

TRABAJO FIN DE GRADO
GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL

Análisis Inicial de la Dependencia del Error en la Señal GPS Bajo Condiciones de Aurora

Autor: Miguel Ángel García-Magariño Sánchez de Medina

Tutor: María José Madero Ayora

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Aeroespacial

Análisis Inicial de la Dependencia del Error en la Señal GPS Bajo Condiciones de Aurora

Autor:

Miguel Ángel García-Magariño Sánchez de Medina

Tutor:

María José Madero Ayora

Profesora titular

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Grado: Análisis Inicial de la Dependencia del Error en la Señal GPS Bajo Condiciones de Aurora

Autor: Miguel Ángel García-Magariño Sánchez de Medina

Tutor: María José Madero Ayora

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi madre, por ser mi ejemplo de lucha constante y por enseñarme los valores de la perseverancia y el amor.

A mi padre, por enseñarme el pensamiento crítico e inculcarme la pasión por la ciencia y la tecnología.

A ellos, por su incondicional apoyo.

Agradecimientos

Si bien este proyecto surgió como una iniciativa propia, no habría sido posible llevarlo a cabo sin el apoyo de todas las personas que creyeron en él. Por ello, quisiera agradecer a la Dirección de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla la confianza depositada en mí al patrocinar la incursión ártica y permitirme representar a la Universidad de Sevilla en la expedición Polar Raid como participante investigador.

Así mismo, es necesario agradecer a la delegación sevillana de Leica Geosystems su gran apoyo al ceder material de geoposicionamiento profesional para la realización de medidas precisas.

Mención especial al equipo de organización de Polar Raid, Jose María Jayme y Carlos Trujillo, por volcarse conmigo durante el desarrollo de la toma de datos y enseñarme el auténtico valor de la aventura y la investigación de campo.

Finalmente, gracias a la tutora de este trabajo, María José Madero Ayora, por aceptar tutelar el trabajo y guiarme con tan buenos consejos en su proceso.

Resumen

Los sistemas de geoposicionamiento GPS se basan en enviar señales electromagnéticas con información de posición y tiempo a todos los puntos de la Tierra, que son leídos e interpretados por receptores GPS que resuelven el cálculo. Pero en su camino a la superficie terrestre, esta señal atraviesa varias capas de la atmósfera que la alteran significativamente. En concreto, en regiones polares, la ionosfera se ve alterada por distintos fenómenos geomagnéticos que causan la aparición de auroras.

Este estudio pretende caracterizar la alteración de la señal recibida de los satélites GPS bajo distintas condiciones atmosféricas causantes de auroras. Para ello compara la relación señal-ruido (SNR) de la señal recibida de los satélites con el Índice K_p en distintas horas y días. Todas estas señales son tomadas en distintos puntos del Ártico, además de registrar las condiciones atmosféricas y geomagnéticas presentes en cada momento del estudio.

Varias relaciones de dependencia del Índice K_p y distintos parámetros geomagnéticos son extraídas al analizar los datos como paso previo al análisis de la señal satelital. En cuanto a la alteración de ésta, no se aprecia una evolución de los SNR medios de todos los satélites, pero sí se encuentra una clara dependencia de la distribución y desviación estándar de los SNR con el Índice K_p registrado en cada día.

Términos índice: GPS, auroras, índice K_p, señal satelital, SNR

Abstract

GPS geolocation systems are based on sending electromagnetic signals with position and time information everywhere on Earth, which are read and interpreted by GPS receivers. But on its way to the Earth's surface, this signal travels across several layers of the atmosphere that significantly change it. Specifically in polar areas, the ionosphere is altered by different geomagnetic phenomena that cause the appearance of auroras.

This study aims to characterize the alteration of the signal received from GPS satellites under different atmospheric conditions that cause auroras. To get this, it compares the signal-to-noise ratio (SNR) of the signal received from the satellites versus the Kp Index at different times and days. All these signals are registered at different points of the Arctic, in addition to recording the atmospheric and geomagnetic conditions present at each moment of the study.

Several dependency relations between the Kp Index and different geomagnetic parameters show up by analyzing the data, as a previous step to the analysis of the satellite signal. As for the alteration the electromagnetic signal, there is no evolution of the average SNR of all satellites, but there is a clear dependence on the distribution and standard deviation of the SNR versus the Kp Index recorded on each day.

Index Terms: GPS, auroras, Kp index, satellite signal, SNR

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
1 Introducción y justificación	1
2 Funcionamiento del sistema GPS	3
2.1 Historia y precedentes del GPS	3
2.2 La red GPS	4
2.3 Bases del funcionamiento del GPS	4
2.4 La señal de radiofrecuencia	6
2.5 Métodos de posicionamiento con receptores de una frecuencia	8
2.5.1 Posicionamiento absoluto	8
2.5.2 Posicionamiento preciso	8
2.5.3 Sistema de aumento basado en satélites (SBAS)	8
2.5.4 GPS Diferencial (DGPS)	9
2.5.5 Local Area Augmentation System (LAAS)	10
2.6 Errores en la señal GPS	10
2.6.1 Errores en el satélite	11
2.6.2 Errores en el receptor	11
2.6.3 Errores de propagación	11
3 Ionosfera y modelos	13
3.1 Capas de la atmósfera	13
3.2 Estructura estándar de la ionosfera	14
3.3 Variaciones de la ionosfera	15
3.3.1 Variaciones predecibles	15
3.3.2 Variaciones impredecibles	18
3.4 Efectos de la ionosfera en la propagación de señales EM	19
4 Las auroras	25
4.1 Historia del estudio de las auroras	26
4.2 Formación de las auroras	27
4.2.1 Origen	27
4.2.2 Proceso en la atmósfera	30
4.3 Tipos de auroras	32

5	Trabajo de campo y metodología	33
5.1	Fechas y localizaciones	33
5.2	Equipos de medida	35
5.2.1	Teléfono móvil OnePlus One	35
5.2.2	GPS Leica Geosystems	35
5.3	Recopilación de datos	37
6	Análisis de los resultados	41
6.1	El Índice Kp como función de los parámetros geomagnéticos	42
6.1.1	Introducción	42
6.1.2	Gráficas	43
6.1.3	Análisis	45
6.2	Correlación cruzada de los parámetros geomagnéticos	46
6.2.1	Introducción	46
6.2.2	Gráficas	46
6.2.3	Análisis	49
6.3	SNR frente al Índice Kp	50
6.3.1	Introducción	50
6.3.2	Gráficas	51
		53
6.3.3	Análisis	54
6.4	Correlación cruzada de Índice Kp y valores SNR	55
6.4.1	Gráficas	55
6.4.2	Análisis	57
7	Conclusiones	59
8	Anexos	63
8.1	Parámetros de los satélites y valores SNR registrados	63
8.2	Código de funciones utilizadas en Matlab	66
8.2.1	Cálculo de índice de refracción local de la troposfera	66
8.2.2	Cálculo del índice de refracción equivalente para troposfera en vertical (para h=15 km)	66
8.2.3	Creación de matrices de los registros de parámetros geomagnéticos y atmosféricos	67
8.2.4	Creación de gráficas de los parámetros geomagnéticos y cálculo de índice de correlación	68
8.2.5	Creación de gráficas de los parámetros satelitales y cálculo de índice de correlación	72
8.3	Recomendación UIT-R P.453-13 de cálculo de Índice de refracción radioeléctrica en troposfera	78
8.3.1	Cálculo de n local	78
8.3.2	Cálculo de n con la altura	79
	Referencias y bibliografía	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Fuentes de errores GPS (12)	12
Tabla 5.1: Días, horas y lugares exactos de la toma de medidas GPS	34
Tabla 5.2: Especificaciones técnicas del receptor GPS de Leica Geosystems	36
Tabla 6.1: Valores de las condiciones geomagnéticas en cada toma	41
Tabla 8.1: Valores de Identificador, Azimut, Elevación y SNR de cada satélite registrado	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Imagen 2.1: Órbitas de la constelación GPS	4
Imagen 2.2. Trilateración 3D. Calculando la distancia a 3 satélites de posición conocida, se determina la posición exacta del punto B. Adaptación de (6)	5
Imagen 2.3: Onda portadora, mensaje y onda modulada. Adaptación de (27)	6
Imagen 2.4: Estructura del SBAS	9
Imagen 2.5: estructura del DGPS	10
Imagen 3.1: Capas de la atmósfera y su temperatura según la altitud (29)	13
Imagen 3.2: regiones de la ionosfera y cantidad de electrones (28)	14
Imagen 3.3: Ejemplo de un GIM (32). Se observa un mayor TEC en latitudes ecuatoriales y en longitudes donde es de día.	15
Imagen 3.4. Variación de la estructura ionosférica durante el día y la noche (33)	16
Imagen 3.5: Manchas solares anuales desde 1900 hasta la actualidad (34)	17
Imagen 3.6: Expulsión de material en una llamarada solar (22)	18
Imagen 3.7: Curvatura de la trayectoria de una señal EM al atravesar la atmósfera	19
Imagen 3.8: Geometría de una señal GPS atravesando la atmósfera. Adaptación de (25)	22
Imagen 4.1. Aurora sobre el Círculo Polar Ártico. Autoría propia.	25
Imagen 4.2: Kristian Birkeland realizando su experimento de bombardear una pequeña esfera imantada con haces de electrones. Se puede apreciar el resplandor que producían los impactos de electrones.	26
Imagen 4.3. Expulsión de material al espacio por una llamarada solar (22)	27
Imagen 4.4. Campo magnético solar y campo magnético terrestre. Adaptación de (35)	28
Imagen 4.5. Evolución de las líneas de campo magnético que producen las auroras nocturnas. En líneas amarillas se representan las líneas de campo magnético solar, en azul las de campo magnético terrestre, y en verde las líneas de campo terrestre arrastrando partículas de viento solar. Con flechas amarillas se representa el movimiento de partículas cargadas dentro de las líneas de campo, y con flechas blancas el desplazamiento de las líneas de campo por la presión ejercida por el sol. Adaptación de (23)	29
Imagen 4.6. Excitación de un átomo de oxígeno y posterior emisión de un fotón para volver al estado fundamental	30
Imagen 4.7. Óvalo auroral en torno al polo sur geográfico (22)	31
Imagen 4.8. De arriba abajo y de izquierda a derecha: aurora de arco, de corona, difusa y de volantes. Adaptación de (24)	32
Imagen 5.1: Ruta seguida a través de Laponia	33
Imagen 5.2: Receptor utilizado bajo una aurora boreal	35
Imagen 5.3. Ejemplo de interfaz del programa GPS Status. Para cada satélite se registra SNR, operatividad,	

azimut y elevación, pudiendo elegir sistema GPS, GLONASS o BeiDou	38
Imagen 6.1: Índice Kp frente a Intensidad de Campo Magnético	43
Imagen 6.2: Índice Kp frente a componente Bz de Campo Magnético	43
Imagen 6.3: Índice Kp frente a Declinación de Campo Magnético B	44
Imagen 6.4: Índice Kp frente a Velocidad del Viento Solar	44
Imagen 6.5: Índice Kp frente a Densidad Electrónica	45
Imagen 6.6: Correlación cruzada de Índice Kp e Intensidad de Campo Magnético	46
Imagen 6.7: Correlación cruzada de Índice Kp y Componente Bz	47
Imagen 6.8: Correlación cruzada de Índice Kp y Declinación de Campo Magnético	47
Imagen 6.9: Correlación cruzada de Índice Kp y Velocidad Viento Solar	48
Imagen 6.10: Correlación cruzada de Índice Kp y Densidad Electrónica	48
Imagen 6.11: Índice Kp frente a la media de 3 máximos SNR registrados cada día	51
Imagen 6.12: Índice Kp frente a la media de los SNR registrados cada día	51
Imagen 6.13: Índice Kp frente al máximo SNR registrado cada día	52
Imagen 6.14: Índice Kp frente a la media de los 3 mínimos SNR registrados cada día	52
Imagen 6.15: Índice Kp frente al mínimo SNR registrado cada día	53
Imagen 6.16: Índice Kp frente a la desviación estándar del SNR	53
Imagen 6.17: Correlación cruzada de Índice Kp frente a los 3 máximos SNR	55
Imagen 6.18: Correlación cruzada de Índice Kp frente a la media SNR	55
Imagen 6.19: Correlación cruzada de Índice Kp frente a los 3 mínimos SNR	56
Imagen 6.20: Correlación cruzada de Índice Kp frente al máximo SNR	56
Imagen 6.21: Correlación cruzada de Índice Kp frente al mínimo SNR	57
Imagen 7.1: Registro de datos satelitales durante el trabajo de campo en regiones árticas	59
Imagen 7.2: Satélite ICON para el estudio de la ionosfera (22)	60

1 INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

*Let there be winter
let there be ice
deep powder snow
and the Northern Lights.*

La necesidad de orientación en las vastas regiones árticas precede a la era digital. Es a finales del siglo XIX cuando el hombre comienza a preguntarse qué hay más allá del fin de la tierra conocida y a adentrarse en lo más profundo de las zonas polares, hasta entonces inexploradas. Sin cartas de navegación ni más mapas que los que ellos mismos trazaban a su marcha, la única manera para estimar su posición era con el uso de sextantes. Así, podían calcular su latitud observando la bóveda celeste y la posición relativa del horizonte respecto al sol o a la Estrella Polar en el caso de las exploraciones árticas, y a la Cruz del Sur en el caso de las exploraciones antárticas. Se consiguieron grandes hazañas con estos escasos medios, pero tanto la precisión como la disponibilidad de estos sistemas de posicionamiento son demasiado limitados para los altos requerimientos que se exigen en nuestros días.

Por ello, a partir de la década de los 80, la navegación mundial se ha inclinado hacia los sistemas de posicionamiento por satélite o GNSS -*Global Navigation Satellite System*- que son capaces de ofrecer precisión submétrica en la geolocalización en casi cualquier punto de la Tierra y una disponibilidad y rapidez muy superiores a los utilizados hasta entonces. Complementados a menudo con sistemas de estimación, que consiguen ofrecer redundancia y continuidad de información, son la solución por excelencia para la navegación actual tanto en misiones militares como industriales o recreativas.

Tanto es así, que se estima que más de 5.000 millones de dispositivos dependen actualmente de distintos GNSS, sea para la geolocalización en tiempo real o para otros extendidos usos como la determinación y sincronización horaria exacta a nivel global, y este número de dispositivos aumentará exponencialmente en los próximos años (1).

Sin embargo, la información que se obtiene de estos sistemas satelitales no está exenta de errores e imprecisiones que pueden resultar críticos si no se controlan adecuadamente. Diversos factores introducen errores en la señal que llega a los receptores, que deben corregirlos o estimarlos para ofrecer una medida más precisa al usuario final. Y entre estas fuentes de errores, destaca sobremanera el error introducido por el paso de la señal a través de la ionosfera, que desvía la radiación proveniente de los satélites en función de su carga. Esta carga, además, es variable en función de la hora, la época del año y de la actividad solar, lo que lo convierte en un elemento altamente impredecible y, por ende, difícil de controlar frente a errores.

En zonas polares esta impredecibilidad se acentúa al ser la atmósfera de estas regiones el foco de la radiación solar desviada por la magnetosfera, con lo que puntuales tormentas solares tienen una repercusión mayor en el estado de la ionosfera polar y, por lo tanto, de las señales de radio que la atraviesan. Todo esto, sumado al hecho de que la cobertura de los GNSS se prioriza sobre las latitudes ecuatoriales y medias -donde se concentra la mayor parte de la población mundial-, motiva un estudio pormenorizado de la dependencia de calidad de la señal recibida en las perjudicadas altas latitudes con la actividad ionosférica.

Y, dado que la alta actividad en estas capas de la atmósfera está estrechamente correlacionada con la aparición de los fenómenos de aurora, de manera tendenciosamente poética **podemos emprender un estudio** equivalente al antes mencionado **que analice la relación de la señal recibida de los GNSS con la presencia de auroras en el cielo del receptor.**

Este estudio se inspira en la publicación *Ionospheric Effects in GNSS-Reflectometry From Space*, de Camps et al, que trataba de caracterizar el efecto de las variaciones ionosféricas en la señal recibida de satélites GNSS, más en concreto su degradación, tomando la relación señal a ruido (SNR) como parámetro de estudio. En sus propias palabras:

“(...) in this study, the global ionospheric scintillation model is first used to evaluate the total electron content and the scintillation index S4. The ionospheric scintillation impact is then evaluated as a degradation of the signal-to-noise ratio, which can be used to assess the altimetry and scatterometry performance degradation in a generic GNSS-R mission.” (2)

Ese estudio, sin embargo, se realizó en latitudes más ecuatoriales, donde la ionosfera no se ve azotada por los vientos solares de igual manera que en las regiones polares, como se explicará. Por ello, y por prescindir de todo el equipo técnico, presupuesto y personal que una investigación de esta magnitud requiere, que se optará por tomar información que aportan organismos internacionales de supervisión de la atmósfera y su actividad en regiones polares, en vez de recolectar todos los datos ionosféricos en el desarrollo.

Así mismo, estas limitaciones condicionarán críticamente el número de muestras de información satelital que se podrán tomar, pues estarán supeditadas al tiempo y disponibilidad para tomar los registros en condiciones extremas y en distintas regiones del Ártico. Es por ello que este estudio tendrá la intención de aportar un análisis inicial a este fenómeno, que podría marcar una senda y orientar el enfoque que se ha de tomar en futuros estudios de la señal GNSS.

2 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA GPS

Desde que en el Departamento de Defensa de EE.UU. lanzara a finales de los 70 el programa para constituir el primer GNSS, el llamado *Global Positioning System* -en adelante, GPS-, son varias las agencias que se han aventurado a formar su propio sistema de geoposicionamiento satelital. A fecha de 2019, podemos encontrar el sistema Galileo, perteneciente a la Agencia Espacial Europea (ESA); GLONASS, desarrollado por la antigua Unión Soviética y que hoy se encuentra administrado por la Federación de Rusia; y BeiDou, que empezó como un sistema de posicionamiento regional del gobierno de China, pero está en fase de ampliar su cobertura a todo el globo. Adicionalmente, podemos considerar los sistemas de aumento de precisión satelital que los estados de la India y Japón tienen en sus territorios con NAVIC y QZSS, respectivamente.

Sin embargo, bien por haber sido el primero operativo, bien por su mayor poder en el mercado, en el habla popular se suele mencionar únicamente al norteamericano GPS para referirse a cualquier sistema de geoposicionamiento por satélite genérico. Y también por ello, el presente estudio se centrará en el funcionamiento del sistema GPS, si bien por compartir con sus análogos las características más relevantes como la frecuencia de la señal radio, órbitas y método de codificación (3), la mayoría de los análisis y resultados aquí expuestos son extrapolables a los demás GNSS existentes.

2.1 Historia y precedentes del GPS

Aunque fue el primero conocido por el gran público, existió otro sistema de radionavegación por satélite antes del GPS. En plena carrera espacial y también desarrollado por el ejército de EE.UU., surge el sistema TRANSIT, que tenía como objetivo emitir señales para posicionar a sus submarinos alrededor del globo. Alcanzó pleno funcionamiento en 1964, y durante su vida útil hasta la década de los 80 tuvo puntuales usos también en el ámbito civil. Se trataba de una red de entre 4 y 7 satélites en órbita polar baja que emitían señales en dos frecuencias, 150 MHz y 400 MHz, que en conjunto con las efemérides calculadas de cada satélite, determinaban la posición de un submarino dado en dos dimensiones, es decir, debía ser complementada con la profundidad. A diferencia del actual GPS, al constar de pocos satélites la cobertura era mundial pero no constante, y la posición se calculaba a partir de medidas Doppler, con lo que tenía dos importantes inconvenientes: el periodo de tiempo entre dos medidas era demasiado largo -en torno a 15 minutos (4)- para ser considerado continuo, y la precisión en la estimación de la posición era superior a 25 m (5).

Con la creciente necesidad del geoposicionamiento en una sociedad global -aunque con la utilidad militar como principal motivación- el gobierno estadounidense da luz verde al programa NAVSTAR GPS, y entre 1978 y 1985 se lanzaron los once satélites pertenecientes a la primera generación de satélites en fase de prototipo, que se fue complementando con posteriores generaciones hasta llegar a 24 satélites y alcanzar plena capacidad operacional en 1995. Comenzó siendo un sistema exclusivamente militar, pero progresivamente se abrió a su uso civil ofreciendo en una primera fase el geoposicionamiento con disponibilidad selectiva. Ésta consistía en una degradación deliberada de la frecuencia de reloj satélite y un error en las efemérides transmitidas, con el objetivo de reducir la

precisión de posicionamiento de receptores civiles hasta los 100 m de radio en dispositivos de una frecuencia. No fue hasta el año 2000 que se aprobó dejar de degradar la señal para uso civil en todo el globo, si bien sigue bajo el control del ejército estadounidense y por lo tanto cabe la posibilidad de que pueda volver a limitarse su uso en caso de conflicto militar.

2.2 La red GPS

El sistema GPS no consta únicamente de los satélites, sino que requiere del funcionamiento conjunto de tres segmentos: el segmento tierra, el segmento espacio y el segmento usuario. El primero se compone de una serie de estaciones de observación situadas cerca del Ecuador, coordinadas por una estación maestra, cuya función es determinar la posición exacta de cada satélite -lo que llamaremos *efemérides*- y corregir la órbita de éstos si fuera necesario, así como calibrar los relojes atómicos en tierra y a bordo de cada satélite para asegurar la sincronización de todos ellos.

El segmento espacio consta de una constelación de 24 satélites -aunque actualmente cuenta con 30, algunos inoperativos- divididos en 6 órbitas, de manera que cada una de ellas contiene 4 satélites equidistantes. Esta configuración garantiza que desde cualquier punto del planeta se tendrá visual de al menos 4 satélites en todo momento. Éstos se sitúan en órbita circular de 20200 km de radio con un periodo sidéreo de 12 h, es decir, circunvalan la Tierra dos veces cada día, lo que evidencia que en un punto dado de la superficie no se tienen a la vista los mismos satélites en cada momento. Esto será muy relevante en el presente estudio, como se verá más adelante.

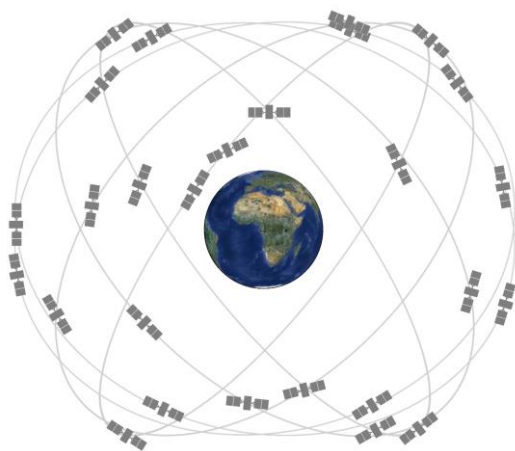


Imagen 2.1: Órbitas de la constelación GPS

Finalmente, en el segmento usuario están los receptores que determinarán su posición. Cada dispositivo es capaz de calcular su propia posición y velocidad a partir de la información que recibe de los satélites, que deberán estar en la visual del receptor. Estos dispositivos son elementos pasivos, es decir, sólo reciben señal de los satélites sin enviarles información de vuelta, lo que permite que el número de receptores sea ilimitado y, aún más importante, muchísimo más pequeños y económicos.

