

**Vicerrectoría de Investigación y Extensión**  
**Dirección de Proyectos**  
**Formato para la presentación del informe final de actividades de fortalecimiento de investigación**

**Año:** 2025

**Nombre de la actividad:**

Estudio del impacto de las irregularidades ionosféricas en la comunicación satelital de Costa Rica.

**Producto generado:**

	Diagnóstico de situación
	Estudio de factibilidad
	Estudio de mercado
	Ensayo de laboratorio
	Línea de investigación
X	Propuesta de proyecto de investigación
	Otros:

**Equipo ejecutor:**

Nombre y apellidos*	Instancia académica	Horas	Tipo
Carlos Roberto Gutierrez Chaves (CP)	Escuela de Física	4	VIE
Miguel Ángel Rojas Quesada	Escuela de Física	4	VIE

*\* Identifique con la iniciales CP, a la persona que fungió como coordinadora durante la ejecución del proyecto*

## Resumen ejecutivo

Este proyecto respondió a la escasez de datos e instrumentos dedicados al análisis del centelleo ionosférico en Costa Rica. Se enfocó en desarrollar capacidades locales para medir y estudiar estos fenómenos que afectan la precisión de las comunicaciones y la navegación satelital. La población meta incluye investigadores y estudiantes interesados en entender y mitigar estos impactos. La estrategia de abordaje combinó revisión bibliográfica, análisis metodológico, y pruebas de concepto mediante la implementación de un dispositivo tipo ScintPi. Este fue construido en el TEC siguiendo la metodología de UTDallas y validado frente a un equipo original. Como producto se generó una propuesta de investigación basada en evidencias locales titulada “Caracterización de la dinámica de irregularidades ionosféricas sobre Costa Rica mediante una red de dispositivos de bajo costo”. Entre los principales hallazgos se resalta la importancia de adaptar metodologías a las condiciones regionales y la necesidad de fortalecer capacidades locales para la observación ionosférica con fines científicos y aplicados.

## Estrategia de abordaje:

### 1. Revisión bibliográfica y definición del marco teórico

Se llevó a cabo una revisión de literatura científica y artículos académicos relacionados con las irregularidades ionosféricas y su impacto en las comunicaciones satelitales.

Utilizando Web of Science se determinaron los artículos publicados entre el 2021 y 2024 que estuvieran relacionados con centelleo ionosférico (ionospheric scintillation) y el índice  $S_4$  ( $S_4$  index), adicionalmente se consultaron aquellos artículos que estuvieran relacionados con geo-ciencias (geosciences), meteorología atmosférica (meteorology atmospheric sciences), astronomía y astrofísica (astronomy and astrophysics) o teledetección (remote sensing). En total se obtuvieron 47 artículos que cumplieron con los requerimientos descritos ([enlace](#)). Adicionalmente, se analizaron las publicaciones relacionadas con la construcción e implementación de los dispositivos Scintpi por parte de la Universidad de Texas en Dallas.

Esta etapa permitió establecer el estado del arte que se presenta a continuación, así como identificar brechas de conocimiento y definir con claridad los objetivos del proyecto de investigación presentado como producto de esta actividad de fortalecimiento de la investigación.

La Irregularidad Ecuatorial de la Ionosfera (EIA, por sus siglas en inglés) es una estructura característica de la ionosfera en latitudes bajas, compuesta por dos crestas de alta densidad electrónica que se forman al norte y sur a  $15^\circ$  aproximadamente del ecuador magnético (Aswathy & Manju, 2021). Estas acumulaciones de plasma no son estáticas, y bajo ciertas condiciones, pueden volverse inestables, dando lugar a estructuras como burbujas de plasma ecuatoriales (EPB) que afectan la propagación de señales de radio. Este fenómeno es uno de los principales causantes del centelleo ionosférico, es decir, las fluctuaciones en amplitud y fase de las señales GNSS (como los GPS), lo cual genera una afectación a la precisión de la medición de posición de estos dispositivos.

Para caracterizar cuantitativamente el centelleo en amplitud, se utiliza comúnmente el índice  $S_4$ , definido como la desviación estándar normalizada de la intensidad de la señal recibida durante un intervalo de tiempo. Un valor alto de  $S_4$  indica una mayor severidad de la perturbación.

En este contexto, el instrumento ScintPi desarrollado por la Universidad de Texas en Dallas se ha convertido en una herramienta clave para la detección y caracterización del centelleo ionosférico en tiempo casi real (Rodrigues & Moraes, 2019). Este sistema, basado en receptores GNSS de bajo costo, permite registrar y calcular el índice  $S_4$  y otros parámetros. Gracias a su diseño flexible y portabilidad, ScintPi puede implementarse fácilmente en redes distribuidas para el monitoreo de irregularidades ionosféricas, especialmente en regiones ecuatoriales como Centroamérica, donde la cobertura instrumental ha sido históricamente limitada.

#### a) Relación entre las características de la EIA y las Irregularidades Ionosféricas

Varios estudios han demostrado la relación entre las características de la EIA y la ocurrencia de irregularidades ionosféricas. Aswathy & Manju (2021) encontraron que la magnitud del pico de la EIA en horas de la tarde tiene un control directo sobre la altura base de la capa F ionosférica después del atardecer, factor principal en la generación de irregularidades de plasma ionosférico. Además, observaron que la intensidad del centelleo en señales GPS (cuantificada por el índice  $S_4$ ) exhibe una asociación directa con la fuerza del pico de la EIA. W. Luo et al. (2022) corroboraron estos hallazgos, indicando que la fuerza de la EIA puede vincularse con la

ocurrencia día a día de irregularidades después del atardecer, siendo más probable que ocurra centelleo cuando la densidad de electrones sobre el canal de la EIA es baja y la EIA es fuerte.

#### b) Efectos de las Tormentas Geomagnéticas

Las tormentas geomagnéticas han sido identificadas como una de las principales causas de irregularidades ionosféricas, dependiendo de su intensidad (Atabati et al., 2023). Duann et al. (2023) estudiaron los impactos de una tormenta geomagnética en febrero de 2022 sobre el índice de centelleo  $S_4$ , analizando además el riesgo que estos eventos pueden tener para satélites en órbita baja. Sin embargo, los efectos no son uniformes; Oladipo et al. (2023) observaron que para tres tormentas geomagnéticas analizadas en Ilorin, Nigeria, el efecto no fue el mismo en todas, mostrando un aumento en una pero siendo difícil de notar en las otras dos. Ondede et al. (2022) encontraron que las intensidades de las irregularidades ionosféricas durante tormentas geomagnéticas no están estrictamente determinadas por las magnitudes de las tormentas, observándose esta relación tanto en el índice ROTI como en el  $S_4$ .

#### c) Técnicas de Medición y Monitoreo

La técnica de radio ocultación ha emergido como un método novedoso para estudiar las propiedades ionosféricas, midiendo el desplazamiento de frecuencia cuando la línea de visión entre una nave espacial y la Tierra pasa por la ionosfera (Bai et al., 2022). Sin embargo, su implementación es compleja por requerir acceso a datos satelitales específicos. Varios estudios han utilizado misiones como FORMOSAT-3/COSMIC y FORMOSAT-7/COSMIC-2 con técnicas de radio ocultación para este fin (Bai et al., 2022; Yeh et al., 2022; Huang et al., 2022; J.-Y. Liu et al., 2022; T. J.-Y. Liu et al., 2022; Prol et al., 2023; Tahir et al., 2024), aunque el acceso a estos datos puede ser limitado en ciertas regiones como Centroamérica.

