



Asamblea General

Distr. general
6 de noviembre de 2023
Español
Original: inglés

Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos

Informe del Curso Práctico de las Naciones Unidas relativo a la Iniciativa Internacional sobre el Clima Espacial: el Camino a Seguir

(Viena, 26 a 30 de junio de 2023)

I. Introducción

1. El clima espacial es una consecuencia del comportamiento del Sol y la naturaleza del campo magnético y la atmósfera terrestres. En todo el mundo está creciendo el interés por comprender mejor las interacciones entre el Sol y la Tierra, y especialmente los patrones y las tendencias del clima espacial. Los motivos no son meramente científicos, puesto que, además, el funcionamiento de los bienes y las infraestructuras terrestres y espaciales, para que sea fiable, depende cada vez más de que esos bienes e infraestructuras se mantengan estables frente a los efectos perjudiciales del clima espacial.

2. La Iniciativa Internacional sobre el Clima Espacial, que se puso en marcha en 2009, es un programa de cooperación internacional destinado a promover la ciencia relativa al clima espacial por medio del despliegue de instrumentos como magnetómetros, telescopios solares, monitores de muy baja frecuencia, receptores de los sistemas mundiales de navegación por satélite y detectores de partículas, el análisis de los datos sobre el clima espacial que se obtienen con esos instrumentos— junto con otros datos—, y la comunicación de los resultados de esos análisis a los investigadores y estudiantes y al público en general.

3. El Comité Internacional sobre los Sistemas Mundiales de Navegación por Satélite (ICG) ha desempeñado un papel importante en las actividades de la Iniciativa, ya que los receptores de los sistemas mundiales de navegación por satélite se utilizan para comprender mejor los procesos dinámicos de la atmósfera terrestre causados por fenómenos meteorológicos extremos en el espacio y la interacción Sol-Tierra, así como los efectos de tales procesos en los satélites.

4. La información sobre todos los logros derivados de la cooperación y coordinación internacionales en el marco de la Iniciativa, incluidos los relativos a la instrumentación, el análisis de datos, la modelización, la educación, la formación y la divulgación pública, se difunde por conducto del boletín electrónico de la Iniciativa y su página web (www.iswi-secretariat.org). El boletín es una publicación mensual de ArkEdge Space, una empresa espacial con sede en el Japón, y el Boston College de los Estados Unidos de América se encarga del mantenimiento del sitio web. Además, la Iniciativa organiza webinarios sobre temas relacionados con la física del Sol y la Tierra, que se graban y publican en el canal de YouTube de la Oficina de Asuntos del Espacio Ultraterrestre (los



enlaces a las grabaciones pueden consultarse en www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/psa/bssi/iswi_webinars.html).

5. La Oficina de Asuntos del Espacio Ultraterrestre organizó y acogió el Curso Práctico de las Naciones Unidas relativo a la Iniciativa Internacional sobre el Clima Espacial: el Camino a Seguir. El curso práctico contó con el copatrocinio del ICG, la Agencia Espacial Europea y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) de los Estados Unidos. Se celebró en formato híbrido en Viena del 26 al 30 de junio de 2023.

6. En el presente informe se exponen los antecedentes, los objetivos y el programa del curso práctico y se resumen las observaciones formuladas por los participantes y las conclusiones a las que llegaron. El informe se ha preparado para presentarlo a la Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos en su 67º período de sesiones y a la Subcomisión de Asuntos Científicos y Técnicos a fin de que esta lo examine en su 61º período de sesiones; ambos períodos de sesiones se celebrarán en 2024.

A. Antecedentes y objetivos

7. La Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos decidió en 2013 que el “Clima espacial” pasaría a ser un tema ordinario de su programa. La Iniciativa Internacional sobre el Clima Espacial, en cuanto elemento de ese tema, ha seguido respaldando el despliegue de instrumentos para estudiar el clima espacial, el análisis de datos y programas de formación, educación y divulgación pública. Estas actividades han ayudado a ampliar los complejos de instrumentos existentes, desplegar nuevos complejos e ingresar datos de los complejos de instrumentos en modelos físicos de procesos de la heliosfera, lo que ha posibilitado la realización de pronósticos meteorológicos espaciales.