2.3 Bases del funcionamiento del GPS

Como se ha mencionado, el sistema se basa en la emisión de información por radiofrecuencia desde los satélites y la captación de ésta por los receptores situados en un punto concreto sobre la superficie de la Tierra. Pero la información recibida no es una medida de posición propiamente dicha, sino que en realidad se hace una medida de tiempos y, a partir de ésta, se determina una posición sobre una

esfera. La observable fundamental es el retardo entre la emisión de la señal radio desde un satélite y su recepción en tierra por un dispositivo. Dado que una onda electromagnética viaja a la velocidad de la luz, conocida esta velocidad en el vacío y el tiempo de vuelo de la onda, se puede extraer la distancia recorrida en línea recta por la onda a partir del satélite. Ésta será la denominada *pseudodistancia*.

$$d = c \cdot t \quad (2.1)$$

Conocida una distancia a un satélite, se obtiene una esfera solución, con centro el satélite emisor, de las infinitas posibles posiciones donde se encuentra el receptor, como se aprecia en la primera ilustración de la Imagen 2.2. Si se reciben medidas de dos satélites en posiciones distintas del espacio se obtienen dos esferas solución, de manera que es sabido que, para cumplir ambas condiciones, el receptor ha de encontrarse en alguno de los infinitos puntos de la circunferencia que describe la intersección de las dos esferas (segunda ilustración). Pero si se obtiene información de distancia de tres satélites, las soluciones posibles de la intersección de las tres esferas solución quedan reducidas a únicamente dos, representadas en la Imagen 2.2 como los puntos A y B. Dado que de estas dos soluciones, en la práctica, sólo una solución coincide con la superficie de la Tierra, la elección de la solución correcta se hace por lógica desambiguación, **quedando de esta manera determinada una única posición sobre la superficie del planeta**. Este proceso se conoce como trilateración en tres dimensiones.

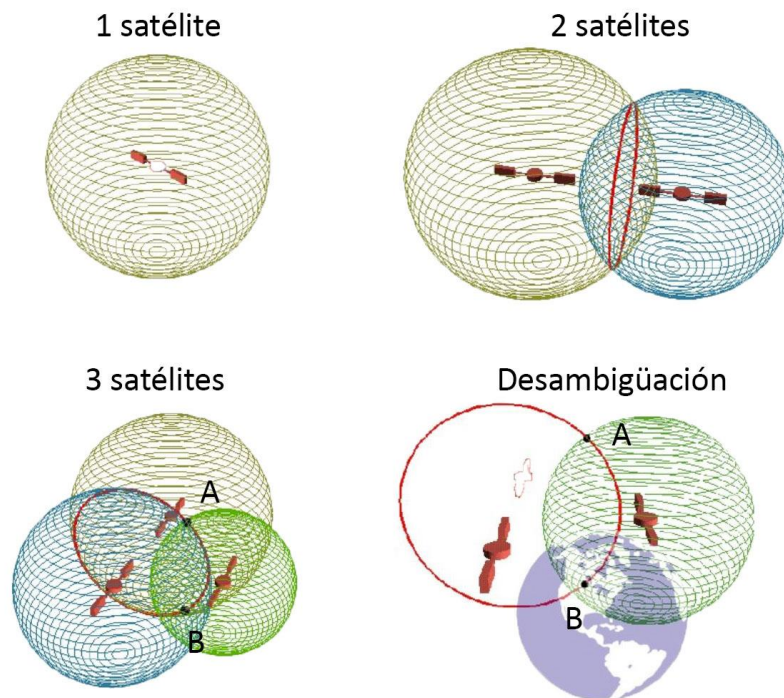


Imagen 2.2. Trilateración 3D. Calculando la distancia a 3 satélites de posición conocida, se determina la posición exacta del punto B. Adaptación de (6)

Por supuesto, la determinación del punto en el espacio es posible porque se conocen las posiciones exactas de los satélites emisores, que fueron calculadas por el segmento tierra y que se emiten en el mensaje de efemérides. Así, **el receptor determina su propia posición a partir de las distancias a la posición conocida de tres satélites**.

No obstante, dada la enorme velocidad de la onda con la que se trabaja -que recorre 1 km cada 3.3

microsegundos- para la determinación precisa de los tiempos es necesario conocer la hora de emisión y recepción con la máxima exactitud, ya que un pequeño retraso supone grandes distancias de error. La hora de emisión es determinada por un extremadamente preciso reloj atómico a bordo del satélite, pero en los dispositivos receptores, por tamaño y costo, no se cuenta con un reloj de esta categoría que determine la hora de recepción.

Por ello, **para obtener una posición precisa, en la práctica hace falta la recepción de la señal de un cuarto satélite**, que permite resolver el sistema de ecuaciones con las tres incógnitas de distancias más la incógnita del error del reloj del receptor añadida al sistema.

2.4 La señal de radiofrecuencia

Cada satélite GPS radia de manera constante información completa de su posición y hora en el momento de la emisión, nombre del satélite y estado del satélite en dos frecuencias llamadas Link 1 ó L1, que trabaja a **1575.42 MHz**, y Link 2 ó L2, a **1277.60 MHz**. Éstas son múltiplos de la frecuencia fundamental 10.23 MHz, que actúa como patrón de tiempos del sistema. Dichas frecuencias se emplean como portadoras para modular la información. Para ello, se emplea una modulación BPSK (Binary Phase Shift-Keying), que modifica la fase de las ondas según se esté transmitiendo un 1 o un 0 en lenguaje binario. La onda resultante se muestra en la Imagen (2.3).

Esto se combina con el uso de la técnica de espectro ensanchado de secuencia directa (DSSS), es decir, el mensaje de navegación a transmitir, con una tasa binaria de 50 bit/s, se multiplica por una secuencia binaria pseudo aleatoria (PRN) con mayor tasa (tasa de chip). De ese modo, el espectro de la señal modulada resultante pasa de ocupar un ancho de banda de 100 Hz a ensancharse hasta ocupar 2.046 MHz y se hace más robusta la detección de la señal débil procedente del satélite aún en presencia de ruido.

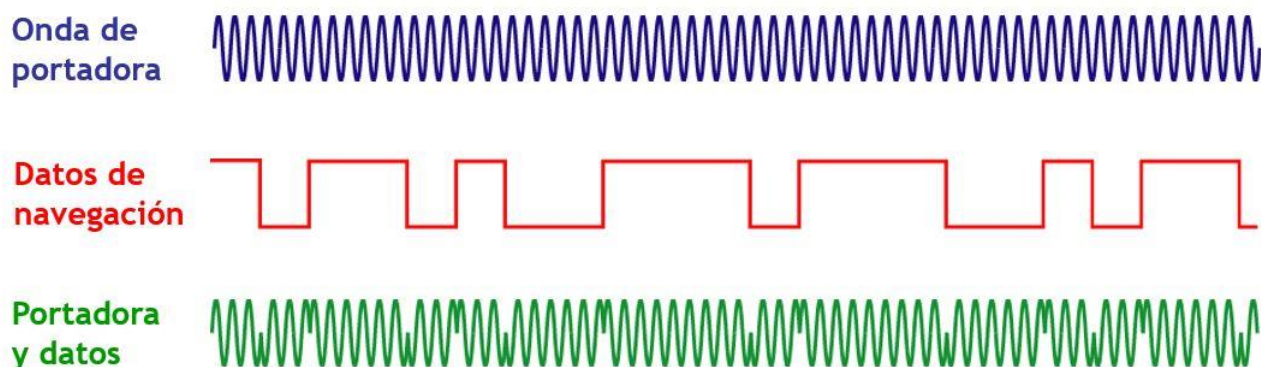


Imagen 2.3: Onda portadora, mensaje y onda modulada. Adaptación de (27)

Estas secuencias binarias por sí solas parecen aleatorias. Éste es el PRN mencionado anteriormente, que necesita que de manera independiente se repliquen estas mismas secuencias de código en el dispositivo receptor. Así, alineando la secuencia que se recibe con la replicada por el receptor, puede calcularse el tiempo que ha tardado en llegar desde el satélite, y de él calcular la distancia a dicho satélite. Esta medida, la solución obtenida de hallar el tiempo de retraso en el mensaje de un satélite y multiplicarlo por la velocidad de la luz c según la Ecuación (2.1), es la llamada *pseudodistancia* (7).

El hecho de que cada satélite transmita en dos frecuencias permite obtener diferentes precisiones y separar los usos de cada una, según los intereses de sus administradores. Así, en la frecuencia L1 se transmiten los códigos C/A (Coarse/Adquisition) y P (Precision, de uso militar), desfasados 90° uno respecto al otro para poder diferenciarlos. De esta manera, la señal L1 tendría como ecuación:

$$S_{L1}(t) = A_P P(t) D(t) \cos(2\pi f_1 t + \phi) + A_{C/A} C(t) D(t) \sin(2\pi f_1 t + \phi) \quad (2.2)$$

Donde: $S_{L1}(t)$ = señal transmitida en L1 A_P = amplitud del código P
 $P(t)$ = ± 1 fase del código P $D(t)$ = ± 1 representa el código de datos
 f_1 = frecuencia L1 ϕ = fase inicial
 $A_{C/A}$ = amplitud del código C/A $C(t)$ = fase del código C/A

Por su parte, en la frecuencia L2 únicamente se transmite el código P (Precision), con lo que su ecuación se restringe a:

$$S_{L2}(t) = A_P P(t) D(t) \cos(2\pi f_2 t + \phi) \quad (2.3)$$

Donde: S_{L2} = señal transmitida en L2 f_2 = frecuencia L2

y el resto de los términos como se ha detallado anteriormente.

La frecuencia L2 es únicamente usada por instrumentos militares e industriales de muy alta precisión. De hecho, un dispositivo de doble frecuencia tiene un elevado costo de entre 20000€ y 30000€, frente al costo de unos pocos cientos de un receptor GPS comercial que reciba únicamente L1. **El presente estudio se centrará en el funcionamiento y prestaciones de los receptores de una frecuencia**, pues es con gran diferencia el caso de mayor aplicación en el mundo por ser el incorporado en teléfonos móviles, navegadores comerciales, coches, transporte marítimo y aéreo de recreo, estudio de fauna, etc. Estos receptores, aunque sólo trabajen con L1, pueden disponer de diferentes opciones de posicionamiento en función de la disponibilidad de otra información, como se verá en la siguiente sección.

2.5 Métodos de posicionamiento con receptores de una frecuencia

Si bien todos los receptores GPS de una frecuencia se basan en la trilateración, pueden complementar y mejorar el resultado en posición gracias a información adicional según esté disponible en la zona y según el hardware con el que cuenta el receptor. Así, se encuentran los siguientes métodos:

2.5.1 Posicionamiento absoluto

En el caso más sencillo posible, se cuenta únicamente con la información de cuatro satélites y se halla la pseudodistancia a tres de ellos para situar el receptor en el espacio por trilateración, contando con la señal de un cuarto satélite para resolver el error de reloj del receptor, tal y como se ha explicado en la sección 2.3. Únicamente con este método, la precisión en un intervalo de confianza del 95% es de entre 15 y 25 m (8). Dado que resolver la ambigüedad de fase resulta muy complicado para dispositivos pequeños, en este método se emplean esencialmente medidas sobre el código.

2.5.2 Posicionamiento preciso

Mediante este método se aumenta la precisión obtenida por trilateración gracias al conocimiento de datos complementarios que permiten una solución más exacta, si bien esta información no está disponible en tiempo real y por lo tanto sólo es posible realizarlo tomando una medida de posicionamiento absoluto y posteriormente aplicando las correcciones derivadas de la nueva información, nunca en navegación.

Esta información complementaria pueden ser los mapas del Contenido Vertical Total de Electrones que proveen servicios como el Centro de Determinación Orbital Europeo (CODE), el Jet Propulsion Laboratory (JPL) o el Centro Europeo de Operaciones Espaciales (ESOC), o bien el conocimiento de efemérides -se recuerda, la posición en órbita de los satélites- exactas y no las extrapoladas que se estiman desde el segmento tierra y que es transmitido en la señal. También es posible conocer con mejor precisión los errores de los relojes a bordo de los satélites que, si bien son corregidos diariamente para compensar los efectos relativistas a los que son sometidos al viajar a grandes velocidades y bajo menor gravedad que en la superficie de la Tierra, al final del ciclo antes de corregirse puede contener un error apreciable. Mediante las correcciones con toda esta información, es posible alcanzar precisión submétrica en el eje horizontal, y reducir el error en el eje vertical a 2 m (9) (10).

2.5.3 Sistema de aumento basado en satélites (SBAS)

Dada la creciente necesidad de sistemas de posicionamiento con más precisión, diferentes gobiernos lanzaron programas para establecer un sistema de cobertura satelital en sus regiones que permitieran a los dispositivos GNSS mejorar su precisión en navegación en tiempo real. De este modo nacen los sistemas SBAS, que constan de una gran red de estaciones en tierra repartidas por todo el territorio y de una serie de satélites en órbita geostacionaria sobre la vertical de dicho territorio. Las bases en tierra recogen información del estado de los satélites de la constelación GNSS en todo momento, el estado de la ionosfera en la zona, la actividad solar, etc; y tras procesarlos y aplicar las correcciones pertinentes, envían esta información a los satélites geostacionarios, que radian estas correcciones sobre todo el territorio sobre el que se encuentran. De este modo, los receptores pueden utilizar estas correcciones para complementar la trilateración GPS y determinar su posición con precisiones de hasta entre 1 y 2 m.

Los sistemas SBAS no sólo permiten mejorar la precisión, también permiten informar sobre la disponibilidad de cada satélite en la zona, así como facilitar su seguimiento y avisar de la entrada o salida del horizonte, la integridad del sistema o avisar del posible fallo de un satélite concreto. Para ello, desde las bases de tierra se realiza un seguimiento y monitorización continuo de la constelación, cálculo de órbitas precisas y, especialmente, del estado de la atmósfera y la corrección pertinente según este estado, como se verá en el capítulo 3.

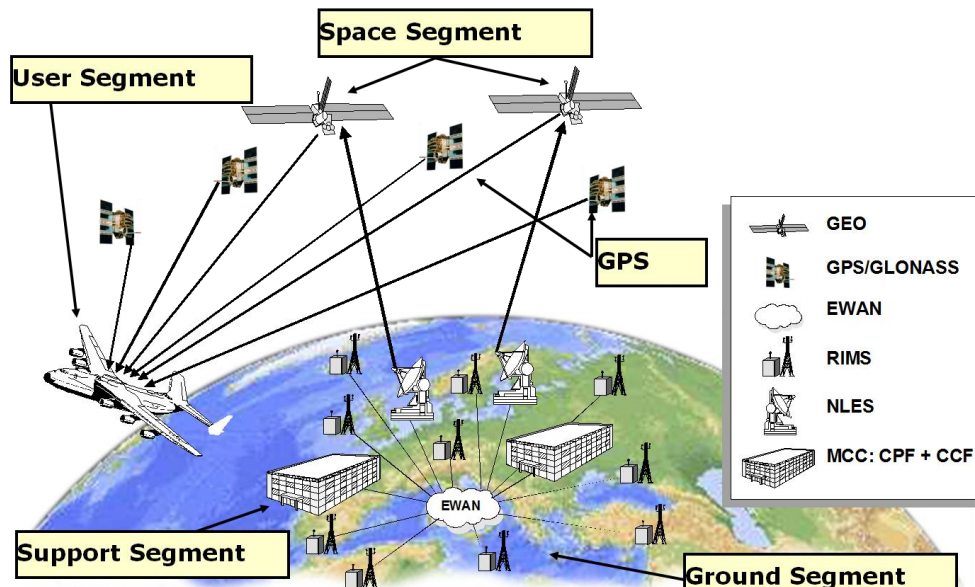


Imagen 2.4: Estructura del SBAS

Actualmente existen en funcionamiento cuatro sistemas SBAS, pertenecientes a cuatro regiones. Todos tienen un funcionamiento muy parecido, lo que los hace compatibles entre ellos:

- WAAS, del gobierno estadounidense. Fue el primero en entrar en activo en 2003 y se encuentra gestionado por la FAA.
- EGNOS, de la Unión Europea, comenzó su servicio civil en 2010 y está bajo control de la ESA y Eurocontrol.
- MSAS, sobre Japón y gran parte del este asiático.
- GAGAN, de la India, cubre también parte de Oriente Medio y el sudeste de Asia.

2.5.4 GPS Diferencial (DGPS)

Este método se basa en que dispositivos que se encuentran en la visual de los mismos satélites y bajo la misma atmósfera perciben medidas con los mismos errores inducidos -como se verá más adelante. De este modo, el sistema consta de una red de estaciones de tierra con una posición conocida con mucha exactitud que actuarán como estaciones de referencia. Estas estaciones reciben las señales de los satélites GPS que tienen en su visual y resuelven las medidas de posición, que comparan con su posición conocida. De este modo, pueden emitir señales con correcciones en tiempo real tanto para navegación como para mediciones precisas en postprocesado, que serán válidas para dispositivos que se encuentren bajo las mismas condiciones que la estación.

Precisamente esa necesidad de que se encuentren bajo las mismas condiciones estación y receptor limita la fiabilidad de este sistema a los entornos de la estación. Para un radio de 100 km en torno a la estación que sirve las correcciones, el error típico es inferior a 4 m en el 95% de las veces (11). Por lo tanto, es necesaria una gran red de radioayudas repartidas en tierra que cubran todo el territorio, lo que hace que este método sea inviable para grandes regiones o para navegación marítima, donde los SBAS son la mejor opción.

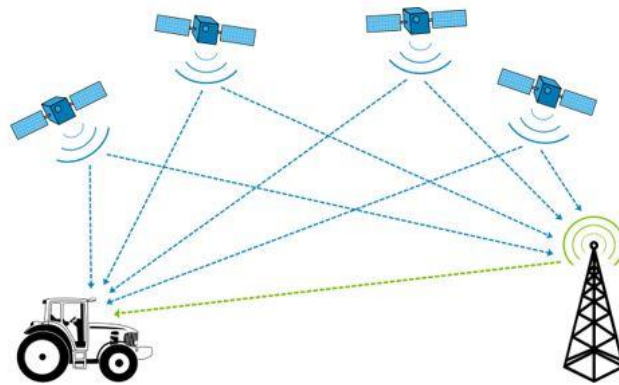


Imagen 2.5: estructura del DGPS

2.5.5 Local Area Augmentation System (LAAS)

Existen otros sistemas de aumento GNSS para zonas bien delimitadas donde una gran precisión en el geoposicionamiento es fundamental. El más extendido es el LAAS, utilizado en aeropuertos por todo el mundo y en especial en Norteamérica, que tiene un funcionamiento similar al DGPS. En él, varias estaciones repartidas por el aeropuerto con una posición muy bien determinada reciben la señal GPS, comparan el resultado con su posición y envían las correcciones a las aeronaves en su alcance, que no suele ser superior a 40 km, en frecuencias VHF entre 108 y 118 MHz. Estas correcciones son aplicadas a las mediciones GPS de la aeronave y sirviendo a ésta como un ILS de aeropuerto.

2.6 Errores en la señal GPS

Al comienzo de este capítulo se ha explicado que la pseudodistancia se obtiene con una relación directamente proporcional de tiempo y distancia, con la velocidad de la luz como constante de proporción. Después se ha matizado que esta medición está supeditada a errores variables que han de corregirse para una medición precisa, pero sin entrar en la causa de estos errores. En esta sección se pretende enumerar, cualificar y cuantificar estos errores, que es fundamental conocer y evaluar para poder corregir adecuadamente en cada situación.

Una clasificación de las fuentes de errores es por el elemento de origen, que los divide en errores en el satélite, errores en el receptor y errores causados durante la propagación de la señal.

2.6.1 Errores en el satélite

- Errores en las efemérides, que no son exactas sino que son calculadas por las estaciones del segmento tierra de la red GPS y extrapoladas a lo largo del periodo.
- Errores de reloj, que sufre de una significativa deriva por efectos relativistas. Ésta es corregida cada 24 h por el segmento tierra, pero al final del ciclo tiene una mayor relevancia.
- Error hardware, relacionado con las propias limitaciones de la tecnología de emisión, que no puede enviar de manera inmediata la señal precisa.
- Disponibilidad Selectiva, que como se vio en la sección 2.1, es una degradación deliberada de la señal que puede activarse en caso de necesitar limitar el uso de GPS.

2.6.2 Errores en el receptor

- Ruido en la medida, provocado por la propia electrónica del dispositivo receptor.
- Errores en la limitación hardware, que tiene una precisión finita.
- Errores de reloj, que son varios órdenes de magnitud más grandes que los anteriores pero que, como se vio en la sección 2.3, no llegan a aplicar pues son sustituidos por la hora de un cuarto satélite.

2.6.3 Errores de propagación

- Multitrayecto o *multipath*, es la recepción de dos o más ondas separadas en el tiempo por la reflexión de éstas en una superficie, como pueden ser montañas o edificios. De este modo, llega la misma señal en varios tiempos distintos, una por línea recta y otras tras haber rebotado en superficies cercanas al receptor, lo que provoca distorsión.
- Retrasos de propagación en la troposfera, que sufre cambios de presión y humedad de manera constante y que interfieren en la propagación de las ondas UHF.
- Retrasos de propagación en la ionosfera: los más importantes y que serán objeto de extenso estudio en este trabajo. En esta capa de la atmósfera se genera un retraso de la señal que es posible paliar casi por completo si se trabaja con dos frecuencias L1 y L2, pero con dispositivos de una frecuencia es necesario recurrir a modelos de ionosfera para corregir parte de estos errores, que logran reducir a aproximadamente la mitad.

Cuantificando de manera aproximada los errores expuestos, obtenemos:

Fuente de error	Error aproximado en la pseudodistancia
Ruido electrónica receptor	1 m
<i>Errores de reloj de satélite</i>	1 m
Errores de efemérides	1 m
Multitrayecto	0.5 m
<i>Ruido de código de encriptación</i>	1 m
<i>Retraso de propagación en la troposfera tras aplicar modelo</i>	1 m
<i>Retraso de propagación en la ionosfera tras aplicar modelo</i>	10 m
TOTAL	15.5 m

Tabla 2.1: Fuentes de errores GPS (12)

De esta manera se evidencia que el error total introducido por todas las fuentes de error es aproximadamente de 15.5 m, como se adelantó en la subsección 2.3.1, y es la máxima precisión a la que es posible llegar mediante posicionamiento absoluto. Para posicionamientos más precisos, es necesario pues recurrir a alguno de los métodos expuestos anteriormente.

También se puede observar que destacan sobremanera los retrasos introducidos en la señal a su paso por la ionosfera, que introduce errores de un orden de magnitud mayor que el resto, incluso después de aplicar las correcciones del modelo ionosférico de Klobuchar. Esto evidencia **la necesidad de estudios como el presente trabajo que analicen el comportamiento y la influencia de esta capa de la atmósfera en la señal GPS** bajo distintas condiciones.

3 IONOSFERA Y MODELOS

La Tierra está circundada por una atmósfera compuesta por distintos elementos gaseosos que se mantiene adherida al planeta por su atracción gravitatoria. Por ello también, esta atmósfera es más densa a nivel de la superficie y disminuye su densidad a medida que aumenta la altura, llegando a una distancia -definida a distintas alturas según el autor- donde se considera que la densidad es tan pequeña que equivale al vacío interplanetario. Pero los cambios con la altura van más allá de la densidad y presión, y se pueden establecer diferentes capas en ella en función de sus características.

3.1 Capas de la atmósfera

A nivel de la superficie terrestre y hasta una altitud que varía con la latitud – alcanza una altitud de 20 km en zonas ecuatoriales frente a sólo unos 7 km en zonas polares-, se encuentra la troposfera. Esa primera capa contiene más del 80% de la masa de la atmósfera, compuesta principalmente de nitrógeno y oxígeno, conteniendo en mucha menor cantidad argón, dióxido de carbono y otros elementos. En ella la temperatura decae a razón de unos 6.5°C por kilómetro hasta alcanzar alrededor de -50°C es su límite superior, conocido como tropopausa.

Tras ella se encuentra la estratosfera, que se extiende hasta los 50 km aproximadamente y donde la temperatura, al contrario que en la troposfera, aumenta con la altitud. Esto se debe a que la radiación ultravioleta interacciona con las moléculas de oxígeno, transformándolo en ozono, proceso que genera calor. Es por ello que en algunos textos se considera la capa de ozonosfera en la mitad superior de la estratosfera.

A continuación, entre los 50 y los 80 km de altitud, aparece la mesosfera. En ella, la densidad es tan baja que contiene sólo el 0.1% de la masa total del aire, y la temperatura de decae de nuevo alcanzando las temperaturas más bajas de la atmósfera con hasta -80°C. En esta altitud es donde comúnmente se desintegran los meteoroides que entran en la atmósfera terrestre, provocando el fenómeno de las estrellas fugaces.

