés oxidante, es decir, desequilibrio entre las defensas antioxidantes de las células y la cantidad de radicales libres generados. Éstos provienen de diferentes fuentes, como el cigarro, el ambiente y la radiación ionizante (proveniente de los rayos cósmicos o de radiografías o tomografías para diagnósticos médicos). Los radicales libres en exceso son los responsables del envejecimiento y son capaces de causar daño al material genético, las proteínas y los lípidos. Además, están relacionados con el incremento de enfermedades degenerativas como Parkinson, Alzheimer, cáncer y artritis.

Los radicales libres no son siempre perjudiciales. Por el contrario, la célula los necesita para llevar a cabo diferentes funciones entre las que destaca la respuesta inmunológica. El problema surge cuando existe una producción exagerada de ellos.

Es importante mencionar, no obstante, que los radicales libres no son siempre perjudiciales. Por el contrario, la célula los necesita para llevar a cabo diferentes funciones entre las que destaca la respuesta inmunológica. El problema surge cuando existe una producción exagerada de ellos.

Aunque las aplicaciones de la radiación son muy útiles, en grandes dosis pueden generar radicales libres en exceso, afectando a las biomoléculas (moléculas orgánicas importantes para la vida de los organismos, como proteínas, ácidos nucleicos, ami-