8. De conformidad con el examen por la Subcomisión de Asuntos Científicos y Técnicos del tema del programa titulado “Clima espacial” (véase [A/AC.105/1279](#), párrs. 152 a 164), el curso práctico perseguía los siguientes objetivos: a) sensibilizar a los Estados miembros acerca de los efectos del clima espacial; b) centrar la atención en el despliegue de nuevos instrumentos, en particular en los países en desarrollo; c) examinar los métodos de análisis de datos sobre clima espacial; d) poner de relieve los resultados y las conclusiones de las nuevas investigaciones; y e) fomentar una mayor cooperación para establecer alianzas entre los proveedores de instrumentos y las entidades que acogen estos últimos. En los debates sostenidos durante el curso práctico también se tomaron en consideración los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

B. Programa

9. Durante la apertura del curso práctico, pronunciaron discursos de bienvenida representantes de la Oficina de Asuntos del Espacio Ultraterrestre y la NASA. Pronunciaron discursos principales representantes de la NASA y la Universidad de Graz (Austria).

10. El programa del curso práctico consistió en ocho sesiones técnicas y debates sobre las observaciones y conclusiones, a los que siguieron las declaraciones de clausura de los organizadores. En total, se presentaron 61 ponencias en las sesiones técnicas, que abarcaron temas sobre las esferas siguientes: a) instrumentación y datos relativos al clima espacial; b) acoplamiento de la magnetosfera, la ionosfera y la termosfera; c) vigilancia del clima espacial mediante sistemas receptores de bajo costo; d) modelización del clima espacial; e) efectos del clima espacial sobre la tecnología; f) investigación acerca del clima espacial; g) programas nacionales y regionales en materia de clima espacial; y h) estudios de casos sobre clima espacial. Se organizaron dos mesas redondas que permitieron que se siguiera deliberando sobre asuntos relativos a los instrumentos para estudiar el clima espacial y sobre cuestiones relacionadas con los mecanismos de cooperación regional y los recursos para la ejecución de proyectos.

11. Cada una de las sesiones técnicas incluyó un debate que se centró en los principales problemas y dificultades que se habían planteado en las ponencias. Los resultados de los debates se resumieron y presentaron en la sesión de clausura, en la que se celebró un último intercambio de opiniones y se acordaron las conclusiones.
12. También se organizó una visita técnica informativa a GeoSphere Austria, un servicio geológico, geofísico, climatológico y meteorológico nacional, para quienes participaban en el curso práctico.
13. Junto con el curso práctico se celebró un webinar titulado “Erupciones solares atmosféricas y clima espacial”, el duodécimo de la serie de webinars de la Iniciativa. En el webinar se ofreció una visión más detallada de los orígenes del clima espacial y de las investigaciones que se estaban llevando a cabo sobre las erupciones solares atmosféricas.
14. El programa fue elaborado por la Oficina de Asuntos del Espacio Ultraterrestre, en cooperación con un comité organizador científico internacional. Los presidentes y relatores asignados a las sesiones técnicas presentaron sus observaciones y notas como aportaciones para la preparación del presente informe.
15. Las ponencias y los resúmenes de los documentos presentados en el curso práctico, así como el programa y la documentación de referencia, pueden consultarse en el sitio web de la Oficina de Asuntos del Espacio Ultraterrestre (www.unoosa.org).