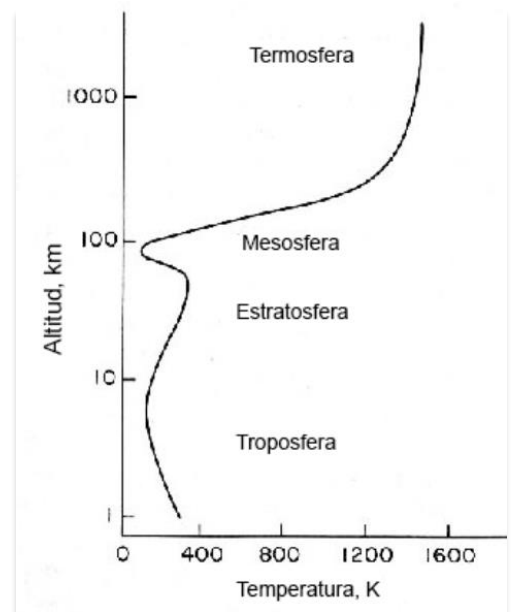
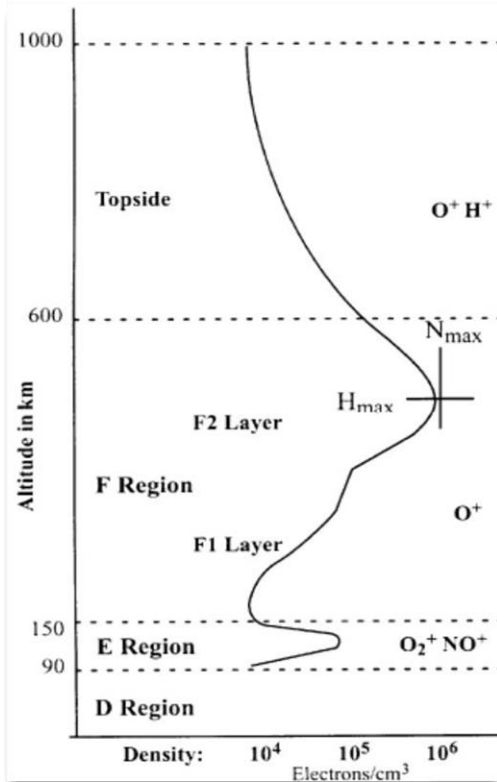


Imagen 3.1: Capas de la atmósfera y su temperatura según la altitud (29)

Y es a partir de entre los 70 y los 100 km de altitud -varía con la latitud y la hora del día, como veremos más adelante- y hasta los 600-1000 km donde se encuentra la capa atmosférica con mayor relevancia en el presente trabajo. Toma el nombre de termosfera o ionosfera, según quiera enfatizarse su característica de alta temperatura o de su alto contenido de partículas ionizadas. En ella se producen las auroras boreales y australes, debido en gran parte a estos fenómenos de ionización. Finalmente, por detrás de esta capa y hasta una altitud muy indefinida entre los 2000 y 10000 km de altitud se encontraría la exosfera, cuyo límite de funde con el plasma interplanetario.

3.2 Estructura estándar de la ionosfera

Esta peculiar capa de la atmósfera se extiende por un rango muy amplio de altitud sobre la Tierra, del orden de veinte veces más espesor que las capas inferiores, pero a pesar de ello contiene sólo un 0.15%



de la masa total de la atmósfera, lo que evidencia que la densidad de partículas gaseosas es tremendamente baja. Su temperatura crece linealmente en los primeros kilómetros de altitud, pero a partir de los 300 km aproximadamente, ésta crece exponencialmente hasta llegar sus partículas a temperaturas en torno a los 1500°C. Dada su bajísima densidad, esta alta temperatura no supone un problema para los objetos que la atraviesan en cortos periodos de tiempo, pues el mecanismo de transmisión de calor por conducción depende de la cantidad de materia en contacto.

Sin embargo, esta capa tiene otra propiedad que sí es muy relevante, no tanto para los objetos sino para las ondas electromagnéticas que la atraviesan. Ésta es la alta cantidad de electrones libres que abundan en esta capa, producto de la incidencia de radiación de alta energía como rayos X -en las regiones inferiores- y ultravioleta -en regiones superiores- en sus partículas, que resultan excitadas y liberan sus electrones de orbitales superiores. De este modo, su medio pasa a formar un plasma con diferentes concentraciones de electrones en función de la altitud.

Por esta diferencia se pueden definir cinco regiones, como se observa en el gráfico:

Imagen 3.2: regiones de la ionosfera y cantidad de electrones (28)

- Región D: aparece únicamente durante las horas diurnas como consecuencia del aumento de radiación, y es responsable de proteger la superficie de la Tierra de que le llegue gran parte de la radiación espacial. Es absorbente para ondas VLF y refleja ondas LF.
- Región E: sufre un aumento y descenso de contenido de electrones en un estrecho espesor, y refleja ondas LF y MF, con lo que es utilizada para aumentar el alcance de la propagación de ondas terrestres.
- Región F1: a lo largo de ella el contenido de electrones aumenta de forma más o menos lineal con la altitud, y sufre grandes fluctuaciones a lo largo del día.
- Región F2: la de mayores concentraciones de electrones por unidad de volumen y por lo tanto la de mayor efecto sobre las ondas GPS que atraviesan la atmósfera, como se detallará más adelante. Es ionizada casi exclusivamente por la radiación UV y refleja ondas HF de manera eficiente, con lo que también se puede aprovechar para comunicaciones terrestres.
- Región superior: reduce progresivamente su cantidad de electrones libres, así como la de partículas, hasta llegar a los niveles similares al de plasma espacial.

3.3 Variaciones de la ionosfera

Esta sección es de especial importancia para comprender la motivación de este trabajo, pues la gran variabilidad de la estructura de la ionosfera es el motivo de que toda señal GPS que se recibe tenga un gran error inducido que **requiere de observación continua** para ser corregido. Para ello, se recopila información de más de 100 estaciones GPS repartidas por el mundo que se utilizan para confeccionar los Mapas Ionosféricos Globales (GIM), que representan el Contenido Vertical Total de Electrones (VTEC) de la ionosfera global. Para realizarlos, cada estación toma entre 6 y 8 medidas -para descartar inhomogeneidades- cada 30 segundos. Luego estas medidas son interpoladas, tanto en tiempo como en espacio, siendo generados y publicados los GIM de manera automática cada 5-15 minutos. Se hacen públicos para utilización tanto de la corrección GPS como para predicciones meteorológicas e investigaciones científicas. Esta variabilidad depende de distintas variables, algunas predecibles y otras impredecibles.

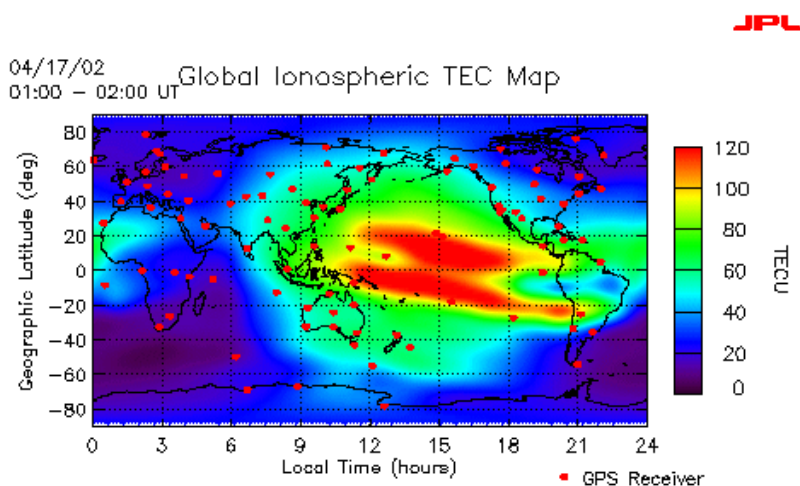


Imagen 3.3: Ejemplo de un GIM (32). Se observa un mayor TEC en latitudes ecuatoriales y en longitudes donde es de día.

3.3.1 Variaciones predecibles

3.3.1.1 Latitud

Debido a la forma esférica de la Tierra y al efecto de los campos magnéticos que rigen sobre ella, se encuentra un comportamiento diferente según la latitud.

- Latitudes ecuatoriales: estas zonas, con exposición más directa al sol, tienen las densidades de electrones más elevadas y los mayores gradientes de densidad de electrones.
- Latitudes medias: las variaciones de electrones son menos acusadas, si bien pueden sufrir variaciones de hasta un 20% en caso de tormentas ionosféricas.
- Latitudes polares: a partir del paralelo 60° se produce un comportamiento altamente impredecible de la ionosfera, dominado por las variaciones en el campo magnético del planeta, que hace surgir y converger las líneas de campo magnéticas sobre los polos.

De manera similar, debido a la inclinación que presenta el eje de rotación de la Tierra respecto a su órbita alrededor del sol, una misma latitud recibe mayor radiación solar en su verano que en su invierno, con lo que los TEC se concentran en el hemisferio norte o sur según la estación del año.

3.3.1.2 Hora del día

Como se ha mencionado, la mayor parte de la ionización de las partículas de la ionosfera es causada por la incidencia de radiación UV y rayos X provenientes del sol, lo que adelanta que esta ionización será mayor en las longitudes donde incide el sol que en aquellas en penumbra en un momento dado. Efectivamente, analizando con digisondas el contenido de electrones por volumen en mitad del día y de la noche, se observa que muestran gráficos muy diferentes.

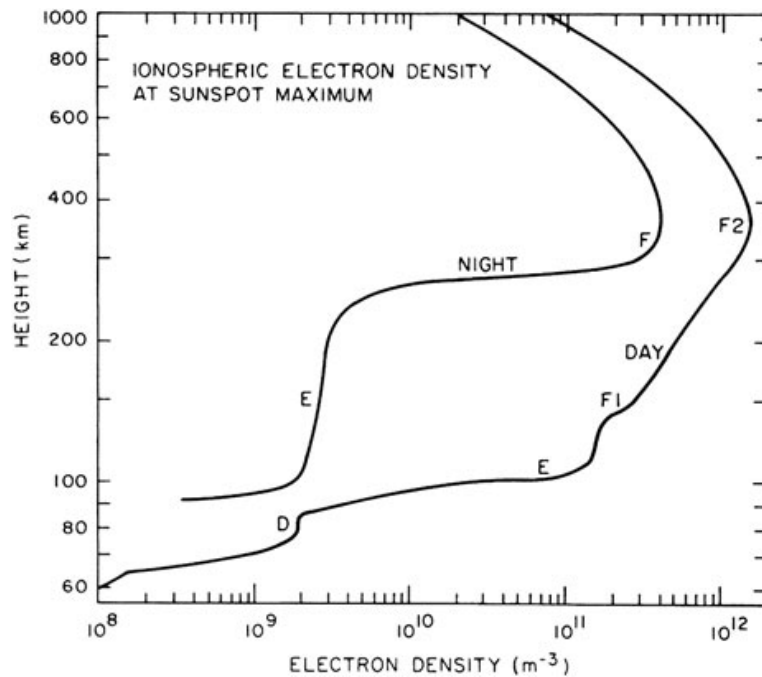


Imagen 3.4. Variación de la estructura ionosférica durante el día y la noche (33)

Si bien este cambio no es inmediato y en las primeras horas de penumbra la estructura se mantiene, con el paso de las horas las concentraciones características de todas las regiones disminuyen, siendo más acusadas en la región D -que se considera que desaparece y se iguala con la mesosfera- y en las regiones E y F1, que disminuyen en mayor proporción que la región F2.

3.3.1.3 Actividad humana

Los productos de escape corrientes en los cohetes, tales como H₂, H₂O y CO₂, pueden desencadenar una disminución en gran escala de la densidad electrónica en la región F de la ionosfera. Este se debe a que tales productos transforman el plasma de la región F, en el que suelen dominar los procesos de iones atómicos, en un plasma dominado por procesos de iones moleculares. Una vez constituidos los iones moleculares asociados con estos productos, se vuelven a combinar disociadamente con la densidad de electrones ambiente con una rapidez de 100 a 1 000 veces mayor que la recombinación de electrones con las moléculas de nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂) presentes en condiciones normales. Esto tiene como consecuencia la creación de un «agujero ionosférico» en la región F. La ausencia de efectos intensos debidos a la inyección de sustancias químicas en las regiones inferiores de la ionosfera se explica por las altas densidades neutras y por la química de iones moleculares que predominan en las alturas de las regiones D y E (13).

3.3.1.4 Ciclos solares

Hace más de 2000 años que los primeros astrónomos destacaron que habían observado, probablemente a través de nubes de polvo, que en el sol se podían apreciar pequeños puntos más oscuros que el resto del astro. Pero no fue hasta el siglo XVII, con el desarrollo de las ópticas y los telescopios, que se pudo estudiar la presencia de numerosas manchas, a menudo agrupadas, que variaban con el tiempo. Desde entonces, se tiene registro del número de manchas que aparecen en el sol cada año, lo que ha permitido conocer mucha información sobre la actividad que tiene lugar en la estrella de nuestro sistema.

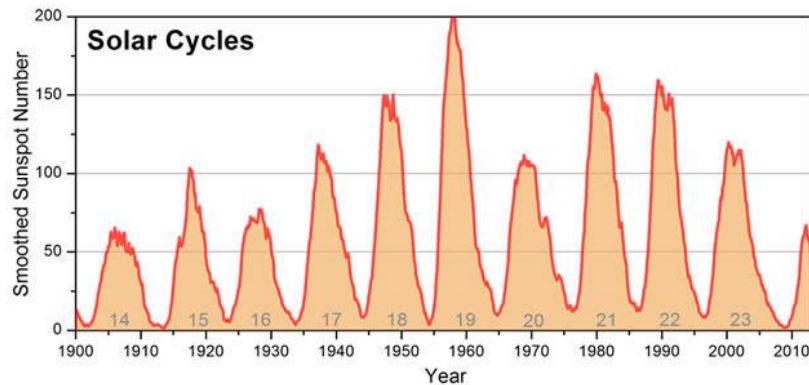


Imagen 3.5: Manchas solares anuales desde 1900 hasta la actualidad (34)

La primera gran observación que se extrae del gráfico es que el número de manchas solares oscila en ciclos muy regulares de 11 años, aunque los máximos que se han alcanzado han variado enormemente a lo largo de los años de los que se tiene registro. Por ejemplo, en 2011 tuvo lugar un máximo del ciclo, que fue el más bajo de los últimos cien años, y para 2022 se espera otro máximo, según predicción con datos hasta 2019, probablemente será aún de menor intensidad.

Las manchas solares son la consecuencia de una fuerte actividad magnetodinámica bajo la fotosfera solar. En esta región, la presión y la densidad del plasma se reduce, lo que produce que se enfríe y se eleve a la superficie. El hecho de que se vea más oscuro es una mera relación de contraste, ya que aunque siga brillando intensamente, al estar más frío produce un brillo menor que el plasma en el resto del sol. Por lo tanto, dado que existe una clara correlación entre la aparición de manchas solares y una fuerte actividad en el Sol, es posible tomar el número de manchas solares como un indicador de la intensidad de la actividad solar, que como se ha mencionado, varía cíclicamente. La medida que se toma es el *número de manchas solares* (SSN), que se define mensualmente como:

$$SSN = K(10G + I) \quad (3.1)$$

Donde: K= factor instrumental I= número de manchas individuales en un mes

G= número de grupos de manchas solares -que evidencian una actividad especialmente fuerte, por lo que se le da un peso 10 veces mayor- en un mes

Evidentemente, en periodos con mayor actividad solar llegan a la Tierra mayores cantidades de radiación UV y rayos X, lo que conlleva que aumente la ionización de las partículas en las capas altas de la atmósfera, con las consecuencias sobre las señales recibidas de los satélites que veremos en la próxima sección. Cabe decir que si bien el año de publicación de este trabajo es 2019, año de un mínimo de ciclo solar, las medidas que se presentarán se tomaron en 2016, un año de actividad intermedia.

3.3.1.5 Gravedad lunar

Si bien no varía el VTEC, que es la medida del total de electrones en toda la vertical, sí puede variar la concentración de electrones por unidad de volumen por los efectos gravitatorios que la Luna ejerce. Al ser la ionosfera un fluido, su extensión -y por lo tanto la densidad de electrones- varía en función de la cercanía o la lejanía de la Luna y por lo tanto la intensidad de su atracción gravitatoria, de manera similar a como ocurre con las mareas.

3.3.2 Variaciones impredecibles

La función de las estaciones GPS que analizan constantemente la ionosfera para publicar los GIM no sería tan importante si no fuera por todas las variables impredecibles que también afectan de manera notoria a la estructura y al TEC en la ionosfera. Algunas de estas variaciones que no siguen ningún patrón son, por ejemplo, los desplazamientos y crecimientos del campo magnético de la Tierra, que sufre cambios a tenor del movimiento de las masas de hierro líquido que posee el núcleo, o las corrientes horizontales o verticales que tienen lugar en la ionosfera, debidas a sus propiedades fluidodinámicas.

También son impredecibles los cambios que producen elementos provenientes del espacio, como son la intrusión de meteoros. Como se mencionó en la sección 3.2, en la ionosfera se desintegran muchos de los meteoros que llegan a la atmósfera terrestre, convirtiéndose en estrellas fugaces mientras la fricción con las partículas de estas capas los calienta, erosiona y evapora. Este proceso aumenta la temperatura y excita las partículas del plasma con las que tiene contacto, haciendo que si tienen lugar muchas incursiones de meteoros en una región -como en una lluvia de estrellas fugaces-, la actividad en su ionosfera se vea alterada significativamente.

Siguiendo un fenómeno similar al de las manchas solares, pero con carácter totalmente aleatorio, también se producen tormentas solares que suponen una expulsión violenta de material y radiación de la superficie del sol. Al llegar a la Tierra, altera de manera muy notable la ionosfera y sus efectos pueden sentirse en diversos instrumentos de medida. De igual forma, del espacio profundo llegan rayos X de intensidad variable que, como se ha mencionado, ioniza las capas inferiores de la ionosfera.

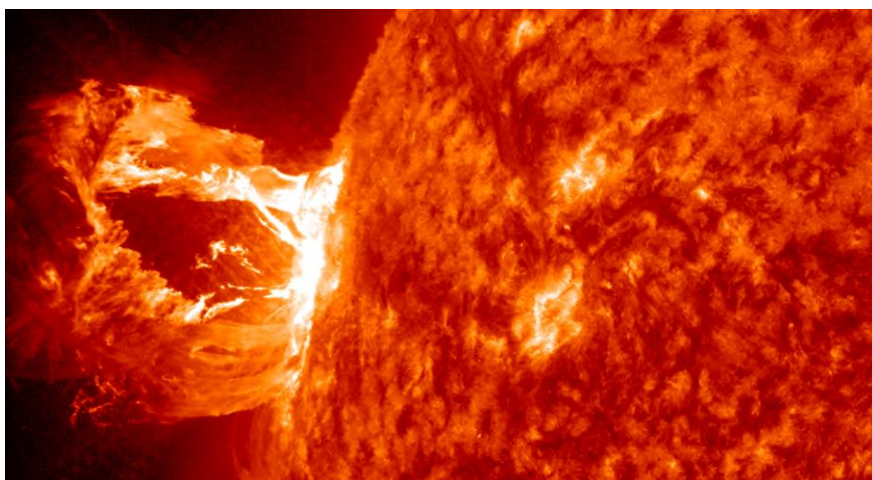


Imagen 3.6: Expulsión de material en una llamarada solar (22)

3.4 Efectos de la ionosfera en la propagación de señales EM

En la Ecuación 2.1 se consideró que la onda se propagaba en línea recta y a la velocidad de la luz en el vacío durante todo el trayecto desde el satélite hasta el receptor, pero todo el fundamento de la presente investigación es precisamente que esta idealización dista mucho de la realidad. En el comienzo del viaje de la señal por el espacio exterior se puede considerar que la onda viaja a velocidad c y en línea recta, pero al adentrarse en la atmósfera, un medio distinto al vacío, este modelo ideal pierde su eficacia. Especialmente la ionosfera, aunque también en mucha menor medida en la troposfera, encuentra un medio dispersivo que provoca un decremento de la velocidad y una curvatura en su trayectoria en función de la frecuencia, ángulo de incidencia y estado de esta atmósfera.

Observando la Imagen 3.7 se aprecia claramente la diferencia de las trayectorias que realiza una onda idealmente en línea recta, y la real que llega a un receptor GPS. Esta última sigue una línea recta hasta que encuentra el comienzo de la capa de ionosfera, donde adquiere una trayectoria curva con diferencial dl que llega al dispositivo receptor tras hacer un recorrido más largo del que recorrería en línea recta y, por lo tanto, con un tiempo de retraso.

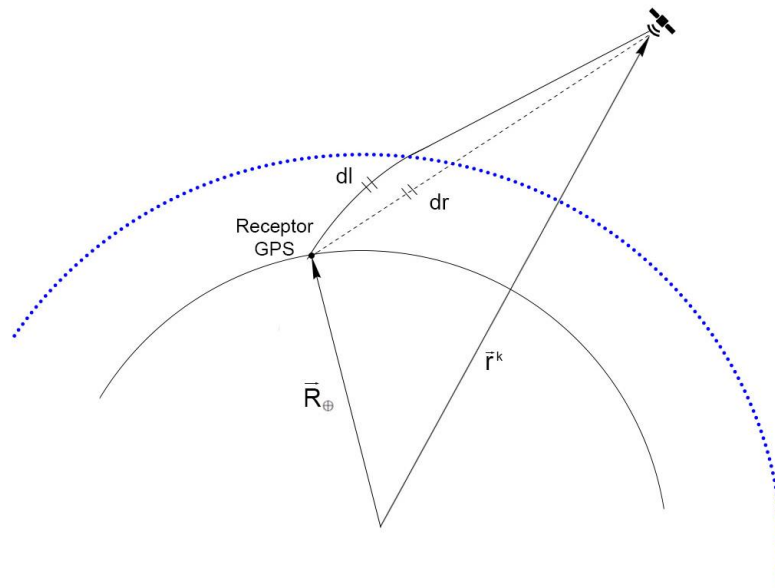


Imagen 3.7: Curvatura de la trayectoria de una señal EM al atravesar la atmósfera

Este retraso es posible cuantificarlo matemáticamente conociendo el índice de refracción (n), que relaciona la velocidad de propagación en el medio con la velocidad de propagación en el vacío:

$$n = \frac{c}{v} \Rightarrow v = \frac{c}{n} \quad (3.2)$$

Así, es posible expresar el retardo total de la onda, es decir, el tiempo que tarda en llegar desde el satélite hasta el receptor por el camino dl como:

$$v = \frac{dl}{dt} \Rightarrow dt = \frac{dl}{v} \Rightarrow \Delta t = \int_{\vec{R}_\oplus}^{\vec{r}^k} \frac{1}{v} dl \quad (3.3)$$

Introduciendo (3.2), se expresa este retardo en función de la constante c y el conocido índice de refracción:

$$\begin{aligned} \Delta t &= \int_{\bar{R}_{\oplus}}^{\bar{r}^k} \frac{n}{c} dl = \int_{\bar{R}_{\oplus}}^{\bar{r}^k} \left(\frac{1}{c} + \frac{n-1}{c} \right) d\rho + \left(\int_{\bar{R}_{\oplus}}^{\bar{r}^k} \frac{n}{c} dl - \int_{\bar{R}_{\oplus}}^{\bar{r}^k} \frac{n}{c} d\rho \right) \\ &= \frac{\rho_{\oplus}^k}{c} + \left[\int_{\bar{R}_{\oplus}}^{\bar{r}^k} \frac{n-1}{c} d\rho + \left(\int_{\bar{R}_{\oplus}}^{\bar{r}^k} \frac{n}{c} dl - \int_{\bar{R}_{\oplus}}^{\bar{r}^k} \frac{n}{c} d\rho \right) \right] = \frac{\rho_{\oplus}^k}{c} + \frac{\delta\rho^{atm}}{c} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Donde ρ_{\oplus}^k es la distancia geométrica entre el satélite y el receptor sobre la superficie de la Tierra, y por lo tanto el primer término es el retardo ideal que tendría la señal viajando en línea recta a la velocidad de la luz en el vacío. En el segundo término se agrupan todos los efectos atmosféricos que conllevan un retraso adicional, de manera que se pueda trabajar como una distancia extra que se ha de recorrer.

$$\delta\rho^{atm} = \int_{\bar{R}_{\oplus}}^{\bar{r}^k} (n-1) d\rho + \left(\int_{\bar{R}_{\oplus}}^{\bar{r}^k} n dl - \int_{\bar{R}_{\oplus}}^{\bar{r}^k} n d\rho \right) \quad (3.5)$$

En el primer término se considera el error que se comete al no ser el medio de propagación el vacío, sino un fluido con índice de refracción n , es decir, el error debido a su reducción de velocidad. En el segundo término se recoge el retraso por recorrer una trayectoria curva y por lo tanto más larga que la distancia geométrica.