Los índices principales para medir el centelleo son el  $S_4$  (basado en variaciones de amplitud) y sigma phi (basado en variaciones de fase) (Imam et al., 2024). Sun et al. (2023) realizaron un análisis estadístico sobre la incertidumbre en la medición del  $S_4$ , encontrando que esta es más importante para eventos intensos y que existen desviaciones causadas por fluctuaciones a gran escala sobre una ventana de tiempo finita para los cálculos de  $S_4$ .

#### d) Modelado y Predicción

Atabati et al. (2021) desarrollaron un modelo de red neuronal artificial y algoritmo genético para predecir centelleo ionosférico en parámetros  $S_4$  y ROTI, alcanzando precisiones del 81% y 80% respectivamente. Posteriormente, Atabati et al. (2024) implementaron redes ConvGRU utilizando datos GNSS terrestres en Sudamérica, mostrando que periodos de mayor actividad solar coinciden con más irregularidades ionosféricas. Nasurudiin et al. (2024) desarrollaron un modelo de machine learning utilizando el índice  $S_4$  como objetivo, demostrando la viabilidad de fusionar observaciones con modelos computacionales.

Koulouri (2022) propuso un método para generar imágenes del centelleo  $S_4$  cada minuto sobre Sudamérica usando filtros de Kalman en paralelo. Martinon y colaboradores han desarrollado sistemas para generar mapas de centelleo en tiempo real sobre Brasil, utilizando diferentes métodos de interpolación (Martinon et al., 2023, 2024).

#### e) Estudios Regionales

Varios estudios han analizado características regionales del centelleo. Ayyagari et al. (2022) estudiaron la variación del centelleo sobre India durante baja actividad solar, mientras que Darya et al. (2022) mapearon el  $S_4$  sobre la Península Arábiga durante el mínimo solar y a inicios del ciclo solar 25 (Darya et al., 2024). En Costa Rica aun no existen análisis de este tipo sobre la región centroamericana que comparen valores en diferentes fases del ciclo solar.

Panda et al. (2023) analizaron la ocurrencia de centelleo sobre India a partir de tres estaciones geodésicas. R. K. Vankadara et al. (2023) reportan un caso de una burbuja de plasma ecuatorial (EPB) en la India medido mediante GNSS.

Valladares et al. (2023) presentaron un caso de estudio aplicado a Centroamérica, utilizando receptores en la región para obtener valores de Contenido Total de Electrones (TEC por sus siglas en inglés), aunque las estaciones que reportan  $S_4$  se encontraban más al sur. Gomez Socola et al. (2023) analizaron datos de Puerto Rico, ubicado en una latitud intermedia similar a Costa Rica, proporcionando un posible modelo para estudios en la región centroamericana.

Puesto que los eventos de centelleo ionosférico se presentan cerca del ecuador o en los polos, otros estudios como el de Enengl et al. (2024) estudian los efectos del centelleo sobre regiones polares.

f) Efectos en Sistemas de Navegación (GNSS) y Posicionamiento Preciso (PPP)

Dey et al. (2021) evaluaron los efectos del  $S_4$  sobre la precisión de posicionamiento en el sistema de navegación indio IRNSS/NavIC, encontrando errores medios de posición en el rango de 2-4 m. X. Luo et al. (2024) propusieron un modelo mejorado (Impr\_RTES) para mitigar los efectos del centelleo en receptores geodésicos GNSS en bajas latitudes.

Li et al. (2022) analizan como mitigar los efectos del centelleo, en este caso se comparan dos técnicas utilizadas. Ambas dependen de la medición adecuada del centelleo ionosférico.

Wang et al. (2023) documentaron la degradación de la precisión PPP durante tormentas geomagnéticas intensas, con errores máximos que excedieron 2.3 m. Puesto que en Costa Rica se utilizan técnicas de PPP para el monitoreo de las estructuras volcánicas, entender el efecto que el centelleo ionosférico puede tener sobre la calidad de estas mediciones es de particular relevancia, considerando que en nuestras latitudes los eventos de centelleo son más intensos.

Flisek et al. (2023) destacaron que las irregularidades ionosféricas típicamente disminuyen con la frecuencia de la onda de radio. R. Vankadara et al. (2024) analizaron el efecto de la geometría orbital y la frecuencia de la señal en los centelleos sobre una estación india de baja latitud.

g) Burbujas de Plasma Ecuatorial (EPB) y otras fuentes de centelleo.

Carmo et al. (2022) observaron EPB inusuales en el amanecer durante la fase de recuperación de una tormenta geomagnética moderada sobre el sector brasileño. Bumrungrit et al. (2022) presentaron la relación entre el centelleo ionosférico (índice  $S_4$ ) y las características de las EPB.

Wright et al. (2023) demostraron que aumentos en el  $S_4$  pueden ser causados por eventos de radio burst solar en lugar de irregularidades ionosféricas como las EPB, destacando la importancia de distinguir entre estas fuentes de perturbación. Este estudio abre la posibilidad de colaboraciones con el Radio Observatorio de Santa Cruz (ROSAC) de la Universidad de Costa Rica. Adicionalmente, Tseng et al. (2024) relacionaron la precisión en la determinación orbital con satélites de frecuencia única con la actividad solar, indexada por el valor F10.7.

También relacionado a otras fuentes de centelleo, Yu & Liu (2021) encontraron que la fuerte convección durante eventos de ciclones tropicales puede desencadenar densidad electrónica anómala, mientras que Wu et al. (2021) observaron correlaciones entre valores altos de  $S_4$  y ondas de gravedad en la estratosfera, particularmente en el ecuador.

h) Variaciones Temporales

Meenakshi et al. (2022) reportaron mayor ocurrencia de spread F después de la medianoche que después del atardecer durante años de mínimo solar. Xiong et al. (2024) realizaron un análisis estadístico de 19 años de observaciones de centelleo en la estación de baja latitud Sanya. Seechai et al. (2023) encontraron que las perturbaciones en satélites LEO pueden observarse incluso pasada la medianoche, mientras que en GNSS se observan mayormente antes de medianoche.

i) Deriva de las irregularidades ionosféricas.

Una vez producidas, las irregularidades ionosféricas se desplazan desde la región ecuatorial hacia latitudes más altas. Estudios anteriores han demostrado la capacidad de utilizar dispositivos de bajo costo para medir la deriva de las irregularidades ionosféricas (Gomez Socola et al., 2025). Se ha observado que la probabilidad de pérdida de sincronización de los dispositivos de posicionamiento satelital y la probabilidad de tiempos de readquisición de señal prolongados dependen de la velocidad del movimiento del satélite con respecto al campo magnético y la deriva del plasma (Carrano & Groves, 2010), por lo que la determinación precisa de esta velocidad es un factor clave para entender mejor estos fenómenos. Es en este segmento en el que el estudio propuesto como proyecto de investigación cobra mayor relevancia puesto que se pretende determinar la velocidad de deriva de estas irregularidades sobre el territorio costarricense.