C. Asistencia

16. La Oficina de Asuntos del Espacio Ultraterrestre invitó a científicos, ingenieros y educadores de países en desarrollo y países industrializados de todas las regiones económicas a participar en el curso práctico y a contribuir a él. Se seleccionó a los participantes atendiendo a su formación en ciencias e ingeniería y a su preparación académica, así como a su experiencia en la ejecución de programas y proyectos en los que la Iniciativa desempeñara una función de liderazgo. Los preparativos del curso práctico corrieron a cargo de un comité organizador científico internacional y la Oficina de Asuntos del Espacio Ultraterrestre.
17. Se utilizaron fondos proporcionados por las Naciones Unidas, el ICG y la Agencia Espacial Europea para sufragar los gastos de viaje, alojamiento y de otra índole de 24 participantes procedentes de 22 países. Se invitó a asistir al curso práctico a un total de 228 expertos.
18. Los siguientes 37 Estados miembros estuvieron representados en el curso práctico de manera presencial o en línea: Alemania, Argentina, Austria, Burkina Faso, Canadá, Côte d'Ivoire, Croacia, Egipto, Eslovaquia, Estados Unidos de América, Etiopía, Federación de Rusia, Francia, Ghana, Grecia, India, Indonesia, Italia, Japón, Kazajstán, Kenya, Malasia, Marruecos, Myanmar, Nepal, Nigeria, Pakistán, Perú, Polonia, Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte, Rwanda, Serbia, Suiza, Tailandia, Türkiye, Uganda y Zambia. También asistieron representantes de la Oficina de Asuntos del Espacio Ultraterrestre.

II. Observaciones y conclusiones

19. Las principales ponencias que se presentaron en el curso práctico ofrecieron una visión general de los orígenes solares del clima espacial y sus consecuencias geoespaciales. Se señaló que las perturbaciones solares que afectaban a la Tierra eran las erupciones, las eyecciones de materia coronal y las regiones de interacción corrotativa. Las erupciones en el lado del Sol orientado hacia la Tierra cambiaban el nivel de ionización de la ionosfera, lo que influía de manera considerable en la propagación de las ondas de radio y, a su vez, afectaba a los sistemas mundiales de navegación por satélite. Tanto las regiones de interacción corrotativa como las eyecciones de materia coronal podían provocar tormentas geomagnéticas cuando

impactaban en la magnetosfera con el campo magnético orientado hacia el sur. También se presentó una visión general de las actividades mundiales de colaboración en el ámbito del clima espacial.

20. Los participantes recordaron que la Iniciativa seguía ampliando los complejos de instrumentos existentes y desplegando otros nuevos, y que en la actualidad había 19 complejos de instrumentos en todo el mundo, entre los que había más de 1.000 instrumentos desplegados que registraban datos sobre la interacción entre el Sol y la Tierra, desde eyecciones de materia coronal hasta variaciones en el contenido electrónico total de la ionosfera.

21. Los participantes observaron que el espectrómetro del Instrumento Astronómico Compuesto de Bajo Costo y Baja Frecuencia para Funciones de Espectroscopia y Observatorio Transportable (CALLISTO) era un receptor heterodino. Funcionaba a una frecuencia de entre 45 y 870 MHz, con un ancho de banda radiométrica de unos 300 kHz. Los datos registrados por el complejo de instrumentos CALLISTO eran archivos del sistema flexible de transporte de imágenes de hasta 400 frecuencias por barrido. Los datos se transferían a una computadora mediante un cable R232 y se archivaban en forma local. El tiempo de integración era de 1 milisegundo y la gama dinámica general era superior a 40 decibelios. Muchos instrumentos CALLISTO ya se habían desplegado en todo el mundo por conducto del programa de despliegue de instrumentos de la Iniciativa, y el conjunto de todos los espectrómetros formaba la red e-CALLISTO. Se puede consultar información sobre la red y los productos conexos en el sitio web de la red (www.e-callisto.org).

22. Los participantes tomaron conocimiento de que el Low-Frequency Array (LOFAR) era un radiotelescopio de baja frecuencia multifuncional y muy innovador que estaba distribuido por toda Europa y funcionaba a una frecuencia de entre 10 y 240 MHz. Se señaló que las observaciones de las estructuras ionosféricas realizadas por el LOFAR solían basarse en el centelleo inducido por ondas de radio. La cantidad de centelleo inducido por irregularidades ionosféricas normalmente variaba en función de la frecuencia de las ondas de radio y alcanzaba valores más altos a frecuencias más bajas. Los resultados preliminares demostraron que las observaciones del centelleo de muy alta frecuencia mediante el LOFAR se podían utilizar para detectar las estructuras de plasma que se estaban formando en la ionosfera a latitudes medias. El sitio web del proyecto LOFAR puede consultarse en www.astron.nl/telescopes/lofar.