Cabe reseñar que la Ecuación (3.5) es el retraso que afecta a la propagación de una onda EM monocromática, es decir, el que afecta a las medidas realizadas sobre la onda portadora. Pero si lo que se desea es realizar medidas sobre el código, se ha de estudiar la propagación de una onda modulada y así trabajar con la velocidad de modulación, también conocida como velocidad de grupo, que se relaciona con la velocidad de una onda con frecuencia constante con la expresión:

$$v_G = \frac{d\omega}{dk} = v + k \frac{dv}{dk} \quad (3.6)$$

Donde ω = frecuencia angular de la onda k = número de onda

De igual manera, es posible relacionar el índice de refracción de grupo con el índice de refracción de fase con la expresión:

$$n_G = \frac{c}{v_G} = c \frac{dk}{d\omega} = n + \omega \frac{dn}{d\omega} \quad (3.7)$$

Como se ha adelantado en la página anterior, el error es posible cuantificarlo conociendo el índice de refracción n e introduciéndolo en las ecuaciones anteriores. Y ello es posible particularizando para el caso bajo estudio de contar con un magnetoplasma como medio de propagación, para el que es generalmente aceptado utilizar la llamada ecuación de Appelton-Hartree (14):

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - Zi - \left(\frac{Y_T^2}{2(1 - X - Zi)} \right) \pm \sqrt{\frac{Y_T^4}{4(1 - X - Zi)} + Y_L^2}} \quad (3.8)$$

Donde: $i = \sqrt{-1}$; $X = \frac{\omega_N^2}{\omega^2}$; $Y = \frac{\omega_B}{\omega}$; $Y_L = \frac{\omega_L}{\omega}$; $Y_T = \frac{\omega_T}{\omega}$; $Z = \frac{v}{\omega}$;

con $\omega_N = \sqrt{\frac{(\rho^-)^2}{\epsilon_0 m}}$ = frecuencia del plasma del medio; $\vec{\omega}_B = \frac{\vec{B}_e}{m}$ = girofrecuencia del electrón

ω_L = componente paralela a la dirección de propagación de la girofrecuencia del electrón

ω_T = componente perpendicular a la dirección de propagación de la girofrecuencia del electrón

ν = frecuencia de colisión de los electrones

De esta Ecuación (3.8) se pueden extraer varias conclusiones de las propiedades de la ionosfera:

- Se trata de un medio dispersivo que afecta de manera diferente a cada frecuencia.
- Es un medio inhomogéneo, ya que n depende de la posición.
- Es un medio anisótropo, ya que n depende de la dirección de propagación respecto al campo magnético terrestre.
- Y es un medio absorbente, ya que depende de la frecuencia de colisión de los electrones.

Además, es posible simplificar esta ecuación para el caso de las frecuencias GPS, que trabajan en la banda L (se recuerda, L1=1575.42 MHz y L2=1277.60 MHz) pues, para este rango y teniendo en cuenta que el campo magnético terrestre tiene un valor máximo típico menor a $6 \cdot 10^{-5}$ T, es posible acotar los valores máximos de la girofrecuencia a 1.7 MHz y la frecuencia de colisión de los electrones a 1.6 MHz (15), de manera que los términos Y , Y_L , Y_T y Z se pueden despreciar frente a X , quedando simplificada la ecuación de Appelton-Hartree a:

$$n = \sqrt{1 - X} \approx 1 - \frac{X}{2} = 1 - \frac{\omega_N^2}{2\omega^2} \quad (3.9)$$

Y por lo tanto el índice de refracción de grupo:

$$n_G = 1 + \frac{\omega_N^2}{2\omega^2} \quad (3.10)$$

De este modo, es posible reescribir el retardo para el grupo de onda debido a su paso a través de la ionosfera (3.5), introduciendo (3.10) y particularizando para la frecuencia L1, con $f_1 = \frac{\omega}{2\pi}$, quedando:

$$\delta\rho_1^{ion} = \int_{\vec{R}_e}^{\vec{r}^k} \frac{Ne^2}{2\epsilon_0 m f_1^2} d\rho = \frac{e^2}{2\epsilon_0 m f_1^2} \int_{\vec{R}_e}^{\vec{r}^k} N d\rho = \frac{e^2}{2\epsilon_0 m f_1^2} TEC = \frac{A}{f_1^2} TEC \quad (3.11)$$

Resultado que pone de manifiesto que **el retraso de la señal provocado por la ionosfera depende de la frecuencia de la señal y el contenido total de electrones que encuentra la señal a su paso (TEC)**, con un factor que agrupa los valores constantes, que son la carga del electrón e y su masa m , y la permitividad del vacío ϵ_0 , que en total equivalen a $A = 40,31 m^3 s^{-2}$. El desarrollo presentado ha sido adaptado de (16).

Sin embargo, el TEC, definido como la integral de la densidad electrónica a lo largo del recorrido de la señal atravesando la atmósfera, no es constante sino que, como se comentó en la sección 3.3, varía en función de numerosas variables y requiere mediciones constantes. Estas mediciones permiten

conocer el VTEC en cada punto de la Tierra, esto es, el contenido total de electrones que se encuentran sobre la vertical de un punto de la superficie. Éste es medido en TECU, la unidad total de contenido de electrones, que equivale a:

$$1 \text{ TECU} = 10^{16} \frac{e^-}{m^2} \quad (3.12)$$

Para la señal recibida de un satélite justo en el zénit sobre el receptor, el TEC coincide con el VTEC que es posible encontrar en los GIM y por lo tanto el retraso de la Ecuación (3.11) queda en función de variables conocidas:

$$\delta\rho^{ion} = \frac{A}{f_1^2} \text{VTEC} = \frac{40,31}{f_1^2} \text{VTEC} \quad (3.13)$$

Pero en el caso general no se tiene al satélite exactamente sobre la vertical del receptor, sino que el satélite se encuentra en un punto de la bóveda celeste con un ángulo α sobre el horizonte, llamado *elevación*, con lo que es necesario establecer una relación entre el VTEC conocido y el TEC encontrado por la onda en su trayectoria. Éste último, evidentemente, será mayor que el primero ya que con una entrada oblicua es necesario atravesar mayor distancia de atmósfera para llegar al mismo punto de la superficie del planeta.

En la Imagen 3.8 se muestra la geometría de la recepción en la superficie de la Tierra de una onda procedente de un satélite. Para ello, se ha simplificado el esquema de la atmósfera que rodea el planeta a un modelo ionosférico llamado *ionosfera de capa delgada*, que considera la ionosfera como una única capa de espesor nulo a una altura fija sobre la superficie h .

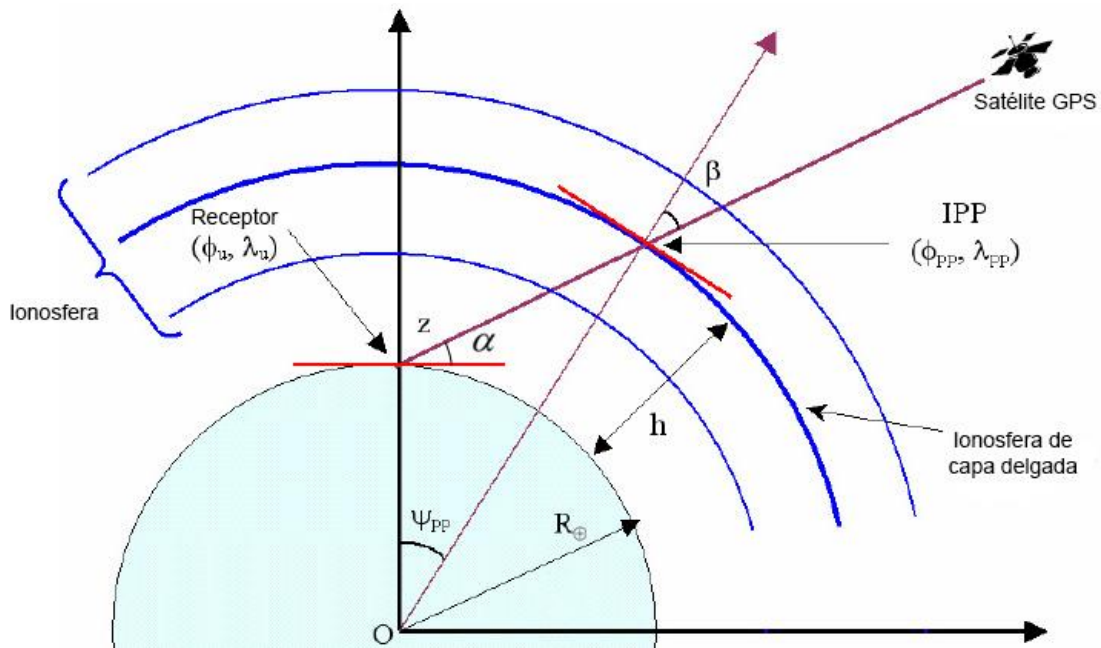


Imagen 3.8: Geometría de una señal GPS atravesando la atmósfera. Adaptación de (25)

Con este modelo, es posible identificar el punto y el ángulo con el que la señal atraviesa la capa delgada de atmósfera. Este punto de contacto es conocido como *IPP* -de las siglas en inglés Ionospheric Pierce Point-, y el ángulo, que será medido respecto a la vertical en el punto, se denominará β . De este modo, la ecuación (3.11) se reescribe en función del conocido VTEC y de la elevación a la que se observa el satélite emisor, quedando la expresión:

$$\delta\rho^{ion}(\alpha) = \frac{A}{f_1^2} TEC = \frac{A}{f_1^2} VTEC \frac{1}{\cos(\beta)} = \frac{A}{f_1^2} VTEC \frac{1}{\sqrt{\cos^2(\alpha) \left(\frac{R_{\oplus}}{R_{\oplus} + h}\right)^2}} \quad (3.14)$$

Con $f_1 = 1575.42$ MHz = frecuencia L1 TEC = contenido total de electrones
VTEC = contenido vertical total de electrones α = elevación del satélite sobre el horizonte
 β = ángulo de entrada de la onda en la ionosfera de capa delgada respecto a la vertical
 R_{\oplus} = radio de la Tierra h = altura de la capa delgada de ionosfera

Además, es posible aproximar el último término geométrico a una serie con parámetros tabulados función únicamente de la elevación α , según:

$$\frac{1}{\sqrt{\cos^2(\alpha) \left(\frac{R_{\oplus}}{R_{\oplus} + H}\right)^2}} \approx a + b \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) + c \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)^2 + d \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)^3 \quad (3.15)$$

Con $a = 1 + \frac{2}{3375}$; $b = \frac{4}{75\pi}$; $c = \frac{16}{10\pi^2}$; $d = \frac{16}{\pi^3}$

Esta aproximación es el llamado algoritmo de Klobuchard para receptores de una frecuencia (17), que es capaz de reducir el error ionosférico para estos dispositivos en hasta un 50%, como se tuvo en cuenta en los cálculos de la Tabla 2.1, donde se aplicaron las correcciones según este modelo.

4 LAS AURORAS

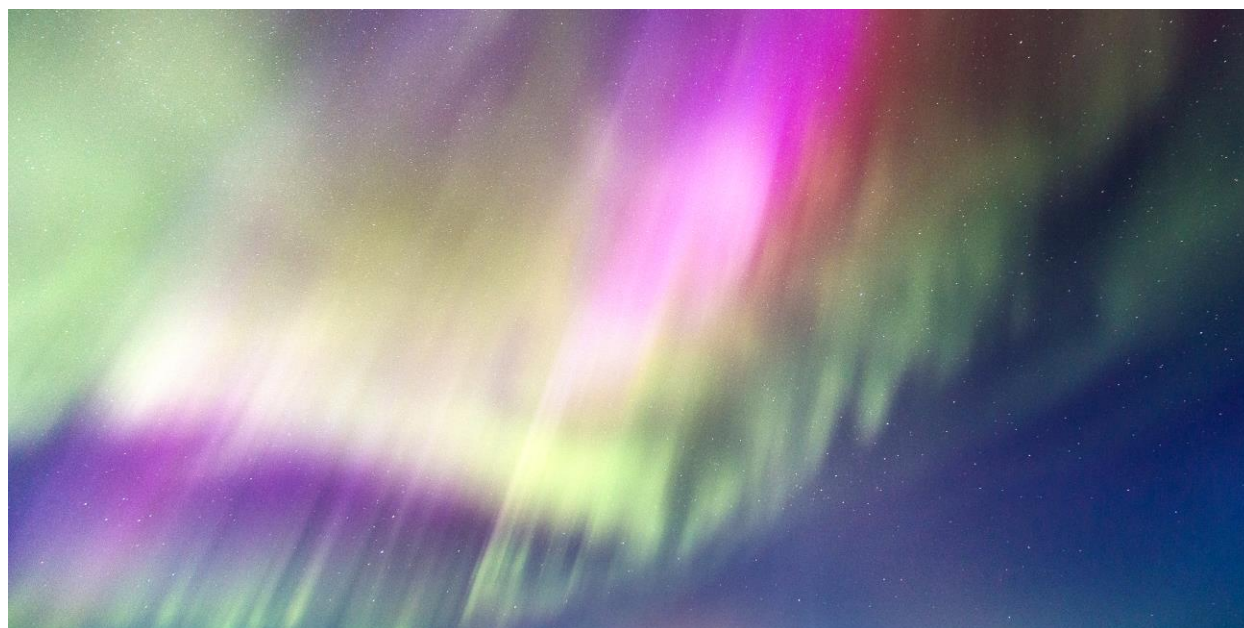


Imagen 4.1. Aurora sobre el Círculo Polar Ártico. Autoría propia.

Como se concluyó en la Capítulo 1, la aparición de auroras tiene una alta correlación -con una relación causística, como se verá- con una alta actividad ionosférica, con lo que es posible tomar este espectacular fenómeno de luces como un indicador natural de, entre otros, la densidad de electrones en la ionosfera. Pero son necesarias varias condiciones para que surjan las auroras y todas ellas deberán tenerse en cuenta para extraer un resultado concluyente en la presente investigación.

Cuenta la leyenda de la milenaria cultura Sami, nativa de la Laponia, que un zorro ártico frota su enorme cola blanca contra los copos de nieve de las montañas para crear las chispas que brillan con colores en el cielo de las noches invernales. Esta historia, inventada para intentar dar una explicación al espectáculo de la naturaleza que son las auroras, satisfacía a los nativos del norte de Europa hace siglos, pero para los primeros exploradores y científicos en adentrarse en estas regiones en el siglo XIX no era una explicación válida. Poco se sabía sobre los motivos que originan que en los cielos nocturnos de muy altas -y muy bajas- latitudes aparecieran toda una suerte de formas de colores brillantes, que se movían y aparecían de manera fortuita. Muchos estudiosos de comienzos del s. XX intentaron encontrar una explicación y empezaron a estudiarla, pero la aurora polar seguía siendo un gran misterio para la ciencia.

Hoy, bien entrado en el s. XXI, tras la puesta en órbita de satélites artificiales con sensores que estudian y monitorizan la ionosfera, se conocen las bases físicas de la formación de auroras y es posible predecir su aparición con aceptable precisión, pero incluso con todo el conocimiento y la instrumentación actual, el comportamiento de las auroras no es completamente conocido ni mucho menos es posible predecir su movimiento, forma o color, con lo que es un espectáculo único, irreplicable e inesperado para toda persona que tenga el privilegio de observarlas.

4.1 Historia del estudio de las auroras

Con el crecimiento del conocimiento y la ciencia, muchos científicos intentaron superar las leyendas de zorros y dragones que giraban en torno a las luces del cielo nocturno. Los primeros estudios científicos datan del siglo XVII, cuando en 1621 el astrónomo francés Pierre Gassendi describe este fenómeno observado en el sur de Francia y le da el nombre con el que lo conocemos actualmente, la aurora polar.

Más adelante, en el siglo XVIII, el famoso astrónomo británico Edmond Halley publica un ensayo en el que vuelca sus sospechas de que la formación de la aurora debería estar relacionada con el campo magnético de la Tierra, pues destacó que los rayos de las auroras seguían fielmente la inclinación que sufre la aguja de una brújula a medida que se aproxima al polo magnético. Esto era consecuencia de que las líneas de campo no sólo apuntan hacia el norte, sino que también se inclinan hacia el interior de la Tierra en los polos, dando un ángulo sobre la vertical a todo elemento que siga estas líneas.

En 1768, Henry Cavendish determina la altitud en la que se produce el fenómeno, concluyendo que tiene lugar en capas altas de la atmósfera. Sin embargo, no se conocía en aquella época la composición y carga de la ionosfera, ni mucho menos la relación entre fenómenos magnéticos y eléctricos -que tardarían aún un siglo en ser definida por Maxwell-, y por lo tanto no le permitía entender el mecanismo que las hacía posible.

No fue hasta 1896, ya con las bases del electromagnetismo conocidas por la comunidad científica, cuando Kristian Birkeland reprodujo en un laboratorio los movimientos de las partículas cargadas en un campo magnético, facilitando la comprensión del mecanismo de formación de auroras. Durante los años siguientes, Birkeland colocó dentro de una cámara de vidrio una pequeña esfera con un imán en su interior. A esta esfera la denominó *terrella* o “pequeña tierra”, simulando el comportamiento del planeta en el espacio. Para ello hizo vacío dentro de la cámara y dirigió hacia ella un haz de electrones. Tal y como había imaginado, el campo magnético de la *terrella* condujo a los electrones con carga negativa a lo largo de las líneas de campo, hasta impactar con la superficie de la pequeña esfera en puntos alrededor de sus polos magnéticos. Al hacerlo, producían un visible resplandor en forma de corona circular, en torno a los polos.

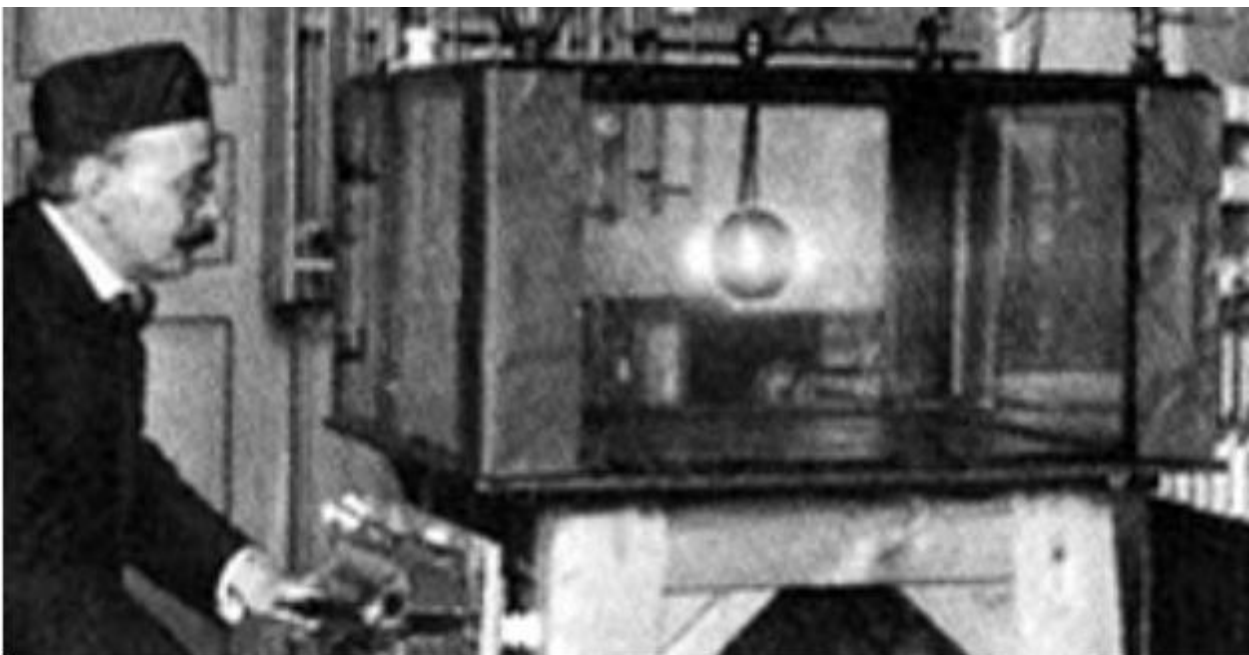


Imagen 4.2: Kristian Birkeland realizando su experimento de bombardear una pequeña esfera imantada con haces de electrones. Se puede apreciar el resplandor que producían los impactos de electrones.

Esto hizo sospechar a Birkeland que un haz de electrones que provenía del espacio exterior era la causa de la formación de las auroras polares. Sin embargo, aún faltarían unos años para conocer el origen de esas partículas -que provienen del Sol, como se explicará en la siguiente sección- y casi un siglo para comprender los mecanismos de plasma que intervienen en la aparición de estas luces del cielo. De hecho, fue con la llegada de los primeros satélites para estudio de las altas capas atmosféricas y del campo magnético y cinturones de radiación cuando realmente se pudo determinar la causa de éstas. Cabe destacar entre estos proyectos espaciales el satélite Fast Auroral Snapshot Explorer lanzado en 1996 y la investigación detrás de él, que estuvo hasta su retirada en 2009 estudiando la física de plasma y los fenómenos de aurora en los polos de la Tierra.

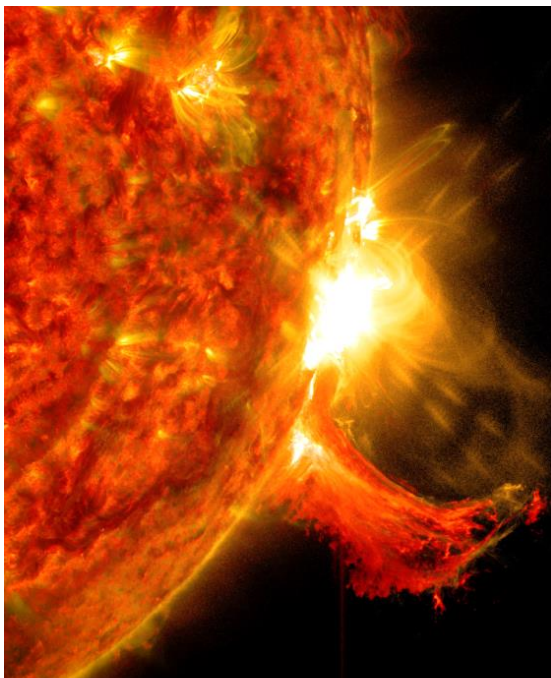
Sin embargo, la comunidad científica reconoce que aún queda mucho por comprender en torno a la aparición, formación y comportamiento de las auroras. Es por ello que organismos como el recién fundado Northern Lights Research Centre, en Islandia, o los más veteranos Finnish Meteorological Institute en Finlandia y el Northern Lights Space and Science Centre en Canada, siguen investigando y recopilando datos de observación que permitan conocer mejor su movimiento, características y consecuencias para la tecnología y la vida en la Tierra.

4.2 Formación de las auroras

Como dedujo Birkeland, la aparición de las auroras es causada por un flujo de partículas provenientes del exterior de la Tierra y el campo magnético terrestre tiene un papel fundamental. Sin embargo, intervienen muchos otros fenómenos cuánticos y fluidodinámicos que es necesario conocer y que eran muy avanzados para su época.

4.2.1 Origen

Todo comienza en el corazón del Sol, la estrella enana amarilla de nuestro sistema. Éste, con una masa del orden de 2×10^{30} kg, está compuesto en su mayor parte de hidrógeno, que fusiona en helio a razón de 600 millones de toneladas de materia por segundo. De éstas, alrededor de 4 millones de toneladas se transforman en energía pura que se libera al espacio en forma de radiación, que viaja a la velocidad de la luz hasta la Tierra para darle calor y hacer la vida posible.