## 2. Identificación de métodos y técnicas

A partir de la información recopilada, se identificaron las metodologías existentes para el estudio del plasma ionosférico, con énfasis en técnicas de medición basadas en Sistema Globales de Navegación por Satélite (GNSS por sus siglas en inglés). Se analizó la aplicabilidad de dichas metodologías al contexto costarricense, considerando variables como infraestructura, entorno geográfico y disponibilidad de datos.

Se estudiaron a fondo las técnicas desarrolladas por el equipo de la Universidad de Texas en Dallas (UTDallas) para el desarrollo del dispositivo ScintPi, capaz de medir los fenómenos de centelleo ionosférico en regiones tropicales.

### 3. Diseño y planificación de pruebas de concepto

Se adoptó una metodología similar a la propuesta por el equipo de la Universidad de Texas en Dallas (UTD) en el marco del proyecto ScintPi ([enlace](#)). Con base en esta referencia, se desarrolló y construyó en el Tecnológico de Costa Rica un prototipo funcional tipo ScintPi que permite medir el índice  $S_4$  el cual está ligado con el centello ionosférico y es el principal índice que se utiliza en la literatura científica para medir los efectos del centello. Este dispositivo fue ensamblado con el apoyo técnico del laboratorio DELTA, el cual brindó asesoría en electrónica y diseño de sistemas embebidos (Figura 1).

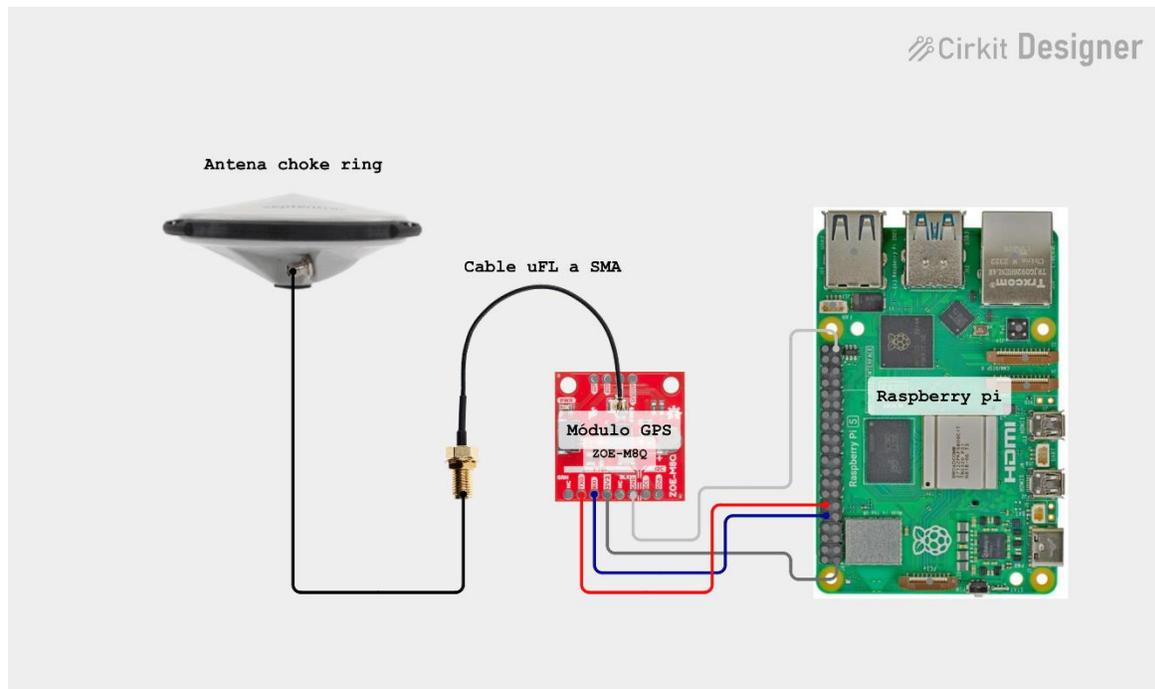


Figura 1. Esquema del dispositivo tipo ScintPi construido en el TEC para medir el índice  $S_4$ .

Durante la revisión bibliográfica se determinó además que un fenómeno en el que una señal GNSS llega al receptor por múltiples trayectorias debido a reflexiones en superficies cercanas puede causar errores en la medición de posición o en la calidad de los datos (Kaplan, 1996), este efecto se conoce como multipath y para evitar los efectos en la recepción de señales GNSS es indispensable contar con condiciones de cielo abierto y una antena de tipo choke ring, conocida por su capacidad para mitigar reflexiones de señal provenientes del entorno. La Escuela de Física ya dispone de una antena instalada en la cima del edificio, lo cual garantiza un entorno adecuado para pruebas controladas.

### 4. Implementación de pruebas de concepto

Un dispositivo similar al ScintPi fue construido localmente, se empleó como prueba de concepto y fue comparado con los datos recolectados por un equipo ScintPi original proporcionado por la Universidad de Texas en Dallas. Esta comparación permitió evaluar la confiabilidad y sensibilidad del sistema desarrollado, validando su potencial como herramienta para el monitoreo de irregularidades ionosféricas en condiciones tropicales.

Se construyó e instaló un segundo receptor GNSS, complementando el instrumento preexistente, ambos dispositivos fueron conectados a la misma antena tipo choke ring instalada en el Edificio de Física, utilizando un divisor de señales especiales para señales GNSS. Puesto que ambos dispositivos reciben la misma señal, este ensayo permitió comparar los valores de centelleo ionosférico medidos en ambos dispositivos y

descartando la posible influencia de la antena o el multipath. Durante esta fase, se aplicó la técnica de observación directa mediante el registro continuo de datos de señales satelitales.



*Figura 2. Dispositivo desarrollado en el TEC para medir el índice  $S_4$ .*

## **5. Análisis de resultados**

Los datos recopilados fueron procesados utilizando la técnica estadística de correlación temporal entre ambos receptores. Este análisis permitió evaluar la viabilidad técnica de detectar irregularidades ionosféricas a partir de la infraestructura instalada.

El dispositivo construido (Figura 2), permite recolectar información en el formato establecido por la Asociación Nacional de Electrónica Marina (NMEA por sus siglas en inglés), este es un formato estándar utilizado internacionalmente para recolectar información de los satélites GNSS (El-Rabbany, 2002).

Entre los datos colectados se encuentra la identificación del satélite que emite la señal, su elevación (ángulo de posición respecto al horizonte), su acimut (ángulo de posición respecto al norte) y el valor de la relación señal-ruido (SNR). Para nuestros efectos, los valores más importantes son el SNR y la elevación del satélite, puesto que entre mayor sea la elevación (sin importar el acimut) es esperable obtener valores más altos de SNR. La Figura 2 muestra la variación de la altitud y los valores de SNR medidos durante un día completo de observaciones para dos satélites GPS.