23. Los participantes examinaron las dificultades a que se enfrentaban los usuarios para acceder a los datos obtenidos por medio de los instrumentos de la Iniciativa, así como para utilizarlos, y el modo en que se podrían mitigar esas dificultades en el futuro. Se hizo hincapié en la necesidad de que se coordinara la labor para garantizar el funcionamiento continuo de las redes de instrumentos de la Iniciativa; asimismo, se puso énfasis en que, a fin de ampliar el uso de los datos, también era necesario colaborar para aprobar una norma de metadatos como la del consorcio SPASE (Space Physics Archive Search and Extract) a los efectos de documentar los datos. Se observó que dos instrumentos, el e-CALLISTO y el Sistema Electromagnético de Observación, Modelización y Enseñanza sobre Meteorología Atmosférica, ya se habían registrado ante el consorcio SPASE.

24. Los participantes observaron que el equipo de proyectos sobre vigilancia del clima espacial mediante sistemas receptores de sistemas mundiales de navegación por satélite de bajo costo, creado en 2021 en el marco del Grupo de Trabajo del ICG sobre Difusión de la Información y Fomento de la Capacidad, estaba constituido por expertos representantes del Centro Internacional Abdus Salam de Física Teórica de Italia, el Boston College de los Estados Unidos, la Universidad de Tokio y el Instituto Politécnico de París. El equipo de proyectos continuó explorando las posibilidades de utilizar sistemas receptores de bajo costo para la vigilancia del clima espacial y la puesta en marcha de un sistema prototipo. Se observó que los resultados arrojados por una comparación preliminar entre receptores de los sistemas mundiales de navegación por satélite de gama alta y de bajo costo mostraban que ambos tipos de sistemas tenían un

rendimiento similar con respecto al contenido electrónico total vertical, el índice de variación del contenido electrónico total y el centelleo de fase de código.

25. Los participantes observaron que el acoplamiento entre la magnetosfera y la ionosfera comprendía muchos temas distintos que incumbían al estudio mundial de la física del espacio cercano a la Tierra, y que a ese respecto había muchos fenómenos complejos diferentes que explorar. En el contexto del clima espacial, los procesos magnetosféricos se vinculaban directamente con la actividad geomagnética, así como con entornos de partículas de alta energía cercanos a la Tierra que revestían una importancia clave. Tres sistemas, el viento solar, la magnetosfera y la ionosfera, interactúan y, de ese modo, transmiten la energía del viento solar, la transforman en energías de fenómenos aurorales y, finalmente, depositan la mayor parte de esa energía en forma de energía térmica en la ionosfera.

26. En lo que respecta a la modelización del clima espacial, se señaló que el clima espacial se había convertido en una parte esencial de la física del espacio, y que se utilizaban varios modelos para todo tipo de aspectos del clima espacial, incluidos el viento solar y las características de la magnetosfera, la ionosfera e incluso la termosfera. Esos modelos se utilizaban en algunos casos en particular.

27. Los participantes tomaron conocimiento de los principales enfoques numéricos empleados en la modelización de las eyecciones de materia coronal y su propagación por la heliosfera interior y discutieron acerca del modo en que la sinergia entre la teleobservación y las observaciones *in situ* de las eyecciones de materia coronal realizadas desde múltiples vehículos espaciales permitía lograr predicciones más precisas y fiables en diversos puntos de la heliosfera. Se observó que, mediante la combinación de datos procedentes de fuentes terrestres y espaciales y diferentes técnicas de asimilación e incorporación de datos, se habían podido adaptar modelos empíricos que representaban el clima de la ionosfera para ajustarlos mejor a las observaciones realizadas en condiciones de perturbación geomagnética.