Sin embargo, el Sol no emite únicamente radiación en forma de ondas. Como se explicó en la sección 3.3, en el interior solar tienen lugar múltiples fenómenos magneto y fluidodinámicos como consecuencia de la interacción de su intenso y variante campo magnético y el plasma de su superficie, que puede producir que la presión y la densidad del plasma se reduzca, se enfríe y se presente en la superficie solar como manchas oscuras. La intensidad de esta interacción es cíclica, con ciclos de unos 11 años, como se presentó en la Imagen 3.5. Así, se puede constatar que en periodos con más manchas solares la actividad solar es más intensa, lo que conlleva que aparezcan más aleatorias y violentas tormentas solares de las que se habló en la subsección 3.3.2.

Imagen 4.3. Expulsión de material al espacio por una llamarada solar (22)

En el desarrollo de estas tormentas solares, gigantescas cantidades de materia es expulsada desde la superficie del sol al espacio. Esta materia está compuesta principalmente por protones, electrones y partículas alfa, esto es, el hidrógeno y helio constituyente del Sol, pero totalmente ionizado, de manera que quedan las partículas libres y cargadas eléctricamente. Las partículas son aceleradas en la violenta liberación de presión en la fotosfera y conducidas por el sistema solar siguiendo las líneas de campo magnético del Sol. Todo esto constituye el llamado viento solar, que es lanzado por el espacio con velocidades entre 500 y 1000 km/s -aunque para cuando llega a la Tierra se ha visto reducida su velocidad a entre 200 y 800 km/s-, de manera que tarda entre 2 y 4 días en recorrer los 150 millones de kilómetros que separan de media el Sol y la Tierra.

Al llegar a las cercanías de la Tierra, más concretamente al llegar en contacto con la magnetosfera -es decir, al espacio con significativa acción del campo magnético terrestre- el viento solar, que hasta ahora seguía el camino guiado por las líneas de campo magnético solar, encuentra un campo magnético más intenso y cambia su camino para seguir las líneas de campo magnético terrestre. Éstas describen una curva que sale del polo magnético sur terrestre hasta el polo magnético norte y no tocan la superficie de la Tierra en ningún otro punto, de manera que gracias a la magnetosfera la inmensa mayoría de las partículas cargadas del viento solar no impactan directamente en la superficie del planeta en latitudes medias o bajas.

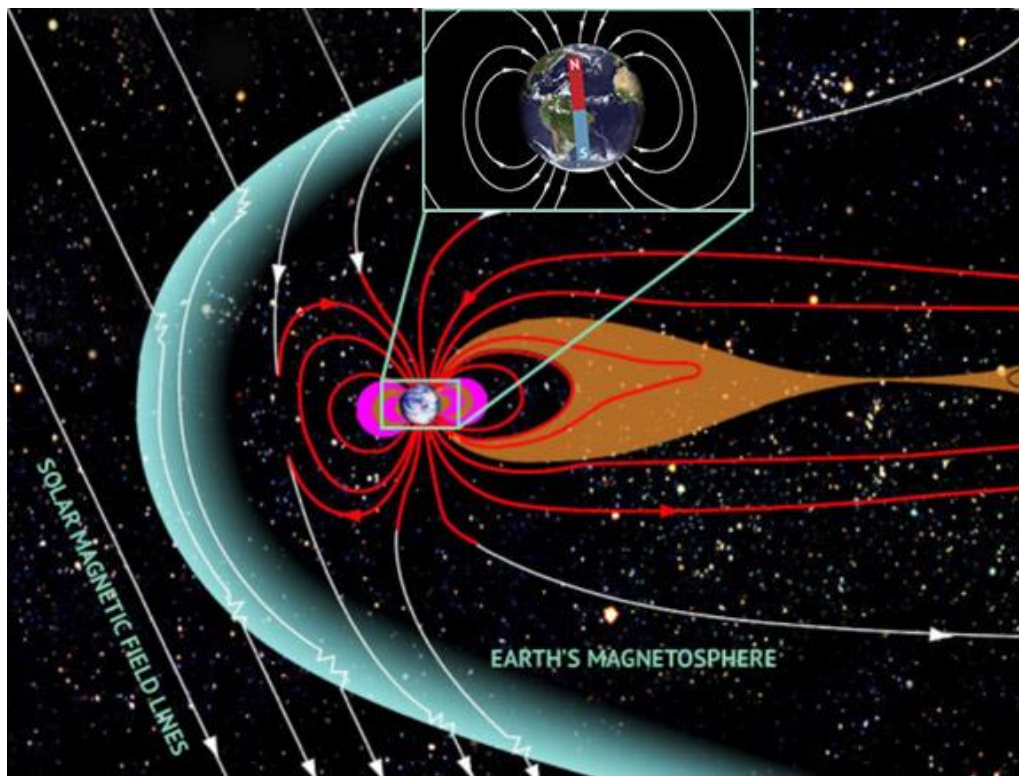


Imagen 4.4. Campo magnético solar y campo magnético terrestre. Adaptación de (35)

En su nuevo camino desde el Sol, una parte de las partículas es guiado por las líneas de campo hacia el norte y sur magnético terrestre -en función de si tienen carga positiva o negativa-, primero bastante paralelo a la superficie para, a medida que se acercan al polo magnético, ir inclinándose hacia el suelo. Es en estas latitudes cuando empiezan a penetrar en la atmósfera terrestre y a colisionar con las partículas que la componen. Sin embargo, esa parte del viento solar que proviene directamente del Sol y sólo ve ligeramente desviada su trayectoria hacia el polo, incide en la cara de la Tierra que está siendo iluminada por la radiación solar directa. Es decir, la parte del planeta donde es de día, y donde cualquier ligera iridiscencia es inapreciable bajo la intensa luz solar. De este modo, aunque el fenómeno está ocurriendo, no es posible hablar de auroras visibles.

Las auroras visibles en la oscuridad de la noche son ocasionadas por partículas del viento solar que recorren un camino un poco más largo, pues son transportadas por líneas de campo que se pliegan hacia la cara en sombra de la Tierra. Esto es posible porque, por la misma acción de la presión del viento solar y el campo magnético solar en la dirección de la cara iluminada, las líneas de campo más abiertas de la magnetosfera sufren un desplazamiento en esa dirección, llegando a curvarse hacia la cara opuesta. En este proceso, las curvas se vuelven abiertas -o cerradas a una distancia muy grande- con lo que no hay conexión entre los polos norte y sur y, por lo tanto, fuerza magnética que dirija las partículas a lo largo de la línea de campo.

Cuando este plegamiento de las curvas abiertas evoluciona por la acción continua de la presión solar, llega al punto en que ambas líneas de campo, provenientes del norte y sur magnético, se tocan. En este momento forman una curva cerrada que comunica ambos polos y aparece de manera repentina una intensa acción magnética. En este momento, todas las partículas cargadas que viajaban dentro de ellas son aceleradas hacia los polos magnéticos terrestres que actúan de sumidero. Pero al encontrarse esta vez en la cara opuesta de incidencia solar, precipitan en la atmósfera de regiones donde es de noche. Y entonces sucede la magia.

Toda esta evolución es representada en la Imagen 4.4 que acompaña a este texto. En el fotograma superior se muestra la incidencia de las partículas cargadas en la cara diurna del planeta. Sin embargo, sólo una parte de todo el viento solar precipita en este proceso. Grandes cantidades de partículas son retenidas en las líneas de campo que se pliegan hacia la cara en sombra -fotograma 2-, pero al cerrarse éstas, las partículas sufren una aceleración de vuelta hacia los polos -fotograma 3-. En el fotograma inferior se puede observar cómo ahora los iones provenientes del viento solar inciden en las regiones polares de las zonas en sombra, pero nótese que no es exactamente en los polos geográficos. Esto da lugar a los *círculos ovals*, de los que se hablará en la siguiente sección.

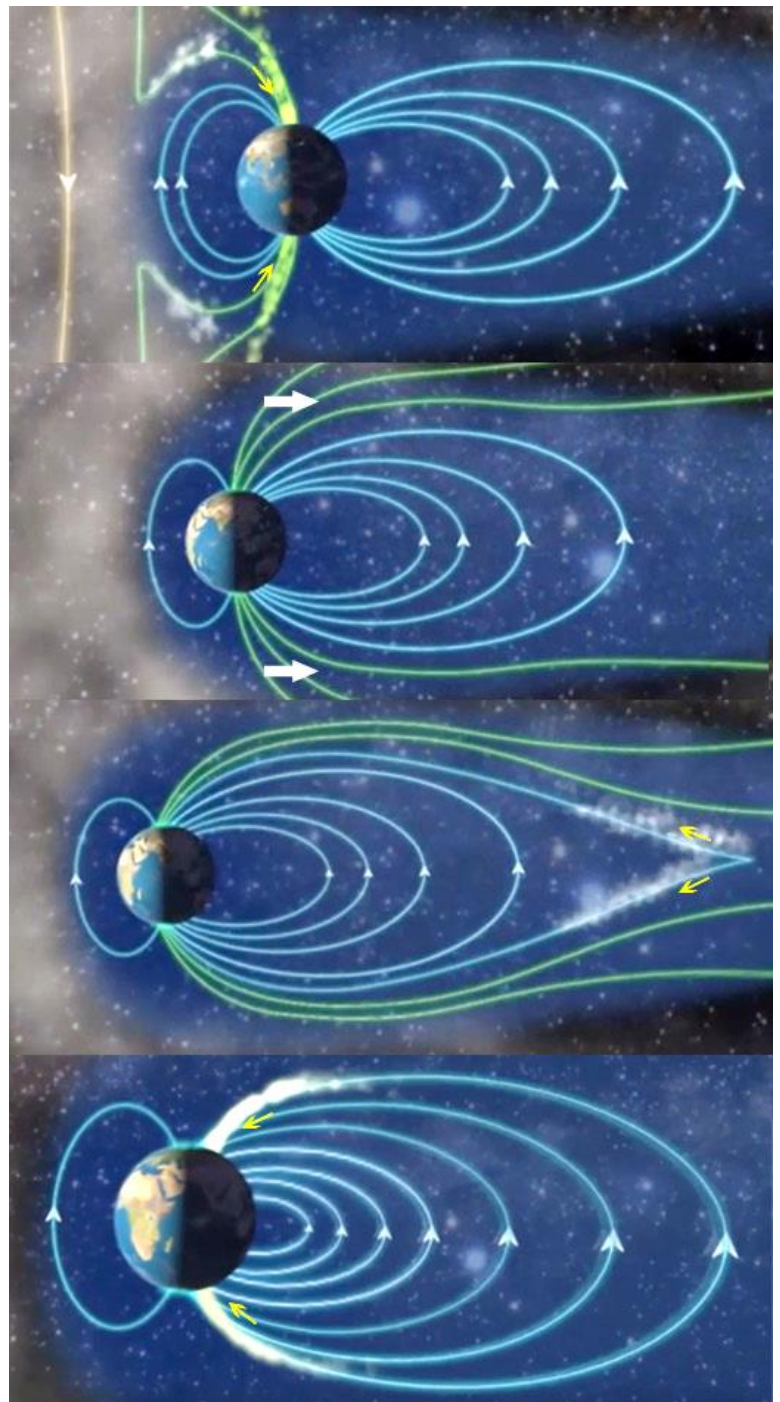


Imagen 4.5. Evolución de las líneas de campo magnético que producen las auroras nocturnas. En líneas amarillas se representan las líneas de campo magnético solar, en azul las de campo magnético terrestre, y en verde las líneas de campo terrestre arrastrando partículas de viento solar. Con flechas amarillas se representa el movimiento de partículas cargadas dentro de las líneas de campo, y con flechas blancas el desplazamiento de las líneas de campo por la presión ejercida por el sol. Adaptación de (23)

4.2.2 Proceso en la atmósfera

Se describió con detalle la composición de la atmósfera en el Capítulo 3, donde se hizo especial hincapié en la capa superior, la ionosfera. Es en esta región donde todas las partículas cargadas del viento solar -se recuerda, principalmente electrones y protones libres- encuentran, por primera vez desde que iniciaran su viaje desde la superficie del Sol, un medio denso -menos denso que la troposfera, pero aún así mucho más denso que el vacío interplanetario- que obstaculiza su paso. Es decir, los iones que llegan con gran velocidad siguiendo las líneas de campo magnético terrestre encuentran en su camino las moléculas que conforman la ionosfera, siendo éstas principalmente nitrógeno y oxígeno.

En esta colisión tiene lugar un fenómeno a nivel atómico conocido como *excitación*. En este proceso, una partícula energética impacta con el orbital de un átomo, transfiriendo su energía a éste. Entonces, provisto de mayor energía, un electrón del orbital puede ascender a otro orbital superior más energético. Sin embargo, este estado atómico con un orbital superior relleno con un electrón estando el orbital inferior no completo es altamente inestable, de modo que eventualmente el electrón en el orbital superior volverá al orbital original para intentar completarlo. Y para conseguir volver al orbital menos energético necesita liberar energía en forma de un fotón, de energía igual a la diferencia de energías entre orbitales. Este proceso puede visualizarse en la Imagen 4.5 para un átomo de oxígeno como los que se encuentran en la atmósfera terrestre, donde se cumple que los dos primeros orbitales están completos.

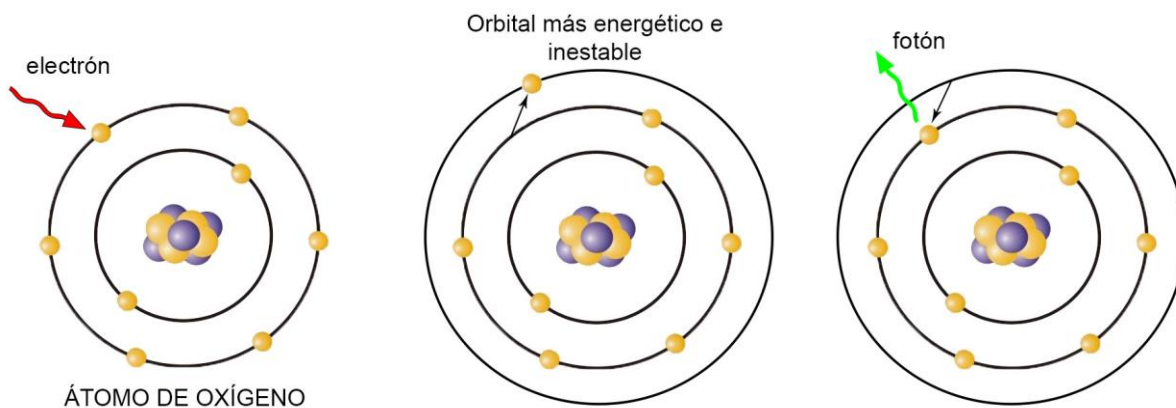


Imagen 4.6. Excitación de un átomo de oxígeno y posterior emisión de un fotón para volver al estado fundamental

Este fotón liberado tendrá una energía, y por lo tanto una frecuencia, que dependerá del salto orbital. Es decir, dependerá del átomo excitado y de la energía con la que fuese excitado. Y dado que hablar de un fotón es hablar de luz, y hablar de frecuencia de la luz es hablar de su color, el resultado de la emisión fotónica por los átomos excitados de la ionosfera es emisión de luz de un color determinado. **Este proceso, reproducido en innumerables átomos de toda la ionosfera expuesta al impacto del viento solar, produce la luminiscencia de diversos colores en el cielo conocido como auroras polares.**

En la ionosfera se encuentran principalmente oxígeno (O) y nitrógeno (N) atómicos y nitrógeno molecular (N₂), que se encuentran en su nivel más bajo de energía, es decir, en su estado fundamental más estable, como el representado arriba. Como se ha mencionado, el color emitido por el fotón depende del tipo de átomo excitado y de la energía de impacto del electrón y por lo tanto del salto orbital producido.

Los electrones con alta cantidad de energía provocan que el oxígeno emita fotones en el espectro del verde-amarillento, que es el más común en las auroras y el más visible. Si las mismas moléculas de oxígeno son excitadas por electrones de baja energía, provocarán una liberación de fotones en un espectro rojizo. El verde/amarillo se produce a una longitud de onda de 557 nm, mientras que el color más rojo y ligeramente morado lo produce una longitud menos frecuente en estos fenómenos, a 630 nm. Si el átomo impactado es de nitrógeno, la luz emitida será azul violácea, de longitud de onda en torno a 450 nm. A veces, la mezcla de estos colores produce otros colores visibles por los observadores, como son el púrpura, rosa o incluso blanco.

Los diferentes colores, al ser consecuencia de excitaciones por partículas de diferentes velocidades, también ocurren a diferentes alturas de la ionosfera, al tener estas partículas más capacidad de penetración. De este modo, el color verde del oxígeno aparece en altitudes entre 100 y 240 km, mientras que el rojo producido por partículas menos energéticas aparece entre los 240 y 320 km sobre el suelo. Por su parte, la emisión azul del nitrógeno se presenta siempre a menor altitud, entre los 80 y 95 km, apareciendo los tonos más violeta por encima de los 95 km.

Estos fenómenos ocurren en la región de impacto del viento solar con la atmósfera terrestre, es decir, allí donde las líneas de campo magnético por la cara en sombra de la Tierra penetran en la atmósfera. Sin embargo, los polos norte y sur magnéticos no coinciden con los polos norte y sur geográficos. Los polos magnéticos se desplazan continuamente como consecuencia del comportamiento fluidodinámico del núcleo de hierro del planeta Tierra, origen del campo magnético que lo rodea. De este modo, actualmente el polo norte magnético se encuentra a unos 1600 km del polo geográfico, desplazándose a razón de 40 km/año y con tendencia acelerada.

Es pues lógico suponer que la zona donde aparecerán las auroras no será exactamente en la latitud $\pm 90^\circ$. Se comprueba observando desde el espacio el llamado *óvalo auroral*, que es la región con forma de corona circular que aparece alrededor del polo geográfico con fenómenos de aurora. Éste coincide con las latitudes desde las que emana el polo magnético, como se aprecia claramente en la Imagen 4.6, fotografía satelital de la NASA donde se puede ver definida la circunferencia con aparición de aurora, teniendo en la semicircunferencia en sombra el grueso de los fenómenos.

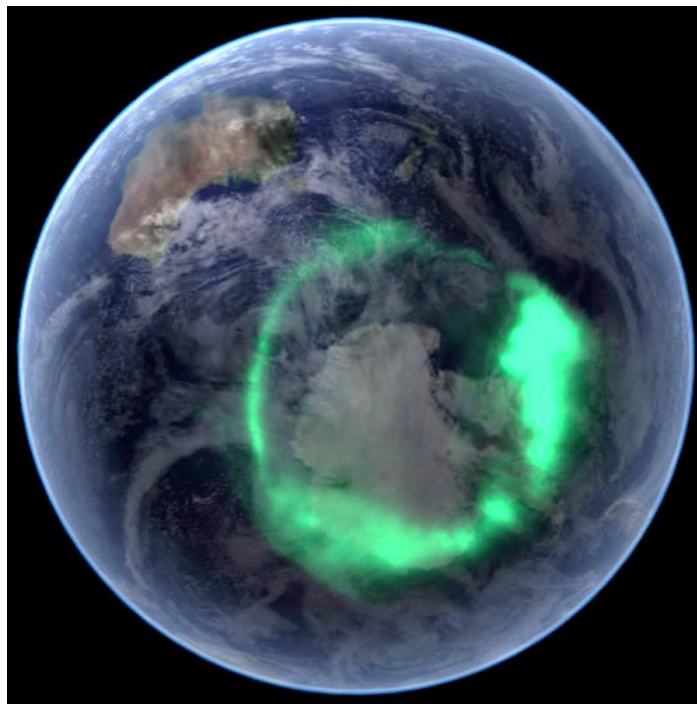


Imagen 4.7. Óvalo auroral en torno al polo sur geográfico
(22)

4.3 Tipos de auroras

Como se ha mencionado, aunque el proceso de emisión de luz ocurre a nivel atómico, la aurora es un fenómeno macroscópico que sólo es posible cuando una enorme cantidad de átomos de una misma región son excitados. Estos átomos forman parte del gas que constituye la ionosfera – con grandes propiedades de plasma, como se explicó en la Sección 3.2 –, de manera que el movimiento del fenómeno iridiscente que emana de ellos comparte gran parte de su comportamiento. Por ello, desde el suelo es posible ver cómo se forman toda suerte de formas, habitualmente con aspecto de cortinas y cintas de luz, que se mueven suavemente por el cielo. Estas formas son cambiantes y pueden aumentar y disminuir de visibilidad de manera impredecible, desplazándose con las corrientes. Algunas veces aumentan de tamaño e intensidad de una manera repentina, lo que se denomina una subtormenta auroral, y la liberación de energía que las causa es aún objeto de estudio.

Sin embargo, es posible clasificar las auroras en sus cuatro formas más comunes:

- **Aurora de arco:** se muestra como una circunferencia de gran radio sobre el cielo.
- **Aurora de corona:** típicamente con variedad de colores ya que se proyecta en diferentes alturas, forma una figura de cono o corona sobre el observador. Es consecuencia de que los rayos están llegando de manera vertical sobre su posición.
- **Aurora difusa:** es la formación de aurora menos común o al menos la más difícil de ver, ya que se muestra como un débil brillo difuso que lo hace difícil de apreciar con el ojo desnudo.
- **Aurora de volantes:** el tipo más frecuente, que forma una cortina vertical ondulada, como si de los volantes brillantes de un traje se tratasen.

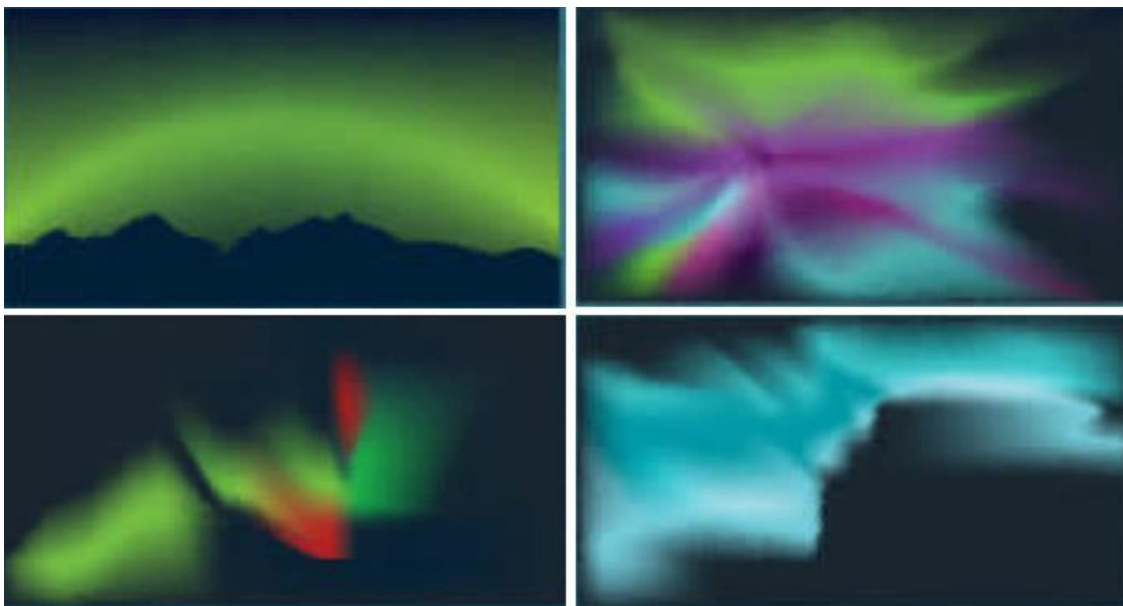


Imagen 4.8. De arriba abajo y de izquierda a derecha: aurora de arco, de corona, difusa y de volantes. Adaptación de (24)

Cabe destacar que, si bien en este texto se ha mostrado para todos los ejemplos el caso de átomos excitados por el impacto de electrones, como se ha mencionado en la Sección 4.1, el viento solar que es conducido por el campo magnético terrestre está compuesto por electrones y protones. Estos protones, con carga positiva, son mucho más pesados que los electrones y, aunque con extremadamente poca frecuencia, también generan auroras. Éstas son las llamadas *auroras de protones*, que emiten un resplandor blanco plateado en el espectro visible, pero también una gran cantidad de fotones en el espectro ultravioleta que sólo son detectables por los sensores de satélites en órbita.