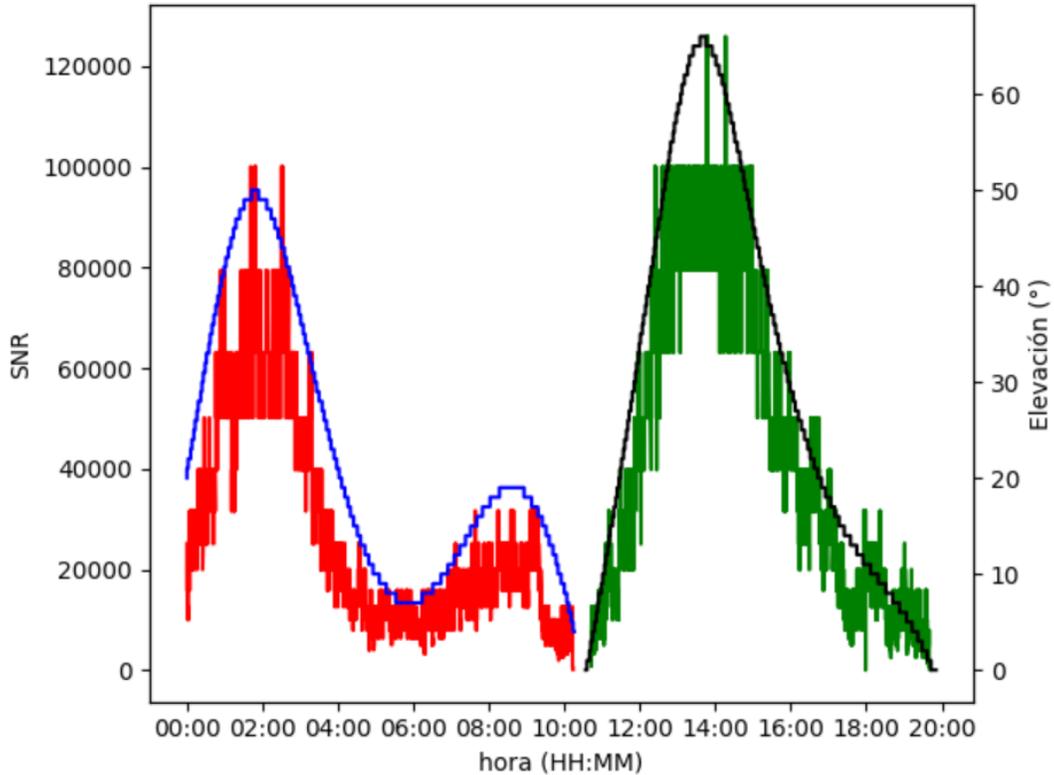


Figura 3. Variación del SNR y elevación (en grados) para dos satélites GPS durante un día completo de observación. Las señal roja corresponde a los valores SNR del satélite GPS 03 y la señal verde corresponde al satélite GPS 05. Las líneas azul y negro muestran la elevación de cada satélite respectivamente. Es posible notar la relación existente entre la elevación y los valores SNR.

De acuerdo con Olwendo & Cilliers (2018) es posible estimar el valor del índice  $S_4$  (indicador del centelleo ionosférico) mediante el cálculo de la desviación estándar de la señal SNR. Considerando que originalmente los datos obtenidos de los mensajes NMEA incluyen el valor de SNR en decibeles ( $S_1$ ), es necesario primero convertir estos valores a valores absolutos:

$$S_1(\text{abs}) = 10^{\left(\frac{\text{SNR}(\text{dB})}{10}\right)} \quad (1)$$

Luego le valor aproximado de  $S_4$  se obtiene mediante:

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle S_1^2 \rangle - \langle S_1 \rangle^2}{\langle S_1 \rangle^2}} \quad (2)$$

Este cálculo en nuestro caso se hace para cada minuto de datos. En otras palabras, para cada satélite visible en un determinado minuto se obtiene el valor de  $S_4$  correspondiente.

La Figura 3 muestra los valores de  $S_4$  calculados durante un día completo de observaciones, adicionalmente se muestran los valores de elevación de los satélites utilizados. Es posible notar cómo se tiene una cobertura continua puesto que en cada momento varios satélites son visibles.

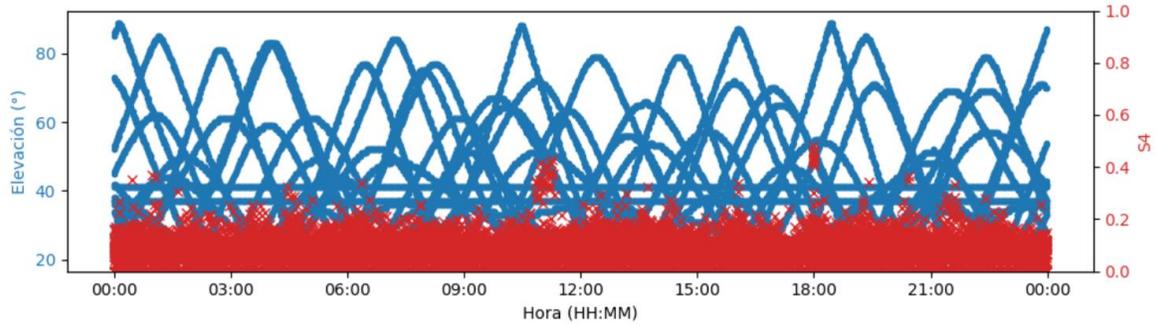


Figura 4. Valores de  $S_4$  tomados durante un día completo. Las líneas azules muestran la elevación de cada satélite mientras que los puntos rojos marcan el valor de  $S_4$ . Todos los valores de  $S_4$  medidos durante este día están por debajo de 0.6, esto indica valores bajos de centelleo ionosférico durante el día en cuestión.

Como se mencionó anteriormente, los valores medidos de  $S_4$  provienen de una antena que mediante un divisor de señales fue conectado de forma simultánea al dispositivo construido y al dispositivo ScintPi proporcionado por la Universidad de Texas en Dallas. La Figura 5 muestra una comparación entre los valores detectados en cada uno de los dispositivos para un satélite en particular. Es posible notar la similitud entre ambas mediciones.

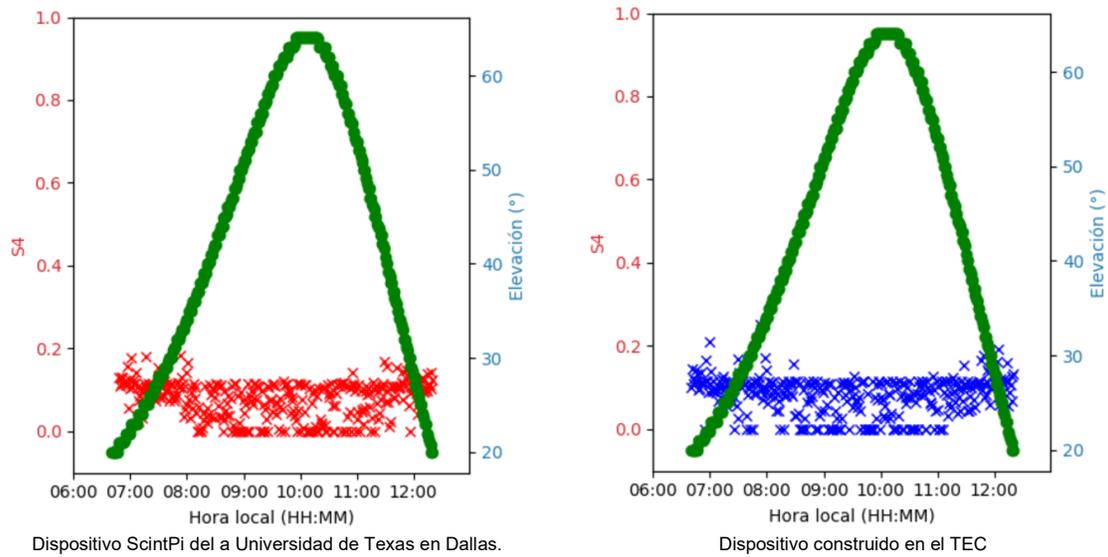


Figura 5. Valores de elevación y  $S_4$  para un satélite medidos mediante los dos dispositivos conectados a la misma antena.