28. También se informó a los participantes acerca de técnicas de aprendizaje automático para la previsión inmediata y el pronóstico de distintos subámbitos del clima espacial. Se explicó un modelo de predicción ionosférica mundial basado en aprendizaje automático para pronosticar el contenido electrónico total con 24 horas de antelación en diferentes condiciones meteorológicas espaciales. Se señaló que, entre tres técnicas diferentes de aprendizaje automático —memoria a corto y largo plazo, unidades recurrentes cerradas y redes neuronales convolucionales—, para lograr un servicio funcional, el modelo de redes neuronales convolucionales tenía mejor capacidad de predicción, incluso en condiciones de perturbación geomagnética, y, por tanto, podía implementarse de manera funcional para aplicaciones y servicios relacionados con el clima espacial.

29. Se informó a los participantes de que cualquier usuario podía recurrir al Centro de Datos de Física del Plasma Espacial (CDPP) de Francia para recuperar datos de vehículos espaciales y sondas de todo el sistema solar, y de que el Centro de Datos también proporcionaba un conjunto de instrumentos terrestres para la observación del geoespacio. Se señaló que el Centro de Datos estaba mejorando continuamente su capacidad con miras a facilitar la explotación científica de los datos y la distribución de los datos de futuras misiones espaciales. A tales fines, estaba desarrollando herramientas y servicios que facilitasen la extracción y el análisis de datos. El Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES) de Francia almacenaba los datos en su centro de tecnología de la información de Toulouse. Se puede consultar información sobre el Centro de Datos en <http://cdpp.eu>.

30. Los participantes observaron que el clima espacial era una de las amenazas naturales que podían causar errores y perturbaciones en los sistemas mundiales de navegación por satélite. Los efectos principales se debían a la ionosfera terrestre. Las señales se estaban ralentizando a causa de los efectos ionosféricos que podían provocar unos errores de localización en los sistemas mundiales de navegación por satélite de entre unos pocos metros y varias decenas de metros. Los efectos también podían dar lugar a saltos de ciclo en las mediciones de fase que deterioraban el rendimiento de la

cinemática en tiempo real. Los parámetros relacionados con el clima espacial, como el contenido electrónico total y los parámetros de centelleo (amplitud y fase), podían calcularse midiendo los efectos ionosféricos sobre las señales de los sistemas mundiales de navegación por satélite.

31. Los participantes tomaron conocimiento de un método que resumía tareas para reunir datos de los sistemas mundiales de navegación por satélite y datos geomagnéticos de múltiples fuentes en un único conjunto de datos, que podría utilizarse para elaborar modelos de corrección ionosférica de los sistemas mundiales de navegación por satélite mediante métodos estadísticos y de aprendizaje automático. El método se aplicó combinando un *software* a medida desarrollado en el entorno R para la estadística computacional y una aplicación informática gratuita para la estimación del contenido electrónico total basada en los sistemas mundiales de navegación por satélite. Los datos recopilados, obtenidos en la demostración del método presentado, se pusieron a disposición del público para apoyar a la comunidad científica internacional.

32. En cuanto a las aplicaciones de la investigación sobre el clima espacial, se presentó una visión general de los efectos que tenían en el clima espacial las partículas energéticas solares, sus principales procesos de aceleración y su transporte por el medio interplanetario. Se explicaron dos mecanismos que podían energizar las partículas energéticas solares, a saber, las perturbaciones originadas por erupciones solares atmosféricas y las perturbaciones provocadas por eyecciones de materia coronal. También se presentó el proyecto para el análisis del efecto otoñal sobre la mesosfera y la ionosfera inferior (AMELIE) del Centro Aeroespacial Alemán, cuyo objetivo era detectar automáticamente el llamado “efecto otoñal” en mediciones de muy baja frecuencia. Los resultados analizados hasta el momento indicaban que, con independencia del ángulo cenital solar, sobre todo en latitudes altas, podía observarse un fuerte calentamiento de la mesosfera inferior durante el otoño, lo que confirmaba las dinámicas internas atmosféricas dominantes.