5 TRABAJO DE CAMPO Y METODOLOGÍA

Con todo lo expuesto en los capítulos anteriores, es patente la necesidad de un estudio pormenorizado del comportamiento de los sistemas GNSS bajo condiciones de aurora sobre el cielo del observador, para acortar los posibles errores en medida, predecir la fiabilidad de las medidas observadas y corregir éstas mediante los métodos disponibles en caso de ser un sistema crítico.

Por ello, el presente trabajo planteará un estudio inicial de este fenómeno, además de plantear un método de análisis de la relación entre auroras y calidad de señal GPS. Este estudio serviría de base para una posterior investigación más ambiciosa, con mayor tiempo, presupuesto e intención, que pueda recopilar mayor y más variadas muestras que resulten estadísticamente significativas para extraer resultados concluyentes.

Una vez abordado el problema y elaborada la hipótesis, es evidente que para realizar un experimento que analice las señales recibidas bajo esas complejas e infrecuentes condiciones es necesario llevarlo a cabo in situ. Cualquier intento de reproducción de las condiciones ionosféricas en un laboratorio, siendo tan limitado el conocimiento que se tiene de ellas, arrojaría un resultado insatisfactorio, amén del enorme presupuesto que requeriría. Por ello, toda la recopilación de datos se trasladó al Ártico. Más concretamente, se realizó en diferentes puntos de la Laponia finlandesa y noruega, llegando hasta el mismo Cabo Norte, el punto más septentrional y con mayor probabilidad de auroras de toda Europa.

La investigación fue posible gracias al apoyo de la Universidad de Sevilla y la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, quienes financiaron gran parte de la adhesión de la investigación a la expedición Polar Raid Laponia 2016. Polar Raid es una expedición privada, perteneciente a la Asociación Española de Regiones Polares, que pretende acercar la cultura y el estilo de vida de las zonas polares a estudiantes, profesores e investigadores universitarios de toda España. Por ello, la investigación también recibió un gran apoyo por parte de la organización de la expedición, quienes facilitaron todo lo posible la toma de las medidas durante el transcurso de la expedición y dieron difusión al proyecto en todos sus medios.

5.1 Fechas y localizaciones

La expedición partió de Rovaniemi, ciudad finlandesa entablada sobre las líneas del Círculo Polar Ártico, y estableció la primera noche a orillas del Lago Inari el 20 de marzo de 2016. La toma de datos GPS se realizó desde esta primera noche hasta el 26 de marzo en aquellos lugares donde acampaba la expedición, todos ellos comprendidos en la región conocida como Laponia, antiguo territorio ocupado por la cultura Sami y que actualmente comparte soberanía de Noruega, Suecia y Finlandia, permitiendo el paso libremente por toda ella.

La segunda noche, del 21 de marzo, también se desarrolló junto al Lago Inari, pero los registros se tomaron en una orilla distanciada unos 500 m de la primera noche.

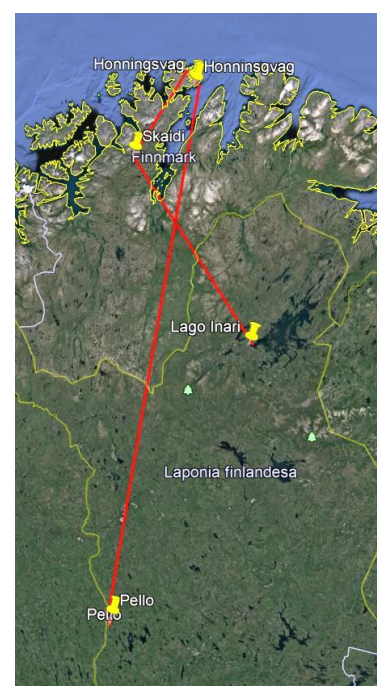


Imagen 5.1: Ruta seguida a través de Laponia

La noche siguiente, 22 de marzo, se tomaron registros desde la aislada localidad de Skaidi, ya en tierras noruegas, a la que siguieron las dos noches del 23 y 24 de marzo en el pueblo del fin del mundo, Honningsvåg, situado en el punto más septentrional de la Europa continental.

Finalmente, durante el camino de vuelta a Rovaniemi fue imposible tomar medidas a ninguna hora, pero la noche antes de finalizar la expedición, el 26 de marzo, se tomaron unos últimos datos GPS desde la localidad de Pello.

Un resumen de los lugares, fechas y horas exactas de las medidas se recoge en la siguiente tabla:

Medida nº	Fecha	Hora	Nombre	Latitud (N)	Longitud (E)
1	20/03/2016	22:19	Inari orilla	68º 54' 22,5"	27º 00' 21,54"
2	20/03/2016	22:55	Inari orilla	68º 54' 22"	27º 00' 21"
3	20/03/2016	1:05	Inari Lago	68º 54' 11,1"	27º 02' 27,75"
4	20/03/2016	3:05	Inari Lago	68º 54' 11"	27º 02' 27"
5	21/03/2016	22:24	Inari Lago	68º 54' 9,1"	27º 02' 19,13"
6	21/03/2016	23:59	Inari Lago	68º 54' 12,2"	27º 02' 20,5"
7	21/03/2016	3:33	Inari Lago	68º 54' 8,9"	27º 02' 18,89"
8	22/03/2016	23:12	Skaidi	70º 26' 2,5"	24º 30' 5,17"
9	22/03/2016	2:48	Skaidi	70º 26' 2,5"	24º 30' 5,17"
10	23/03/2016	23:32	Honningsvåg	70º 58' 35,4"	25º 59' 14,21"
11	23/03/2016	2:55	Honningsvåg	70º 58' 35,7"	25º 59' 14,1"
12	24/03/2016	22:55	Honningsvåg	70º 59' 50,24"	25º 57' 40,56"
13	24/03/2016	3:04	Honningsvåg	70º 59' 50,11"	25º 57' 40,81"
14	26/03/2016	23:05	Pello	66º 46' 25,12"	23º 57' 56,80"
15	26/03/2016	2:23	Pello	66º 46' 25,32"	23º 57' 56,74"

Tabla 5.1: Días, horas y lugares exactos de la toma de medidas GPS

Las coordenadas de los lugares de toma de las muestras se obtuvieron, evidentemente, de los equipos de medida GNSS, y las horas en las que se realizó fue aproximadamente la misma en cada uno de los días. Que no fuese exactamente la misma hora tiene como consecuencia que no se encontraban los mismos satélites en el cielo de observación cada noche (como se vio en el capítulo 2, los satélites de la constelación GPS completan dos vueltas exactas cada 24h), y esto podría parecer que sería inadecuado de cara a mantener constantes todos los parámetros no ionosféricos.

Sin embargo, dado que en cada día se tomaron medidas en un lugar diferente, aunque se hubieran tomado a la misma hora no se habrían encontrado exactamente los mismos satélites en la misma posición del cielo cada día, con lo que en cualquier caso no se hubiese mantenido constante esa condición. Además, el hecho de encontrar satélites en distintas elevaciones sobre el terreno permite aumentar la probabilidad de encontrar una aurora en el camino de la señal electromagnética.

5.2 Equipos de medida

5.2.1 Teléfono móvil OnePlus One

Pese a no ser un equipo de geoposicionamiento profesional de gran precisión, es indudable que en la última década se ha democratizado la capacidad de orientación y guiado en cualquier parte del globo para el gran público gracias al boom de los *smartphones*. Éstos, que se han convertido en una herramienta personal para casi todos los ciudadanos de los países desarrollados, son hoy en día el dispositivo GNSS más utilizado en todo el mundo y cobrará más importancia en los años venideros. Es por eso que tiene sentido que el presente estudio analice la influencia especialmente en dispositivos de este tipo. Además, el hecho de poder contar con toda la potencia de un sistema operativo abierto y de gran apoyo de desarrolladores permitió disponer de toda suerte de programas que aportasen la información más completa de la señal.

El terminal elegido fue un *smartphone* de la marca OnePlus, modelo One, equipado con una antena monofrecuencia omnidireccional compatible con el sistema GPS, GLONASS y BeiDou. Como software de análisis de la señal satelital se utilizaron los programas *GPS Data+*, de la empresa Propane Apps; *GPS Status & Toolbox*, del desarrollador EclipSlim; y *GPS Test* de Chartcross Limited, como programa de medición de la intensidad de la señal. Además, para monitorizar la actividad ionosférica se consultaron los informes de la NOAA a través de los programas *Northern Eye Aurora Forecast* y *Aurora Notifier*.

5.2.2 GPS Leica Geosystems

Si bien la gran mayoría de dispositivos de geoposicionamiento usados en todo el mundo son *smartphones*, la falta de precisión de éstos hace que el estudio de variabilidad de la señal a través de un dispositivo así esté limitado a dicha precisión. Es por ello que se antoja necesario un estudio más pormenorizado con un equipo de medida de mayor precisión que permita concluir una relación más fiable.

De este modo, durante la expedición se tomaron medidas también con un receptor Leica Geosystems GS Sensor modelo CS10. Este dispositivo de geolocalización fue cedido por la empresa de manera desinteresada para hacer posible la investigación, permitiendo tomar medidas en precisión submétrica y con completa información de la posición de los satélites vistos. El uso de este instrumento supuso un exigente estudio de su funcionamiento en muy poco tiempo ya que, orientado a un perfil profesional, la interfaz pecaba de poco intuitiva y la terminología, toda en inglés, exigía un profundo conocimiento de la tecnología de geoposicionamiento. Pese a todo, las medidas fueron tomadas satisfactoriamente en todas las posiciones descritas en la Tabla 5.1.

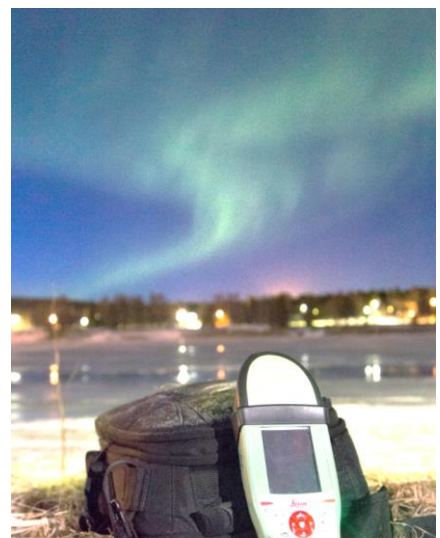


Imagen 5.2: Receptor utilizado bajo una aurora boreal

Sin embargo, **sí ha sido un escollo insalvable la utilización del software necesario para leer y procesar los archivos** generados por este dispositivo. Si bien el hardware fue cedido de manera gratuita, el software compañero no lo ha sido, teniendo éste un precio para el usuario del todo inalcanzable con el limitado presupuesto de la investigación. De esta manera, en la actualidad se tienen almacenados docenas de archivos en el formato propio de Leica Geosystems imposibles de leer, que tendrían lecturas más precisas que las generadas por el *smartphone* pero que por ahora no pueden ser mostradas.

Se dejan éstas para una futura iteración de esta investigación, en la que pudiera contar con mayor apoyo o presupuesto para poder trabajar con el software de procesado y que serviría como una segunda iteración, exactamente en los mismos lugares, fecha y hora y bajo las mismas condiciones de atmósfera, pero con lecturas más precisas. Sin duda, este segundo análisis de los datos cumpliría con el rigor y las circunstancias para arrojar luz y dar veracidad a las conclusiones que del presente se obtengan.

Las especificaciones más relevantes del dispositivo CS10 utilizado son:

<i>Tecnología del instrumento</i>	SmartTrack+	
<i>Recepción de satélite</i>	Una frecuencia	
<i>Canales del instrumento</i>	14 canales para seguimiento continuo en L1 (GPS); 14 canales para seguimiento continuo en L1 (GLONASS); un canal para seguimiento SBAS	
<i>Códigos y fases empleados</i>	L1 Fase portadora, código C/A	
<i>Seguimiento de satélites</i>	Hasta 14 satélites simultáneamente en L1 (GPS) + hasta 14 satélites simultáneamente en L1 (GLONASS) + hasta un satélite SBAS	
<i>Código diferencial</i>	La precisión de la línea base con una solución de código diferencial para levantamientos estáticos y cinemáticos es de 40 cm. La medición de la precisión cumple con la norma ISO 17123-8.	
<i>Frecuencia</i>	GPS L1 1575.42 MHz GLONASS L1 1602.5625 MHz-1611.5 MHz	
<i>Ganancia</i>	Típicamente 27 dBi	
<i>Ruido significativo</i>	Típicamente < 2 dBi	
<i>Fase diferencial en post-proceso estático</i>	Precisión Horizontal	5mm +0.5ppm
	Precisión Vertical	10mm +0.5 ppm
<i>Fase diferencial en post-proceso cinemático</i>	Precisión Horizontal	10mm +1 ppm
	Precisión Vertical	20mm +1ppm

Tabla 5.2: Especificaciones técnicas del receptor GPS de Leica Geosystems

5.3 Recopilación de datos

Como en todo experimento que pretenda tener carácter y fiabilidad científica, todas las fases del proceso se realizaron de la misma manera metódica y rigurosamente, siguiendo los pasos que se detallarán en esa sección. De este modo, se cumple con la condición de reproducibilidad que exige toda experimentación científica, y se podrá, en futuras líneas de investigación, continuar con el estudio si así se requiriera.

A fin de reducir las variabilidades y errores en la medida y de tener todas las muestras posibles para obtener un resultado fiable, se tomaron entre dos y cuatro registros completos en cada noche. Cada uno de estos registros constó de:

- **Identificador de cada satélite visto:** como se mencionó en el capítulo 2, la constelación GPS consta de 24 satélites (más otros 2 de respaldo) repartidos en 6 órbitas. Cada uno de estos satélites lleva asignado un número del 1 al 24 que lo identifica, y que emite codificado en la señal. De esta manera el receptor es capaz de calcular la distancia a la que está de cada satélite y, conociendo las efemérides, determinar su posición. En este estudio se llevó un registro de cada satélite observado.
- **Posición de cada satélite:** cada satélite puede ser situado en un sistema de referencia sobre el observador con un sistema esférico, de manera que se sitúa como un punto ligado a la bóveda celeste. De esta forma, se registró cada satélite en altura (ángulo de elevación sobre el horizonte) y azimut (ángulo medido desde el norte geográfico).
- **Relación señal/ruido de entrada (SNR):** ésta es la relación existente entre la potencia de la señal recibida y la potencia del ruido que la estropea. Es medida en decibelios, y es determinada por el propio receptor para valorar la calidad de la señal. Es una medida del deterioro de la señal por distintos factores propios de la propagación y recepción de la señal. Conocido el SNR de salida, sería posible obtener el *factor de ruido* como el cociente del SNR de entrada entre el de salida.
- **Índice Kp:** éste es el indicador del índice K a nivel planetario, esto es, la media ponderada de todos los índices K observados por una red de observatorios geomagnéticos situados en distintas partes del globo, con valores entre 1 y 9. El *índice K* es un índice geomagnético, de tipo cuasi-logarítmico, que mide la perturbación de la componente horizontal del campo geomagnético a nivel local. Para ello, se mide la variación a lo largo de tres horas de este campo en una estación y se publica para su ponderación. Por encima de $K_p=5$ se considera tormenta geomagnética, y un mayor valor de este índice indica mayor probabilidad de aparición de auroras en el óvalo auroral. De hecho, se considera el índice predictor de auroras y de su potencia, y es por ello que se tomará como índice de presencia de auroras en este estudio. En estos valores altos se tiene, evidentemente, una alteración de la Capa-F de la ionosfera de latitudes altas.
- **Dirección e intensidad del Campo Magnético Interplanetario (IMF):** tal y como se explicó con la Imagen 4.5, las líneas del campo magnético terrestre se abren por efecto de la presión del viento solar, quedando partículas cargadas atrapadas en estas líneas de campo pero sin desplazarse por éstas. Éste es el IMF, y conociendo su dirección (polaridad y sentido) es posible predecir su evolución. De este modo, se puede estudiar el IMF como una cantidad vectorial con tres componentes direccionales, dos de las cuales (B_x y B_y) se orientan en paralelo a la eclíptica. La tercera componente - B_z - es perpendicular a la eclíptica y es creada por las ondas y otras perturbaciones en el viento solar.

Cuando el IMF y las líneas del campo geomagnético están orientadas de manera opuesta entre sí, se vuelven a conectar, resultando en la transferencia de energía, masa y cantidad de movimiento del flujo del viento solar sobre los polos que se detalla en la Imagen 4.5. El IMF se mide en nanoteslas (nT) variando entre 1 y 37 nT, con un valor típico de 6-8 nT.

- **Velocidad del viento solar:** si el parámetro anterior es capaz de predecir la precipitación de viento solar sobre los polos magnéticos, conociendo la velocidad de este viento solar es posible predecir la energía portadora de estas partículas y la consecuente excitación de las partículas ionosféricas. Esto tiene influencia tanto en la probabilidad de aparición de auroras como en el color de éstas, como se desarrolló en la sección 4.2.2.
- **Densidad del viento solar:** también es relevante la densidad de partículas, medida en partículas por centímetro cúbico, pues es evidente que una mayor densidad de viento solar tendrá consecuencias más intensas al portar más iones, que tendrán mayor probabilidad de impactar con las moléculas en la ionosfera y desencadenar sus efectos.
- **Coordenadas geográficas:** por supuesto, se registraron las coordenadas geográficas en latitud y longitud aportadas por el receptor. El lugar exacto donde se situó el receptor en cada lectura es conocido y fue elegido para ser fácil de situar respecto a un sistema de referencia fijo en cada lugar, tales como edificios o árboles. Así, es posible compararlos a posteriori con las coordenadas aportadas por mapas satelitales u oficiales.

Los valores de todos estos registros fueron tomados siempre en el mismo orden, con el receptor GPS situado a la misma altura de la cadera y en un lugar suficientemente cerca de un elemento grande y fijo como para ser referenciable -de manera que fuese posible encontrarlo fácilmente en mapas o fotos aéreas- pero no lo bastante alto como para que causase problemas de bloqueo o multitrayecto de la señal satelital. Así, se tuvo en todas las medidas unas condiciones de cielo abierto con visión directa de los satélites. La influencia de la orografía lapona, con pocos accidentes geográficos y de poca altitud, no es relevante pues, como se vio en el Capítulo 2, la señal recibida por satélites por debajo de los 15° de elevación es descartada por los receptores.

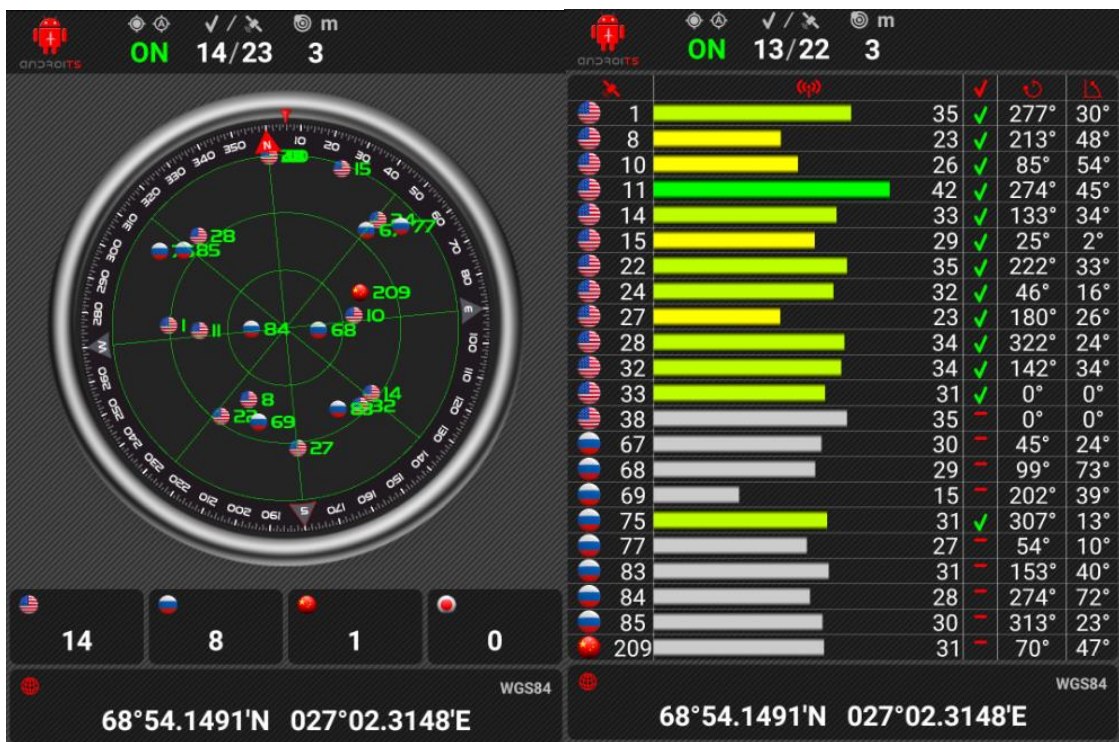


Imagen 5.3. Ejemplo de interfaz del programa GPS Status. Para cada satélite se registra SNR, operatividad, azimut y elevación, pudiendo elegir sistema GPS, GLONASS o BeiDou

Si algo cabe resaltar de las dificultades presentes en el trabajo de campo de este estudio, son sin duda las adversidades climatológicas. Pese a la belleza de los paisajes y el espectáculo sin igual que suponen las auroras boreales, las condiciones atmosféricas del Ártico ponían a prueba cada salida a la intemperie. El hecho de tomar medidas por la noche, algunas bien entrada la madrugada, suponía enfrentar temperaturas que oscilaban entre -25°C y -10°C , con sensaciones térmicas mucho menores en cuanto había algo de viento presente.

Por ello, tanto los propios dispositivos como el cuerpo humano sufrían riesgos de congelación, lo que limitaba el tiempo en el exterior para la toma de datos. En concreto, al requerir los dispositivos el manejo preciso con los dedos, para pulsar los pequeños botones del receptor Leica y para hacer funcionar la pantalla capacitiva en el *smartphone*, las manos expuestas sin guantes se enfriaban y entumecían rápidamente, siendo incluso doloroso en ocasiones, entorpeciendo mucho el proceso. Aún así, la motivación por realizar el estudio y la pasión por la ciencia, la tecnología y el Ártico permitieron que cada noche se llevara a cabo el estudio rigurosamente.

6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Es este capítulo se relacionarán todos los registros obtenidos según lo explicado en el capítulo anterior para, aplicando los cálculos correspondientes, poder extraer una conclusión inicial sobre la relación que tiene la actividad ionosférica - y su manifestación como auroras polares - sobre la recepción de señal satelital y su procesamiento para geolocalización.

Para ello, se comienza mostrando en la siguiente tabla los valores registrados de las condiciones ionosféricas y magnéticas de la Tierra en el momento y lugar de cada registro de datos GPS.

Medida n°	Fecha	Hora	Kp	Bz (nT)	Campo Mag (uT)	Declinación (°)	Velocidad viento solar (m/s)	Densidad electrones (e-/cm ²)
1	20/03/2016	22:19	3,67	19,2	59-53	12,3	413	2.8
2	20/03/2016	22:55	3,67	18,8	59-53	12	405	3.1
3	20/03/2016	1:05	4	17,3	59-53	12	411	2.9
4	20/03/2016	3:05	2,33	16,7	56-53	12	405	2.3
5	21/03/2016	22:24	3	23,7	55-53	12	399	9.1
6	21/03/2016	23:59	2	24,2	49-53	12	398	6.6
7	21/03/2016	3:33	2,33	24,6	48-53	12	379	5.3
8	22/03/2016	23:12	1,67	20,7	48-53	12	427	3.6
9	22/03/2016	2:48	2	21,8	53-53	12	383	6.9
10	23/03/2016	23:32	4,67	17,6	86-54	13	430	4.8
11	23/03/2016	2:55	4,33	18,4	84-54	13	446	4.5
12	24/03/2016	22:55	1,33	19,2	46-54	13	542	3.1
13	24/03/2016	3:04	1,67	24,9	46-54	13	538	1.3
14	26/03/2016	23:05	0,4	23,7	55-53	10	379	1.1
15	26/03/2016	2:23	0,33	24,9	54-53	10	377	0.9

Tabla 6.1: Valores de las condiciones geomagnéticas en cada toma

6.1 El Índice Kp como función de los parámetros geomagnéticos

6.1.1 Introducción

Por supuesto, como se vio en la Sección 5.3, el índice Kp que se tomará como representativo de la presencia de auroras presenta dependencia con muchos de los parámetros geomagnéticos registrados. Pese a no ser fundamental para el estudio, resulta interesante presentar la relación que existe entre este índice Kp y cada uno de los parámetros, de manera que se pueda identificar cuál es el más relevante para la formación de auroras y así permitir el estudio desde nuevos puntos de vista.