Para realizar una comparación cuantitativa de estas mediciones, se calculó el valor medio y la desviación estándar observada, en el caso del dispositivo ScintPi se obtuvo  $0.078 \pm 0.044$  mientras que para el dispositivo construido por el TEC los valores son  $0.081 \pm 0.045$ . Gráficamente los resultados se muestran en la Figura 6. Los valores obtenidos y su desviación estándar son muy similares en ambos casos, lo cual denota que ambos dispositivos obtienen aproximadamente la misma medición. Los valores de  $S_4$  son bajos (menores a 0.2) y denotan poca actividad de centelleo ionosférico al momento de la medición.

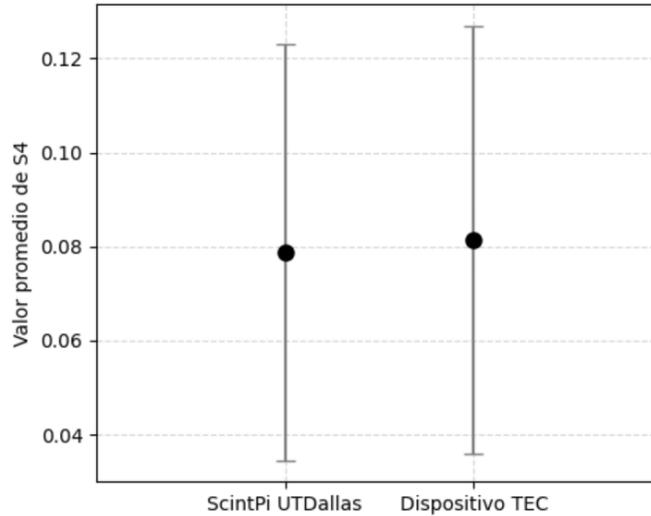


Figura 6. Valores promedio y desviación estándar de los valores de  $S_4$  para un satélite medidos mediante los dos dispositivos conectados a la misma antena.

## 6. Elaboración de la propuesta de investigación

Finalmente, se integraron los hallazgos obtenidos en las etapas anteriores para redactar una propuesta de investigación robusta titulada “Caracterización de la dinámica de irregularidades ionosféricas sobre Costa Rica mediante una red de dispositivos de bajo costo”. Esta integración se fundamentó en la triangulación de información: revisión bibliográfica, análisis de resultados empíricos y consideraciones metodológicas, lo cual garantizó la coherencia y pertinencia de la propuesta.

Se han llevado a cabo estudios para analizar las irregularidades ionosféricas y determinar su velocidad deriva mediante el espaciado cercano de aparatos receptores, sin embargo, el costo de estos equipos limita las posibles observaciones que se puedan obtener. El objetivo del proyecto de investigación propuesto es en primera instancia producir otro dispositivo más de bajo costo y luego junto con el que ya se ha desarrollado, realizar un análisis de la velocidad de deriva zonal de las irregularidades ionosféricas mediante el espaciado de estos sensores en diferentes puntos del campus central del Instituto Tecnológico de Costa Rica

## Cumplimiento de actividades

Actividad	Productos	Comentarios
Definición del Marco Teórico (revisión bibliográfica) y objetivos	Marco teórico presentado en la propuesta de proyecto de investigación	Se determinaron los artículos publicados entre el 2021 y 2024 que estuvieran relacionados con centelleo ionosférico. Adicionalmente, se analizaron las publicaciones relacionadas con la construcción e implementación de los dispositivos ScintPi por parte de la Universidad de Texas en Dallas. Una de las limitaciones importantes es el tiempo limitado que se tenía para el desarrollo de la actividad, puesto que la lectura y análisis de referencias bibliográficas requiere de mucho tiempo.
Identificación de Métodos y Técnicas	Metodología desarrollada para la construcción del dispositivo tipo ScintPi, presentada en el proyecto de investigación.	Una fortaleza es que ya se contaba con las publicaciones realizadas por el equipo de la Universidad de Dallas en Texas, por lo que resultó sencillo plantear la metodología a implementar.
Diseño y Planificación de Pruebas de Concepto	Lista de componentes necesarios para la construcción del dispositivo tipo ScintPi, los cuales se adquirieron mediante recurso del FDU.	El proceso de compra de los componentes se hizo mediante el FDU. Una limitante en el avance son los plazos necesarios desde la solicitud y hasta recibir los elementos requeridos.
Implementación de Pruebas de Concepto	Dispositivo tipo ScintPi desarrollado y funcional.	La adaptación de la metodología desarrollada por la Universidad de Texas en Dallas a los componentes que logramos obtener representó el principal reto de esta actividad, puesto que en la Escuela de Física se cuenta con poca experiencia en el ensamblaje de estos dispositivos. Una fortaleza fue la colaboración con el laboratorio DELTA que permitió la implementación exitosa del dispositivo.

Análisis de Resultados	Datos que confirman la capacidad para construir y operar un dispositivo tipo ScintPi para el monitoreo de eventos de centelleo ionosférico.	La principal limitación de esta actividad fue el desarrollo del software correspondiente para poder obtener las mediciones de $S_4$ puesto que no existía experiencia institucional en el manejo de este tipo de datos.
Redacción de la Propuesta de Investigación	Propuesta de investigación redactada.	La rigidez del formato exigido para las propuestas VIE representa un reto para el equipo de investigación.

### Ejecución presupuestaria

El proyecto contó con la aprobación de ₡ 1 080 000 colones para becas de estudiante asistente especial. Se contó con dos asistentes durante la ejecución del proyecto, cada asistente contó con 10 horas para un total de 20 horas mensuales durante 10 meses.