33. Los participantes señalaron que el pico de actividad del ciclo solar 25, denominado máximo solar, podía producirse antes de lo previsto y con una intensidad mayor de la estimada. Por lo tanto, se preveía un aumento de las perturbaciones debidas a fenómenos solares. Las eyecciones de materia coronal, las corrientes de alta velocidad, las erupciones solares y los fenómenos de partículas energéticas solares se señalaron como los principales fenómenos transitorios que repercutían en el clima espacial. Por ejemplo, las erupciones en el lado del Sol orientado hacia la Tierra cambiaban el nivel de ionización de la ionosfera, lo que influía de manera considerable sobre la propagación de las ondas de radio y, a su vez, podía afectar a las señales de los sistemas mundiales de navegación por satélite. Las emisiones de erupciones en longitudes de onda de radio podían sumergir las señales de radares y satélites y afectar a su funcionamiento.

34. Las sesiones sobre programas nacionales relativos al clima espacial y estudios de casos brindaron a los participantes otra oportunidad para compartir su experiencia con miras a concienciar acerca de los fenómenos meteorológicos espaciales y sus posibles consecuencias. Se reconoció que la investigación sobre el clima espacial se veía favorecida por una coordinación y colaboración internacionales eficaces en cuanto al intercambio y el uso de las observaciones disponibles; la evaluación de la capacidad de predicción y análisis del clima espacial; los progresos realizados en materia de conocimientos, teoría y modelización; y la implementación de los avances de las investigaciones en aplicaciones relacionadas con el clima espacial.

35. En el marco del curso práctico se celebraron dos mesas redondas tituladas “Los instrumentos de la Iniciativa” y “El camino a seguir”. Las sesiones tenían como objetivos discutir acerca del estado actual de las redes de instrumentos de la Iniciativa y detectar deficiencias importantes en cuanto a los tipos de instrumentos y su cobertura; detectar problemas en el mantenimiento de los instrumentos y el flujo de datos en términos de continuidad, recopilación, análisis y modelización de datos; y examinar el modo de atraer a científicos que se encontraban al principio de su carrera y apoyar otras iniciativas internacionales en curso.

36. Las principales conclusiones a las que se llegó en las mesas redondas fueron las siguientes:

a) los datos obtenidos por los complejos de instrumentos de la Iniciativa deberían combinarse con datos espaciales y con otros datos terrestres, con el fin de fomentar la ciencia relativa al clima espacial y de ese modo obtener resultados de investigaciones sólidos y lograr la publicación de artículos científicos en revistas internacionales, y las comunidades de profesionales que se dedican a los ámbitos del clima espacial y los sistemas mundiales de navegación por satélite deberían intercambiar datos y colaborar en materia de investigación sobre clima espacial;

b) las escuelas de ciencia espacial de la Iniciativa y los cursos prácticos anuales de las Naciones Unidas relativos a la Iniciativa deberían continuar en el futuro, para capacitar a investigadores menos experimentados en el funcionamiento de los instrumentos y la ciencia de la heliofísica. Las alianzas ya establecidas con organizaciones científicas internacionales deben reforzarse, a fin de asegurar que esas actividades de creación de capacidad se ejecuten de manera eficiente y redunden en beneficio de todos los Estados miembros;

c) los nuevos conocimientos generados por las actividades de la Iniciativa deberían comunicarse eficazmente al público y a la comunidad científica en general a través de los boletines informativos de la Iniciativa, su sitio web y otros medios.

37. Se informó a los participantes de que la revista *Sun and Geosphere* publicaría a más tardar a finales de 2023 un número especial sobre las influencias solares en la magnetosfera, la ionosfera y la atmósfera. Se invitó a los participantes a que presentaran a la revista los resultados de sus investigaciones relativas al clima espacial y la física del Sol y la Tierra.

38. Los participantes expresaron su agradecimiento a las Naciones Unidas y los copatrocinadores por el contenido del curso práctico, así como por su excelente organización y su culminación exitosa.