Para mostrar esa relación de manera fácil y rápida, es posible representar gráficamente el índice Kp frente a las demás variables. Así, en las gráficas que acompañan esta sección es posible encontrar cierta correlación entre algunas variables simplemente observando el crecimiento o decrecimiento de sus valores a lo largo de los días, que son representados en el eje horizontal. Atendiendo a los ejes verticales, se representan dos simultáneamente para mayor claridad en la comparación: en color azul se grafica el índice Kp en cada uno de los 15 días donde se tomaron medidas, y en rojo el valor de la variable geomagnética frente a la que se compara.

De esta manera, y con tan sólo una inspección visual, es posible encontrar cierta correlación entre las variables. Sin embargo, en el presente estudio se cuenta con la gran limitación que supone tener un número de muestras para analizar muy bajo, lo que da gráficas con grandes saltos y muy poco continua, lo que dificulta enormemente encontrar resultados consistentes.

Además se calcula su correlación lineal para los datos obtenidos. En concreto, se muestra en cada gráfica el más común de los índices de correlación en este tipo de casos, el coeficiente de correlación de Pearson. Se trata de una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas, y se calcula como el cociente entre la covarianza, σ_{XY} , y el producto de las desviaciones típicas de ambas variables, σ_X y σ_Y , mostrado en la Ecuación (6.1).

$$\rho_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (6.1)$$

Su principal ventaja es que no depende de la escala de medida de las variables, lo que permite comparar la dependencia con distintos parámetros con distintas unidades fácilmente, sin necesidad de adimensionalizar o recurrir a métodos de cálculo adicionales. Sus valores posibles se encuentran entre 0 y ± 1 , siendo 0 el valor cuando no se encuentra ninguna correlación, 1 un indicador de que ambas variables tienen una total relación directa y -1 señal de que su correlación es total pero con relación inversa.

6.1.2 Gráficas

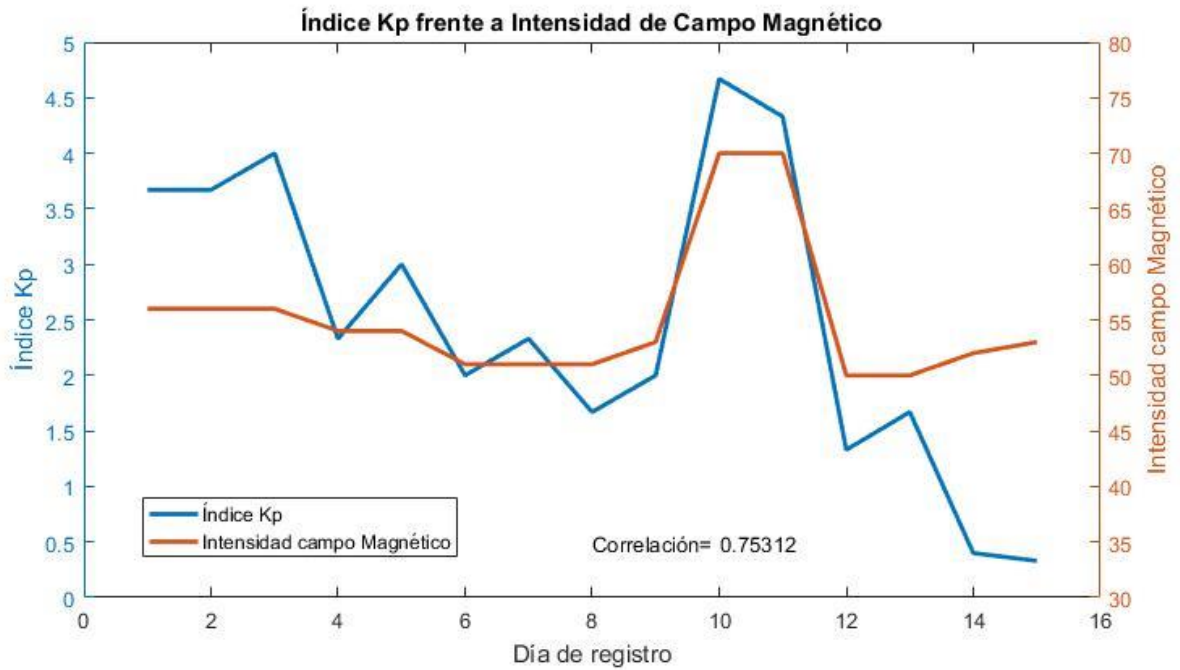


Imagen 6.1: Índice Kp frente a Intensidad de Campo Magnético

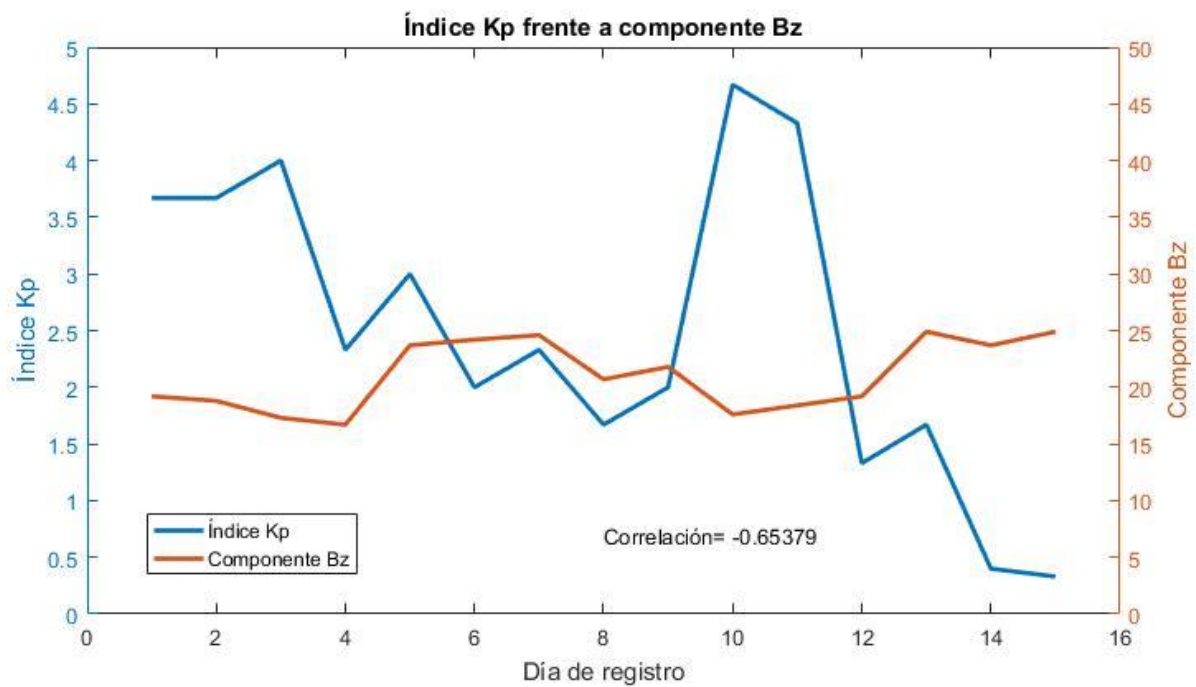


Imagen 6.2: Índice Kp frente a componente Bz de Campo Magnético

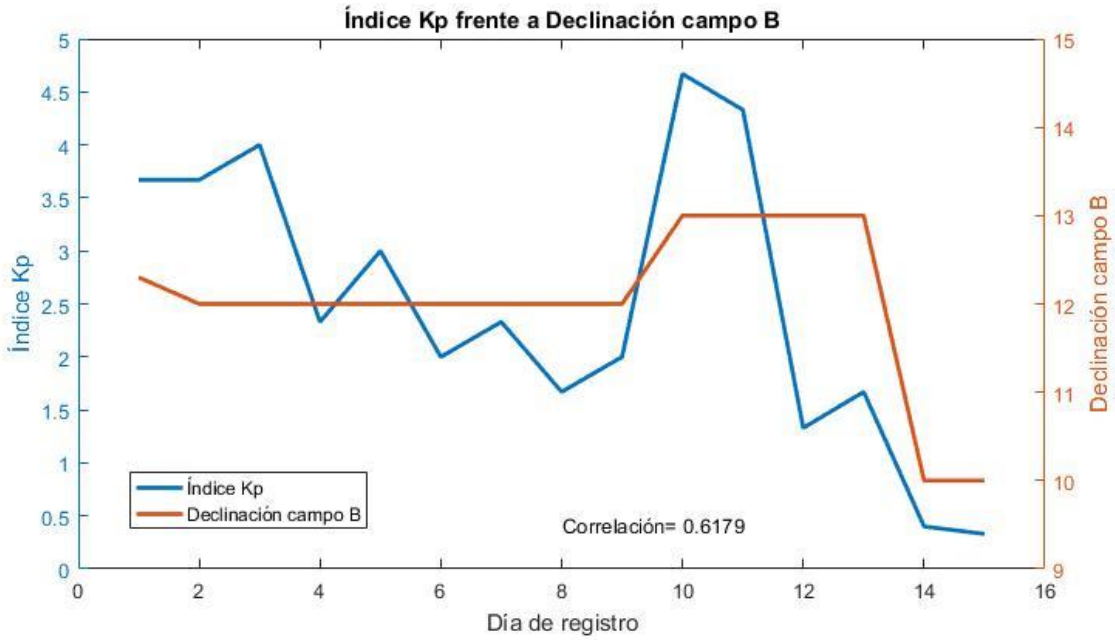


Imagen 6.3: Índice Kp frente a Declinación de Campo Magnético B

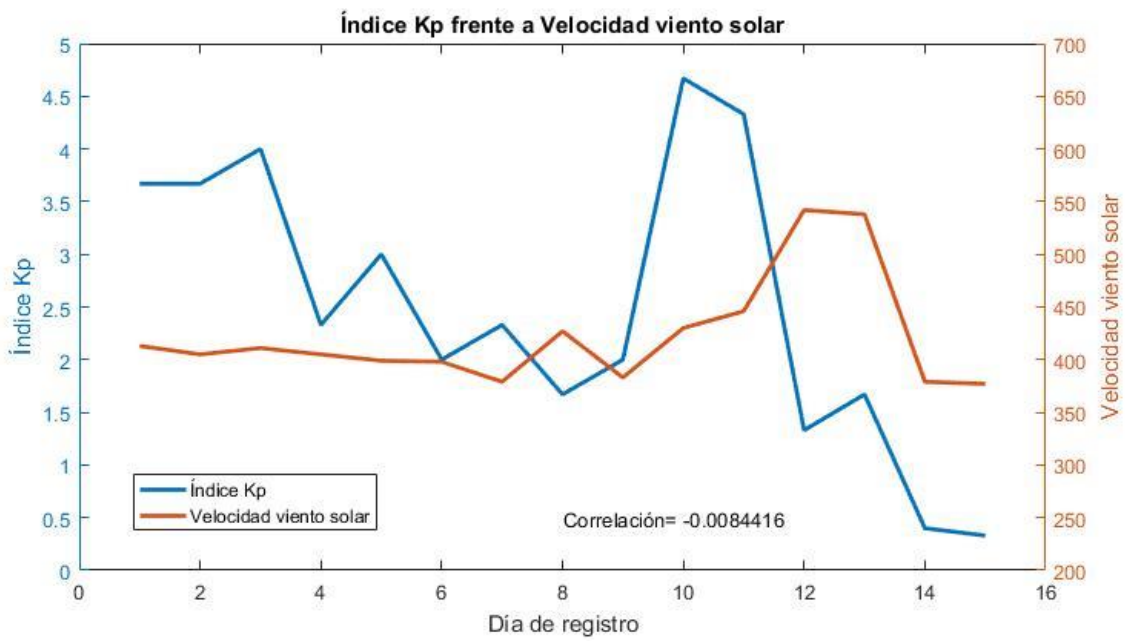


Imagen 6.4: Índice Kp frente a Velocidad del Viento Solar

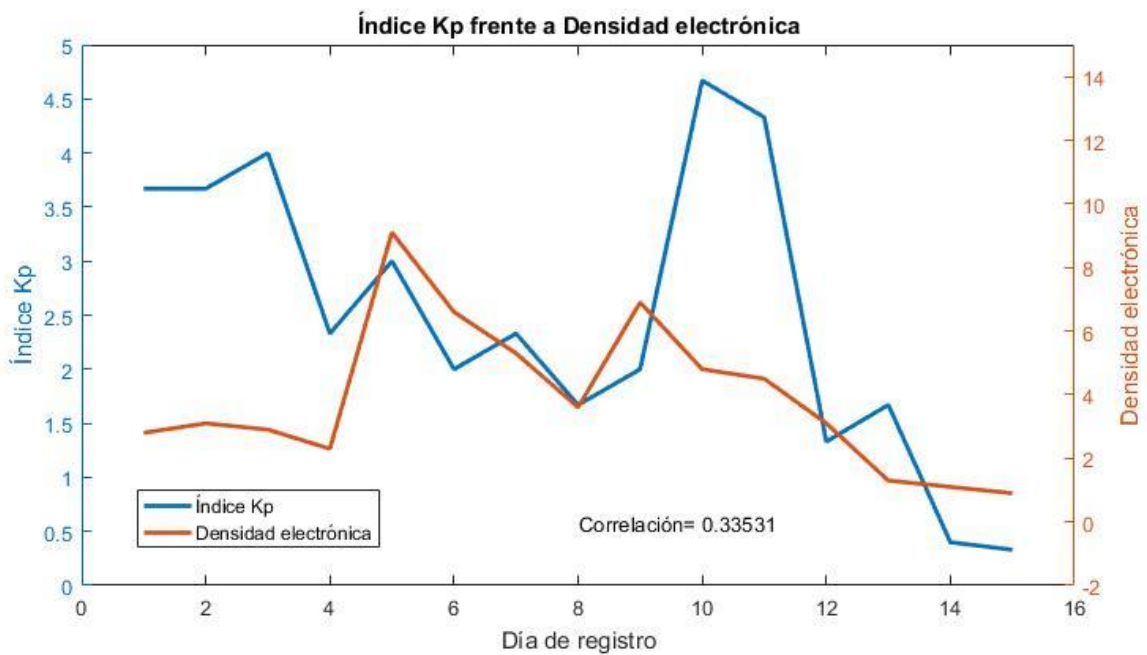


Imagen 6.5: Índice Kp frente a Densidad Electrónica

6.1.3 Análisis

De estas gráficas se puede extraer que **efectivamente se encuentra cierta correlación entre el índice Kp proporcionado por los servicios internacionales de supervisión de la ionosfera y algunos parámetros atmosféricos y geomagnéticos**. Si bien no se alcanzan coeficientes de correlación realmente altos -es decir, cercanos a 1-, es evidente que la capacidad para hallar una relación directa está limitada por el bajo número de muestras con el que se trabaja, y es de esperar que con mayores cantidades de registros estos índices, que rondan valores de entre 0.6 y 0.7, tendieran a valores más cercanos a 1.

Aún así, es **especialmente notoria la relación directa entre el índice Kp y la Intensidad del Campo Magnético sobre el entorno de la región donde se toman los registros**. Se recuerda que estas variaciones en el campo magnético son producto de las propiedades fluidodinámicas del núcleo de hierro terrestre, y son difícilmente predecibles. También se aprecia una relación directa con la Declinación del Campo Magnético con un coeficiente de 0.6, y una correlación de parecida magnitud pero de relación inversa con la componente vertical de este campo, esto es, la componente Bz.

Finalmente, se obtiene un coeficiente de correlación muy bajo con la Velocidad de Viento Solar, pero observando su gráfica se puede intuir que existe una dependencia pero desplazada en el tiempo, teniendo el viento solar que penetra en la atmósfera una velocidad mayor un tiempo después de que aumente el Índice Kp. Esto es algo que tendría sentido si consideramos que **el viento solar es acelerado por el campo magnético terrestre, de manera que al aumentar la intensidad de éste, las partículas cargadas del viento solar se ven aceleradas**. Pero dado que el aumento de velocidad es el resultado de la aceleración, es lógico que sea tiempo después de aumentar la intensidad del campo cuando se registre una mayor velocidad del viento solar, y no de manera inmediata.

6.2 Correlación cruzada de los parámetros geomagnéticos

6.2.1 Introducción

Como se acaba de deducir, visualmente se intuye que puede haber una correlación entre ciertos parámetros no coincidente en el tiempo. Por ello, para cuantificar esta relación desplazada temporalmente, se recurre a la correlación cruzada, que es una medida de la similitud entre dos señales función del tiempo relativo entre señales, de manera que permite identificar en qué momento se establece una mayor relación lineal. De este modo, es posible averiguar si dos variables tienen una relación directa en un momento distinto de su lectura, cuantificarla y determinar cuándo ocurre la máxima correlación. Su expresión matemática es como sigue:

$$\phi_{xy}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \tau)y(\tau)d\tau \quad (6.2)$$

Donde $x(t)$ e $y(t)$ son dos funciones dependientes del tiempo

A continuación, esta correlación cruzada se calcula para todas las variables registradas (por si hubiera otro parámetro que tuviese una relación desplazada en el tiempo menos evidente) frente al Índice Kp y se representa en gráficas. En ellas también se rotula cuál es el valor de la máxima correlación y cuándo ocurre. Este último dato sería fundamental para establecer una relación de causalidad entre ambas variables.