Se utilizaron recursos del FDU de la Escuela de Física para la compra de los elementos necesarios para desarrollar el dispositivo tipo ScintPi. Los mismos se desglosan en la siguiente tabla:

Componente	Precio
Raspberry Pi 3 Modelo B+ Tabla (3B+)	₡40316
Placa miniaturizada de alta precisión - Receptor GNSS de 72 canales	₡47200
USB a TTL Cable Serial ADAFRUIT Industries 954, Raspberry PI (1 Pieza)	₡20025
Cable Coaxial SMA a IPX SMA Hembra Jack Bulkhead a IPEX UFL MHF4 RF Pigtail WiFi Cable de Extensión de Antena.	₡17680
Antena GPS con tornillo y montaje adhesivo de 3M, con conector SMA macho. Antena GNSS GPS GLONASS BEIDOU GAILEO Banda L1	₡37242
<b>Total</b>	<b>₡162463</b>

Tabla 1. Componentes electrónicos encargados a través del FDU para construir el dispositivo ScintPi

### Valoración general de los resultados obtenidos

La actividad realizada tuvo un impacto positivo y directo sobre la población meta, al fortalecer las capacidades locales para el estudio del centelleo ionosférico, un fenómeno poco caracterizado en regiones tropicales. El desarrollo y validación de un dispositivo tipo ScintPi permitió no solo generar insumos científicos relevantes, sino también fomentar la participación de investigadores y estudiantes en procesos de diseño, ensamblaje y análisis de datos reales, alineándose con los objetivos de formación e investigación aplicada.

Los plazos de ejecución fueron razonables y permitieron cumplir con los objetivos propuestos, aunque el desarrollo y ensamblaje del prototipo requirió ajustes logísticos que fueron solventados oportunamente gracias a la colaboración con el laboratorio DELTA. Los recursos asignados fueron utilizados de forma eficiente, priorizando la adquisición de componentes críticos y el apoyo de los estudiantes necesario para la implementación exitosa de la prueba de concepto.

La actividad fue pertinente para las instancias académicas participantes, al contribuir a líneas de investigación institucionales y promover la colaboración interuniversitaria. También aportó valor a la región al fortalecer capacidades en monitoreo ionosférico con aplicaciones prácticas. Como equipo, se aprendió la importancia de planificar con mayor detalle el desarrollo instrumental y adaptar metodologías internacionales a las condiciones locales.

Como resultado además, se propone una propuesta de investigación titulada “Caracterización de la dinámica de irregularidades ionosféricas sobre Costa Rica mediante una red de dispositivos de bajo costo”, que pretende dar un paso adicional en el estudio del centelleo ionosférico sobre Costa Rica, considerando que se han construido las capacidades suficientes como para construir y medir los valores del centelleo ionosférico.

<b>Acuerdo de Consejo de Instancia académica</b>			
Instancia académica	Oficio	Sesión y artículo	Fecha
Escuela de Física	FIS-153-2023	27-2023 Artículo 3	21/08/2023

Por este medio, manifestamos expresamente y declaramos bajo fe de juramento que la información suministrada en cada folio del presente formulario de presentación de informe final de actividades de fortalecimiento aprobadas por la VIE, es completa y también correcta, y que los datos suministrados son verídicos. Así mismo, declaramos que la propiedad intelectual de los resultados del proyecto se manejó conforme a la normativa institucional establecida para tal efecto.

<b>FIRMAS</b>		
<b>Director (a) de la instancia académica responsable del proyecto</b>	Nombre:	Jonatan Sanchez Valle
	Cédula:	503660700
	Firma:	
<b>Responsable del proyecto</b>	Nombre:	Carlos Gutiérrez Chaves
	Cédula:	113940644
	Firma:	

### Adjuntos

- Documento en el que se sistematice el producto generado. En caso de una propuesta de un proyecto de investigación, debe presentarse en el formato establecido por la fuente de financiamiento a la cual estarán eventualmente presentado el proyecto.
- Listas de asistencia de todas las actividades grupales realizadas (cuando corresponda).
- Listado de todas las fuentes de información consultadas.
- Cualquier otra evidencia que el grupo ejecutor considere oportuna.
- Acuerdo de los consejos de todas las instancias académicas ejecutoras.

*Actualizado: Febrero, 2023*

## Referencias:

- Aswathy, R. P., & Manju, G. (2021). Equatorial Ionization Anomaly crest magnitude and its implications on the nocturnal equatorial ionospheric plasma irregularity characteristics. *ADVANCES IN SPACE RESEARCH*, 68(10), 4129–4136. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.07.019>
- Atabati, A., Alizadeh, M., Schuh, H., & Tsai, L. C. (2021). Ionospheric Scintillation Prediction on S4 and ROTI Parameters Using Artificial Neural Network and Genetic Algorithm. *Remote Sensing* 2021, Vol. 13, Page 2092, 13(11), 2092. <https://doi.org/10.3390/RS13112092>
- Atabati, A., Jazireeyan, I., Alizadeh, M., & Langley, R. B. (2024). Prediction of Ionospheric Scintillation with ConvGRU Networks Using GNSS Ground-Based Data across South America. *REMOTE SENSING*, 16(15). <https://doi.org/10.3390/rs16152757>
- Atabati, A., Jazireeyan, I., Alizadeh, M., Pirooznia, M., Flury, J., Schuh, H., Soja, B., Alberti, T., & Pignalberi, A. (2023). Analyzing the Ionospheric Irregularities Caused by the September 2017 Geomagnetic Storm Using Ground-Based GNSS, Swarm, and FORMOSAT-3/COSMIC Data near the Equatorial Ionization Anomaly in East Africa. *REMOTE SENSING*, 15(24). <https://doi.org/10.3390/rs15245762>
- Ayyagari, D., Datta, A., & Chakraborty, S. (2022). Systematic study of ionospheric scintillation over the Indian low-latitudes during low solar activity conditions. *ADVANCES IN SPACE RESEARCH*, 70(8), 2506–2521. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.07.026>
- Bai, W., Liu, X., Tan, G., Sun, Y., Du, Q., Meng, X., Liu, C., Xia, J., Yin, C., Huang, F., & Hu, P. (2022). The Accuracy Assessment and Scientific Research Progress of Ionospheric Radio Occultation Products Observed by Fengyun-3 GNOS. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE*, 15, 9775–9784. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3217681>
- Bumrungrkit, A., Supnithi, P., Saito, S., & Myint, L. M. M. (2022). A study of equatorial plasma bubble structure using VHF radar and GNSS scintillations over the low-latitude regions. *GPS SOLUTIONS*, 26(4). <https://doi.org/10.1007/s10291-022-01321-4>
- Carmo, C. S., Denardini, C. M., Figueiredo, C. A. O. B., Resende, L. C. A., Moro, J., Silva, R. P., Nogueira P. A. B. and Chen, S. S., Picanco, G. A. S., & Neto, P. F. B. (2022). Findings of the unusual plasma bubble occurrences at dawn during the recovery phase of a moderate geomagnetic storm over the Brazilian sector. *JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND SOLAR-TERRESTRIAL PHYSICS*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105908>
- Carrano, C., & Groves, K. (2010). Temporal Decorrelation of GPS Satellite Signals due to Multiple Scattering from Ionospheric Irregularities. *23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation 2010, ION GNSS 2010*, 1, 361–374.
- Darya, A. M., Shaikh, M. M., & Fernini Ilias and AlNaimiy, H. (2022). Mapping of S4 Over the Arabian Peninsula During Solar Minimum. *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*, 19. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3202245>

- Darya, A. M., Shaikh, M. M., Nykiel, G., Ghamry, E., & Fernini, I. (2024). Multi-instrument analysis of L-band amplitude scintillation observed over the Eastern Arabian Peninsula. *ADVANCES IN SPACE RESEARCH*, 74(4), 1856–1867. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.05.034>
- Dey, A., Joshi, L. M., Chhibba, R., & Sharma, N. (2021). A study of ionospheric effects on IRNSS/NavIC positioning at equatorial latitudes. *ADVANCES IN SPACE RESEARCH*, 68(12), 4872–4883. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.09.038>
- Duann, Y., Chang, L. C., & Liu, J.-Y. (2023). Impact of the February 3-4, 2022 geomagnetic storm on ionospheric S4 amplitude scintillation index: Observations and implications. *ADVANCES IN SPACE RESEARCH*, 72(10), 4379–4391. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.09.036>
- El-Rabbany, A. (2002). Introduction to GPS Processing. In *Communications* (Vol. 26, Issue 4). Artech House.
- Enengl, F., Spogli, L., Kotova, D., Jin, Y., Oksavik, K., Partamies, N., & Miloch, W. J. (2024). Investigation of Ionospheric Small-Scale Plasma Structures Associated With Particle Precipitation. *SPACE WEATHER-THE INTERNATIONAL JOURNAL OF RESEARCH AND APPLICATIONS*, 22(1). <https://doi.org/10.1029/2023SW003605>
- Flisek, P., Forte, B., Fallows, R., Kotulak Kacper and Krankowski, A., Bisi, M., Mevius, M., Fron, A., Tiburzi, C., Soida, M., Smierciak, B., Grzesiak, M., Matyjasiak, B., Pozoga, M., Dabrowski, B., Mann, G., Vocks, C., Zucca, P., & Blaszkievicz, L. (2023). Towards the possibility to combine LOFAR and GNSS measurements to sense ionospheric irregularities. *JOURNAL OF SPACE WEATHER AND SPACE CLIMATE*, 13. <https://doi.org/10.1051/swsc/2023021>
- Gomez Socola, J., Rodrigues, F. S., Wright, I. G., Paulino, I., & Buriti, R. (2025). ScintPi measurements of low-latitude ionospheric irregularity drifts using the spaced-receiver technique and SBAS signals. *Atmospheric Measurement Techniques*, 18(4), 909–919. <https://doi.org/10.5194/AMT-18-909-2025>
- Gomez Socola, J., Sousasantos, J., Rodrigues, F. S., Brum, C. G. M., Terra, P., Moraes, A. O., & Eastes, R. (2023). On the quiet-time occurrence rates, severity and origin of L-band ionospheric scintillations observed from low-to-mid latitude sites located in Puerto Rico. *JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND SOLAR-TERRESTRIAL PHYSICS*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106123>
- Huang, C.-Y., Liu, J.-Y., Chang, F.-Y., Lin Chi-Yen and Chao, C.-K., Chang, L. C., & Lin, C. Y. (2022). Instantaneous amplitude of low-latitude ionospheric irregularities probed by ROCSAT-1, DEMETER, and FORMOSAT-7/COSMIC-2. *ADVANCES IN SPACE RESEARCH*, 70(3), 723–732. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.05.024>
- Imam, R., Alfonsi, L., Spogli, L., & Cesaroni Claudio and Dosis, F. (2024). On estimating the phase scintillation index using TEC provided by ISM and IGS professional GNSS receivers and machine learning. *ADVANCES IN SPACE RESEARCH*, 73(7), 3753–3771. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.07.039>
- Kaplan, E. D. (1996). *Understanding GPS: Principles and Applications* (E. D. Kaplan, Ed.). Artech House.

[https://books.google.co.uk/books?id=p7hfQgAACAAJ&hl=es&source=gbs\\_book\\_other\\_versions](https://books.google.co.uk/books?id=p7hfQgAACAAJ&hl=es&source=gbs_book_other_versions)

- Koulouri, A. (2022). Real-Time Ionospheric Imaging of S4 Scintillation From Limited Data With Parallel Kalman Filters and Smoothness. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 60. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3140600>
- Li, C., Hancock, C. M., Vadakke Veettil, S., Zhao, D., & Hamm, N. A. S. (2022). Mitigating the Scintillation Effect on GNSS Signals Using MP and ROTI. *REMOTE SENSING*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/rs14236089>
- Liu, J.-Y., Lin, C.-H., Rajesh Panthalingal Krishnanunni and Lin, C.-Y., Chang, F.-Y., Lee, I.-T., Fang, T.-W., Fuller-Rowell, D., & Chen, S.-P. (2022). Advances in Ionospheric Space Weather by Using FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS Radio Occultations. *ATMOSPHERE*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/atmos13060858>
- Liu, T. J.-Y., Lin, C. C.-H., Lin, C.-Y., Lee, I.-T., Sun, Y.-Y., Chen, S.-P., Chang, F.-Y., Rajesh, P. K., Hsu, C.-T., Matsuo Tomoko and Chen, C.-H., & Tsai, H.-F. (2022). Retrospect and prospect of ionospheric weather observed by FORMOSAT-3/COSMIC and FORMOSAT-7/COSMIC-2. *TERRESTRIAL ATMOSPHERIC AND OCEANIC SCIENCES*, 33(1). <https://doi.org/10.1007/s44195-022-00019-x>
- Luo, W., Li, H., Xiong, C., Zhu, Z., & Yu Xiao and Chang, S. (2022). Linkage of Equatorial Ionization Anomaly With the Day-To-Day Occurrence of Postsunset Irregularities and Scintillation in Low-Latitude Region Around 110°E. *SPACE WEATHER-THE INTERNATIONAL JOURNAL OF RESEARCH AND APPLICATIONS*, 20(10). <https://doi.org/10.1029/2022SW003192>
- Luo, X., Lin, Y., Dai, X., Bian, S., & Chen, D. (2024). An Improved Stochastic Model for the Geodetic GNSS Receivers Under Ionospheric Scintillation at Low Latitudes. *SPACE WEATHER-THE INTERNATIONAL JOURNAL OF RESEARCH AND APPLICATIONS*, 22(2). <https://doi.org/10.1029/2023SW003632>
- Martinon, A. R. F., Stephany, S., & de Paula, E. R. (2023). A new approach for the generation of real-time GNSS low-latitude ionospheric scintillation maps. *JOURNAL OF SPACE WEATHER AND SPACE CLIMATE*, 13. <https://doi.org/10.1051/swsc/2023015>
- Martinon, A. R. F., Stephany, S., & de Paula, E. R. (2024). Challenges in real-time generation of scintillation index maps. *BOLETIM DE CIENCIAS GEODESICAS*, 30(SI). <https://doi.org/10.1590/s1982-21702024000100004>
- Meenakshi, S., Sridharan, S., & Ivan, J. S. (2022). Migrating and non-migrating tidal influences on the high occurrence of post-midnight spread F over Ascension Island during solar minimum. *ADVANCES IN SPACE RESEARCH*, 69(9), 3398–3416. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.02.019>
- Nasurudiin, S., Yoshikawa, A., Elsaid, A., & Mahrous, A. (2024). Prediction of Ionospheric Scintillations Using Machine Learning Techniques during Solar Cycle 24 across the Equatorial Anomaly. *ATMOSPHERE*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/atmos15101213>

- Oladipo, O. A., Olawepo, A. O., Adeniyi, J. O., Adimula I. A. and Willoughby, A. A., & Doherty, P. H. (2023). Effect of geomagnetic storms on L-band scintillation over Ilorin, Nigeria. *ADVANCES IN SPACE RESEARCH*, 71(11), 4587–4593. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.01.021>
- Olwendo, J., & Cilliers, P. (2018). A comparison of ionospheric scintillation proxy indices derived from low rate IGS data with the amplitude scintillation index, S4, in a low latitude region over Africa. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 173, 160–167. <https://doi.org/10.1016/J.JASTP.2018.04.012>
- Ondede, G. O., Rabiou, A. B., Okoh, D., Baki Paul and Olwendo, J., Shiokawa, K., & Otsuka, Y. (2022). Relationship between geomagnetic storms and occurrence of ionospheric irregularities in the west sector of Africa during the peak of the 24th solar cycle. *FRONTIERS IN ASTRONOMY AND SPACE SCIENCES*, 9. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.969235>
- Panda, S. K., Moses, M., Ansari, K., & Walo, J. (2023). Ionospheric scintillation characteristics over Indian region from latitudinally-aligned geodetic GPS observations. *EARTH SCIENCE INFORMATICS*. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01070-z>
- Prol, F. S., Hoque, M. M., Hernandez-Pajares, M., Yuan, L., Olivares-Pulido, G., von Engel, A., Marquardt, C., & Notarpietro, R. (2023). Study of Ionospheric Bending Angle and Scintillation Profiles Derived by GNSS Radio-Occultation with MetOp-A Satellite. *REMOTE SENSING*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/rs15061663>
- Rodrigues, F. S., & Moraes, A. O. (2019). ScintPi: A Low-Cost, Easy-to-Build GPS Ionospheric Scintillation Monitor for DASI Studies of Space Weather, Education, and Citizen Science Initiatives. *Earth and Space Science*, 6(8), 1547–1560. <https://doi.org/10.1029/2019EA000588>
- Seechai, K., Myint, L. M. M., Hozumi, K., Nishioka, M., Saito, S., Yamamoto, M., & Supnithi, P. (2023). Simultaneous equatorial plasma bubble observation using amplitude scintillations from GNSS and LEO satellites in low-latitude region. *EARTH PLANETS AND SPACE*, 75(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01877-6>
- Sun, A. K., Pi, X., Rino, C., & Lee, J. (2023). Statistical Uncertainty in the Frequency Dependence of the Intensity Scintillation Index (S4). *RADIO SCIENCE*, 58(7). <https://doi.org/10.1029/2023RS007659>
- Tahir, A., Wu, F., Shah, M., Amory-Mazaudier, C., Jamjareegulgarn, P., Verhulst, T. G. W., & Ameen, M. A. (2024). Multi-Instrument Observation of the Ionospheric Irregularities and Disturbances during the 23-24 March 2023 Geomagnetic Storm. *REMOTE SENSING*, 16(9). <https://doi.org/10.3390/rs16091594>
- Tseng, T.-P., Yeh, W.-H., Tsai, Y.-F., Hsiao Tung-Yuan and Tsai, Y.-H., Kuo, P.-J., Chen, K.-L., & Hsiao, Y.-S. (2024). Satellite orbit determination and time synchronization using GPS single-frequency observables in low and high solar activities. *EARTH PLANETS AND SPACE*, 76(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-024-02033-4>
- Valladares, C. E., Chen, Y.-J., Hairston, M., Chau, J. L., & Dhanya, R. (2023). Observation of Scintillation Enhancements and Large-Scale Structures Within the Equatorial Ionization

Anomaly During a Sudden Stratospheric Warming Event. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-SPACE PHYSICS*, 128(2). <https://doi.org/10.1029/2022JA030985>

- Vankadara, R., Dashora, N., Panda, S. K., & Dabbakuti, J. R. K. K. (2024). A Comparative Analysis of the Effect of Orbital Geometry and Signal Frequency on the Ionospheric Scintillations over a Low Latitude Indian Station: First Results from the 25th Solar Cycle. *REMOTE SENSING*, 16(10). <https://doi.org/10.3390/rs16101698>
- Vankadara, R. K., Jamjareegulgarn, P., Seemala, G. K., Siddiqui, M. I. H., & Panda, S. K. (2023). Trailing Equatorial Plasma Bubble Occurrences at a Low-Latitude Location through Multi-GNSS Slant TEC Depletions during the Strong Geomagnetic Storms in the Ascending Phase of the 25th Solar Cycle. *REMOTE SENSING*, 15(20). <https://doi.org/10.3390/rs15204944>
- Wang, Y., Yuan, Y., Li, M., Zhang, T., Geng Hao and Wang, G., & Wen, G. (2023). Effects of Strong Geomagnetic Storms on the Ionosphere and Degradation of Precise Point Positioning Accuracy during the 25th Solar Cycle Rising Phase: A Case Study. *REMOTE SENSING*, 15(23). <https://doi.org/10.3390/rs15235512>
- Wright, I. G., Rodrigues, F. S., Socola Josemaria Gomez and Moraes, A. O., Monico, J. F. G., Sojka, J., Scherliess, L., Layne, D., Paulino, I., Buriti, R. A., Brum, C. G. M., Terra, P., Deshpande Kshitija and Vaggu, P. R., Erickson, P. J., Frissell Nathaniel A. and Makela, J. J., & Scipion, D. (2023). On the detection of a solar radio burst event that occurred on 28 August 2022 and its effect on GNSS signals as observed by ionospheric scintillation monitors distributed over the American sector. *JOURNAL OF SPACE WEATHER AND SPACE CLIMATE*, 13. <https://doi.org/10.1051/swsc/2023027>
- Wu, Q., Chou, M.-Y., Schreiner, W., Braun, J., Pedatella, N., & Cherniak, I. (2021). COSMIC observation of stratospheric gravity wave and ionospheric scintillation correlation. *JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND SOLAR-TERRESTRIAL PHYSICS*, 217. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105598>
- Xiong, B., Yu, C., Li, X., Li, Y., Hu, L., Wang, Y., Du, L., & Wang, Y. (2024). Statistical Analysis of the Occurrence of Ionospheric Scintillations at the Low-Latitude Sanya Station During 2004-2021. *REMOTE SENSING*, 16(24). <https://doi.org/10.3390/rs16244668>
- Yeh, W.-H., Huang, C.-Y., Chen, K.-L., Tseng Tzu-Pang and Hsiao, T.-Y., Ho, H.-H., Wu, J.-M., Huang, J.-Y., Li, H.-W., Lin, C.-C., Lee, I.-T., & Liu, T.-Y. (2022). Introduction of TROPS ionospheric TEC products for FORMOSAT-7/COSMIC-2 mission. *TERRESTRIAL ATMOSPHERIC AND OCEANIC SCIENCES*, 33(1). <https://doi.org/10.1007/s44195-022-00027-x>
- Yu, S., & Liu, Z. (2021). The ionospheric condition and GPS positioning performance during the 2013 tropical cyclone Usagi event in the Hong Kong region. *EARTH PLANETS AND SPACE*, 73(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01388-2>