6.2.2 Gráficas

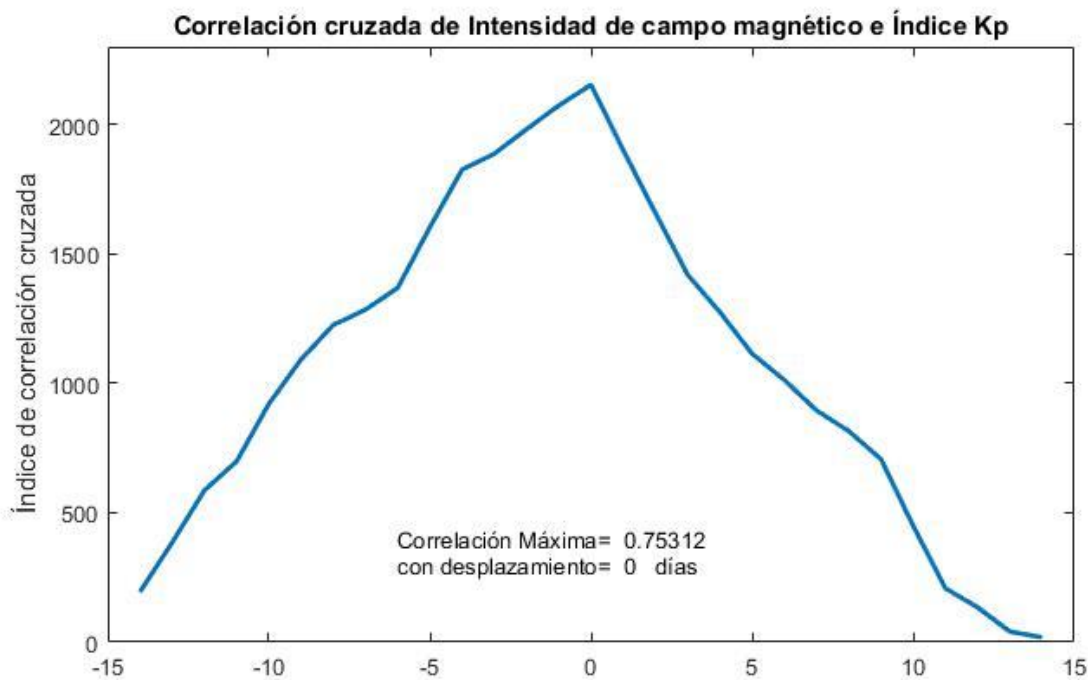


Imagen 6.6: Correlación cruzada de Índice Kp e Intensidad de Campo Magnético



Imagen 6.7: Correlación cruzada de Índice Kp y Componente Bz

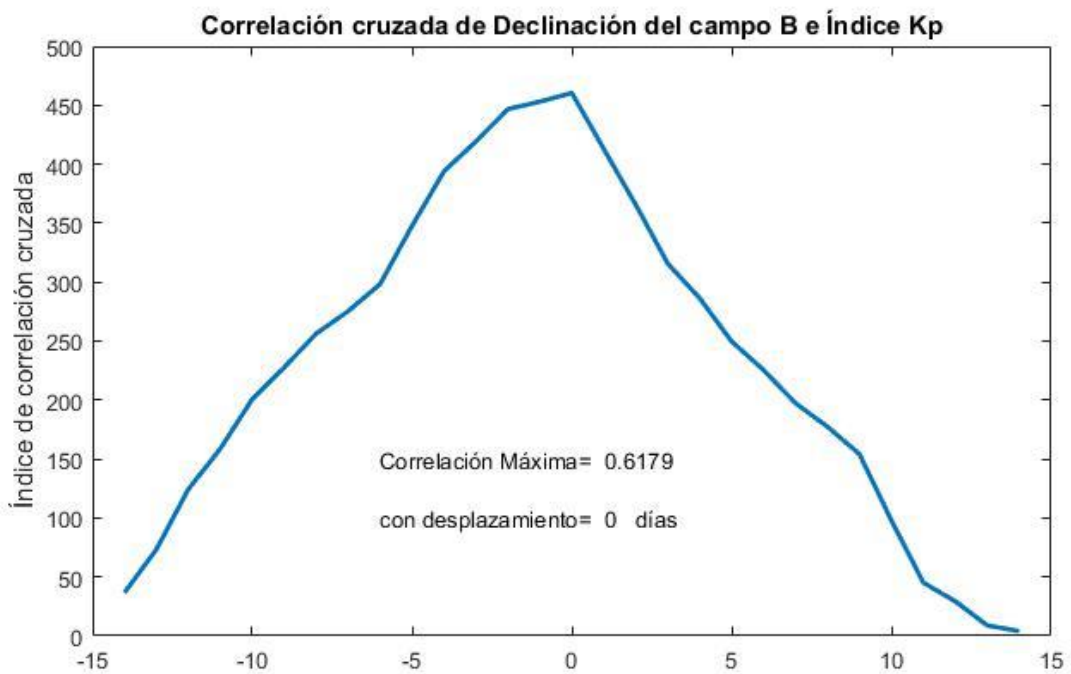


Imagen 6.8: Correlación cruzada de Índice Kp y Declinación de Campo Magnético

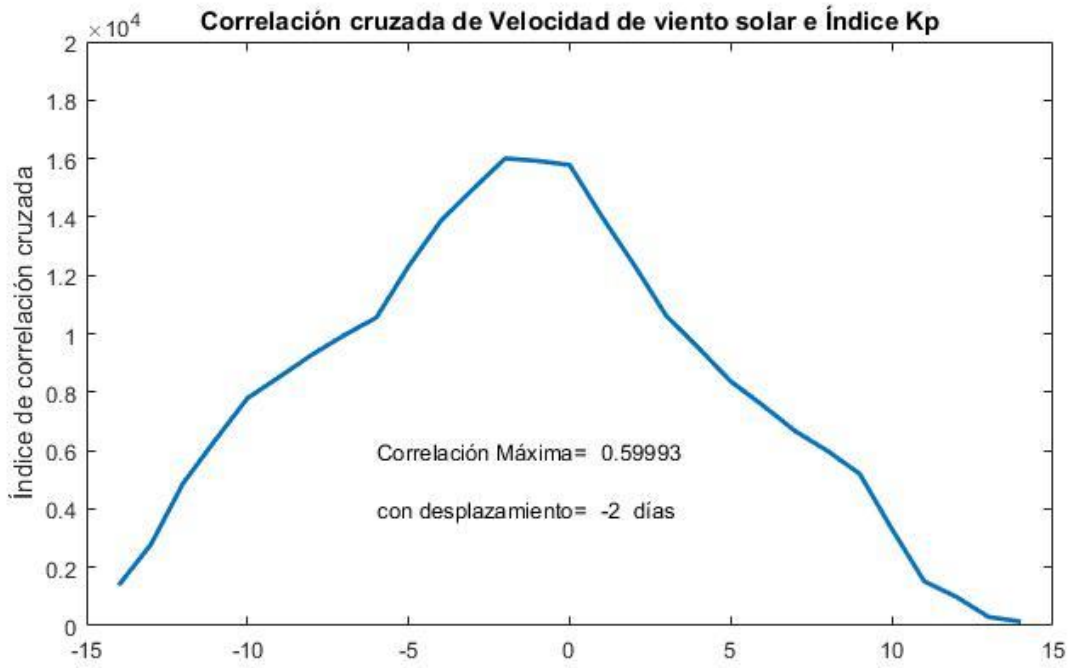


Imagen 6.9: Correlación cruzada de Índice Kp y Velocidad Viento Solar

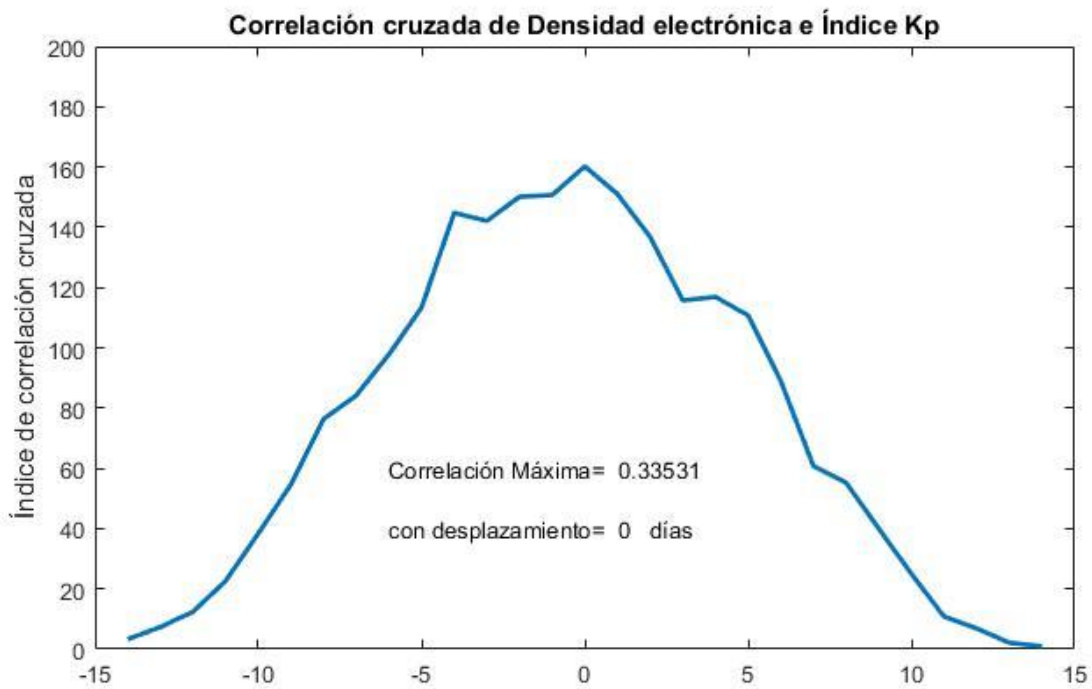


Imagen 6.10: Correlación cruzada de Índice Kp y Densidad Electrónica

6.2.3 Análisis

Como se introdujo, gracias al cálculo de la correlación cruzada **se demuestra que existe una mayor correlación entre la velocidad del viento solar y el índice Kp cuando se separan 2 días en el tiempo**. En concreto, también se observa una correlación ligeramente menor si se desplaza 1 día, lo que pone de evidencia que el viento solar tarda entre 1 y 2 días en llegar desde el lugar de la magnetosfera donde se calcula su velocidad hasta la atmósfera terrestre, donde manifiesta sus efectos como se explicó en el Capítulo 4.

También se encuentra una mayor correlación desplazada 2 días con la componente Bz del campo magnético terrestre, pero sólo en el sentido de una correlación más directa, con lo que no es un resultado relevante. En valor absoluto, es mayor la correlación de -0.65379 en los días coincidentes, lo que quiere decir que efectivamente esta magnitud tiene una correlación inversa patente con el Índice Kp.

Respecto a la correlación de los demás parámetros y el Índice Kp, no se encuentra una relación mayor desplazada en el tiempo. **En el caso de la relación entre Índice Kp y la Intensidad del campo magnético de la Tierra en ese momento**, dado su alto coeficiente de correlación de 0.75312 y la forma piramidal con un alto pico en su gráfica de correlación cruzada, **se puede concluir que efectivamente existe una relación de dependencia entre ambas variables**.

En el caso de la relación entre el Índice Kp y la Declinación del campo magnético terrestre, la conclusión es parecida a la anterior pero con resultados menos contundentes. El coeficiente de correlación extraído de 0.6179 es algo menor y la forma de la gráfica de correlación cruzada presenta un máximo menos claro, pero también es candidato a que, en un estudio con un mayor número de muestras, arroje una alta correlación directa.

En el resto de parámetros, el bajo índice de correlación parece indicar que no existe una dependencia en el valor del Índice Kp proporcionado por los organismos internacionales, con lo que en posteriores trabajos que analicen estas dependencias no sería interesante su estudio.

6.3 SNR frente al Índice Kp

6.3.1 Introducción

Finalmente, en esta sección se encuentra el objetivo final del presente trabajo. Aquí, se analizarán los valores de la relación señal a ruido de cada satélite registrado en el estudio y su relación con la actividad ionosférica sobre el observador, desde diferentes puntos de vista y siempre ateniéndose a los pocos datos con los que se cuenta.

Para ello, se vuelca cada una de las 136 lecturas completas de satélites en una base de datos, que se puede encontrar completa en el Anexo 8.1. Cada una de las lecturas consta de:

- Número de identificador del satélite, que es la cifra que identifica al satélite dentro de la constelación GPS.
- Azimut, es decir, posición angular sobre la bóveda celeste, medida respecto del norte geográfico, visto desde el punto del observador. Medido en grados sexagesimales, indicará en qué dirección se encontraba el satélite emisor.
- Elevación, esto es, el ángulo sobre el horizonte de la posición del satélite en la bóveda celeste, visto desde el receptor. Esta coordenada es de gran relevancia pues, como se vio en el Capítulo 2, cuanto mayor es la capa de atmósfera que atraviesa la señal, mayor es el retraso que sufre. Esto conlleva que cuando un satélite emisor se encuentra muy cerca del horizonte del receptor -es decir, la señal llega muy tangente a la curvatura de la Tierra-, su señal, que tiene que atravesar una distancia a través de la atmósfera mucho mayor, sea descartada para los cálculos a fin de no introducir errores por encima de los tolerables. Por convención, la Elevación por debajo de la cual se ignora la señal de un satélite es 15°. Por ello, a pesar de que el receptor GPS y sus programas registren estos satélites, se descartarán para los cálculos del estudio también.
- SNR, que será una medida de la distorsión que sufre la señal en su camino del satélite al receptor, siendo una señal con menos ruido cuanto mayor es el valor SNR.

Dado que las medidas de SNR de los satélites son muy dispares, es necesario abordar el análisis desde distintas combinaciones de éstos y con distintas variables estadísticas. Por ello, se analizarán frente al Índice Kp presente durante cada registro:

- Media global de los SNR de los satélites en cada registro.
- Los tres mayores valores de SNR de cada registro, para observar cambios en la mejor calidad recibida.
- Los tres menores valores de SNR, buscando la evolución de las señales con más ruido.
- El mayor valor SNR.
- El menor valor SNR.

Así mismo, se calculará la desviación típica de estos valores SNR en cada uno de los registros y se presentará también en un gráfico para su análisis.

6.3.2 Gráficas

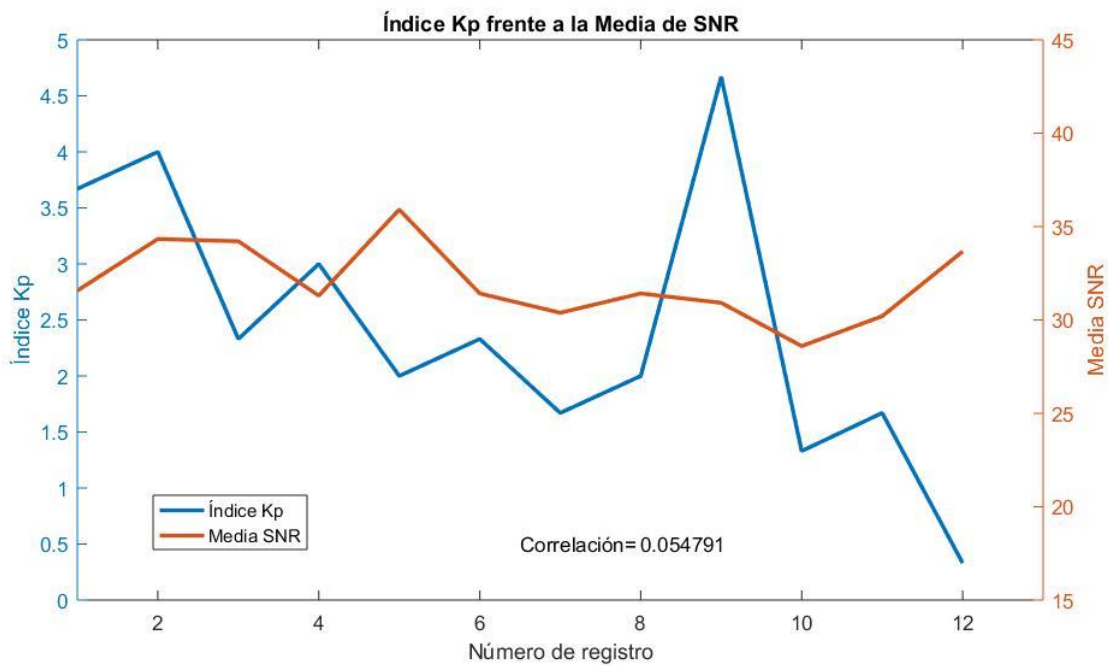


Imagen 6.12: Índice Kp frente a la media de los SNR registrados cada día

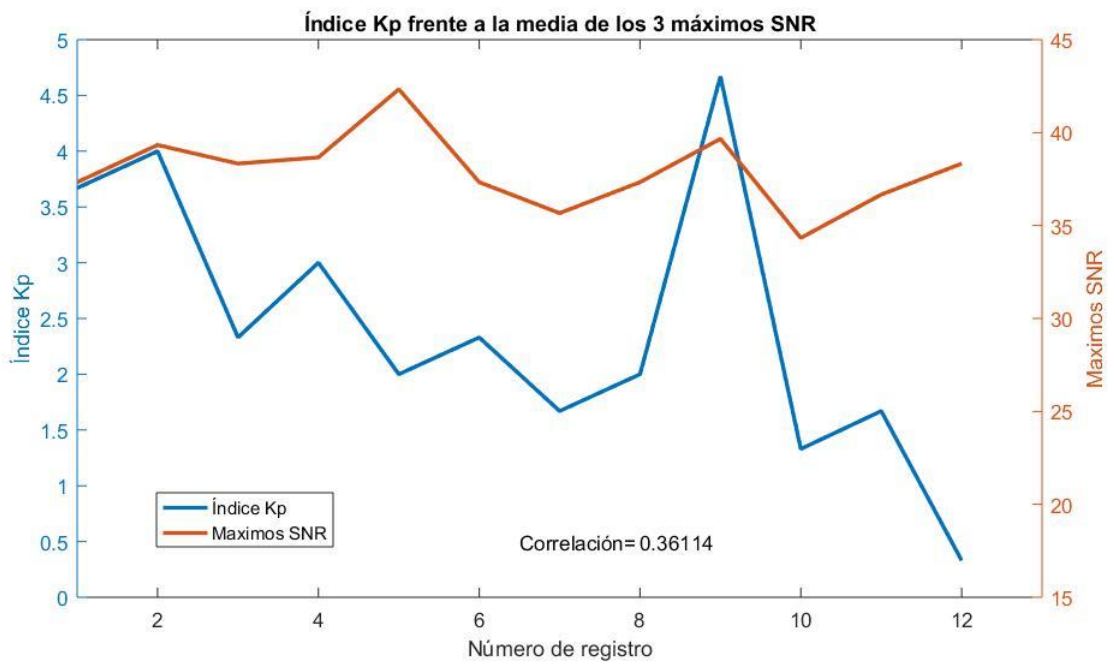


Imagen 6.11: Índice Kp frente a la media de 3 máximos SNR registrados cada día

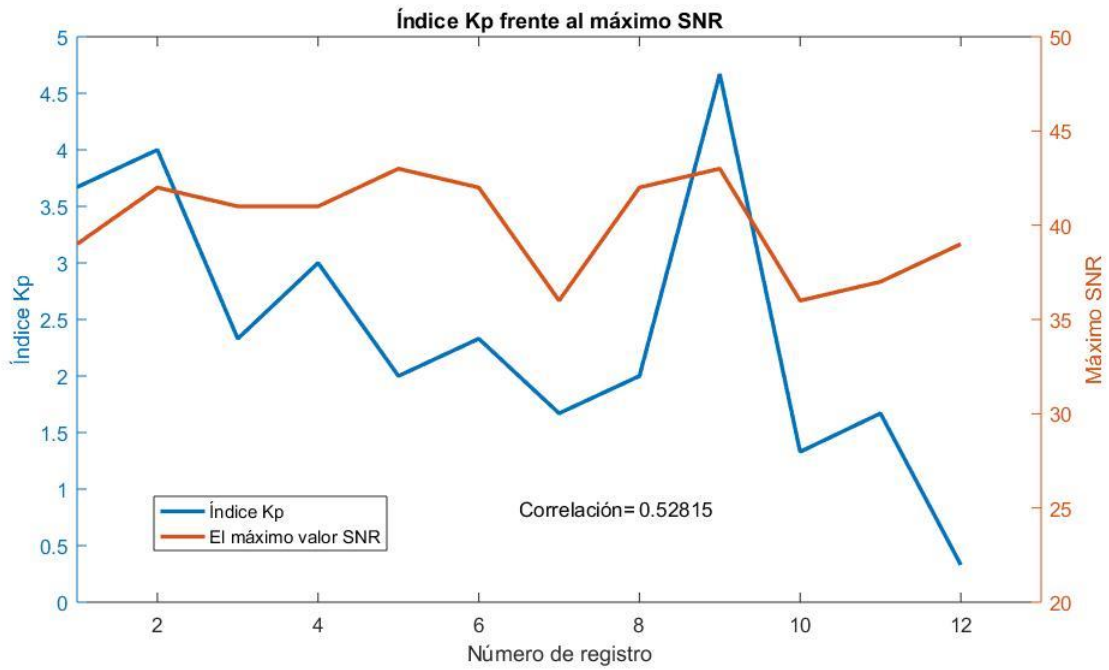


Imagen 6.13: Índice Kp frente al máximo SNR registrado cada día

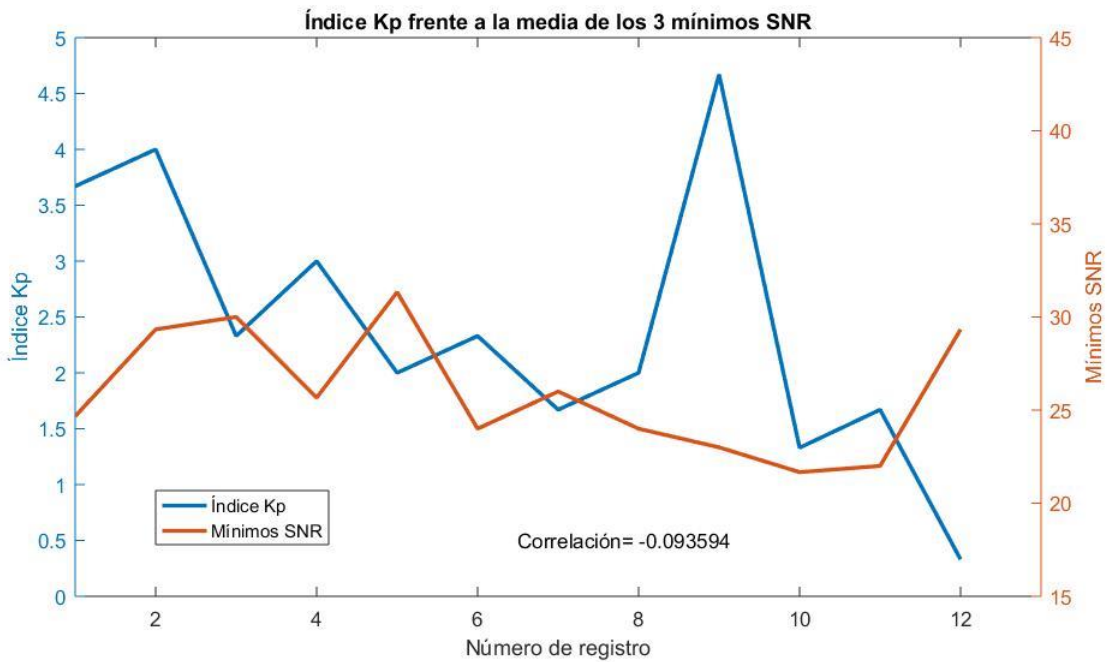


Imagen 6.14: Índice Kp frente a la media de los 3 mínimos SNR registrados cada día

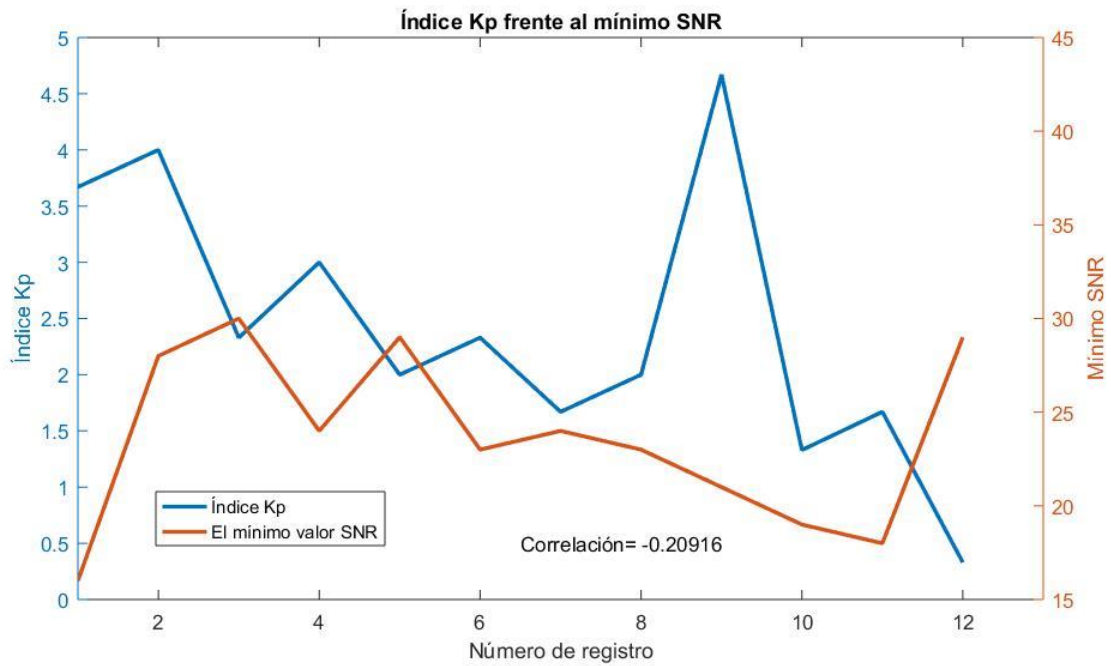


Imagen 6.15: Índice Kp frente al mínimo SNR registrado cada día

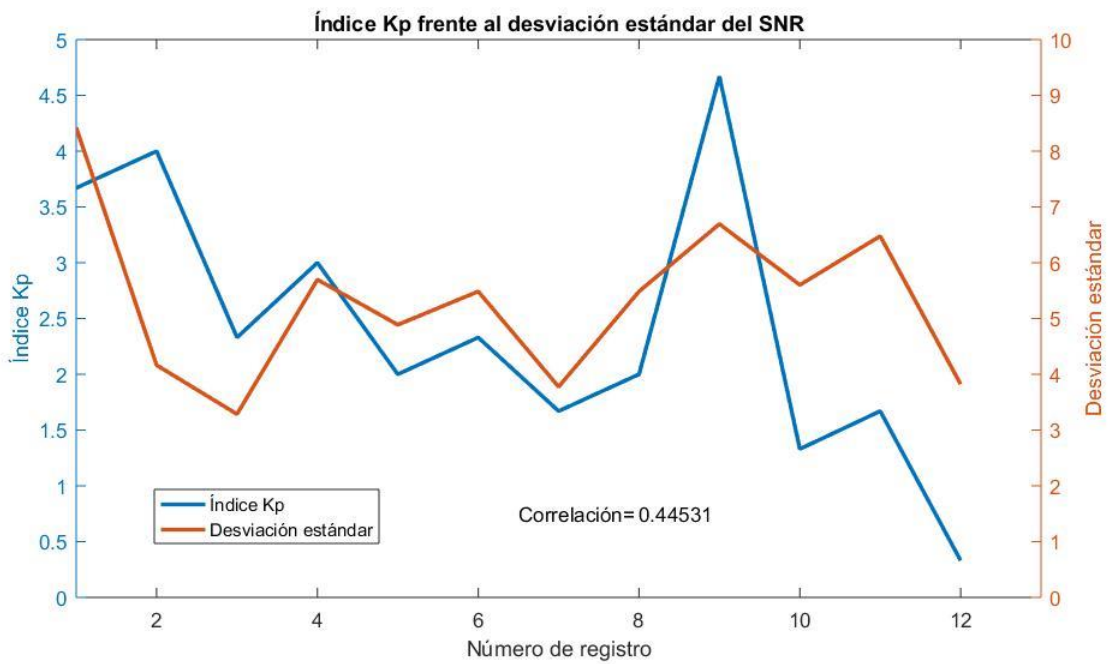


Imagen 6.16: Índice Kp frente a la desviación estándar del SNR

6.3.3 Análisis

A la vista de estos datos, el primer resultado contundente y más relevante se observa en la media total del ruido percibido por el receptor a lo largo de los días con Kp variante, donde un bajísimo coeficiente de correlación del orden de 0.05 indica que **no se encuentra ninguna correlación significativa en la media de los SNR de los distintos satélites**. Este resultado, a priori, se opondría al resultado esperado ante la hipótesis de que una mayor actividad ionosférica afectaría negativamente a la calidad de la señal recibida de los satélites.

Estudiando más particularmente la evolución de máximos y mínimos se pueden extraer más conclusiones. Observando la evolución de los tres máximos SNR percibidos en cada registro se tiene un coeficiente de correlación mayor, aunque no muy significativo, de 0.36114, y se observa un crecimiento en el máximo del Índice Kp, aunque como también se tienen otros máximos del mismo orden en diferentes registros, no es concluyente. De nuevo, más muestras serías necesarias para obtener un resultado más firme.

En el caso de los tres mínimos SNR, se tiene un coeficiente de correlación de Pearson de muy poca magnitud pero que llama la atención por ser de signo negativo. Y, de hecho, observando los crecimientos y decrecimientos de cada curva, llama la atención que tienen crecimientos de diferente signo en diez de los doce registros, y que cuando el Índice Kp alcanza altos valores, los tres mínimos SNR alcanza mínimos y viceversa. Esta observación resulta significativa a pesar del bajo valor de correlación de Pearson puesto que apoya la hipótesis inicial de que, cuanto mayor es actividad ionosférica, más ruido aparece en la señal recibida.

Estas apreciaciones se magnifican si estudiamos el valor máximo y el valor mínimos de SNR obtenido en cada registro. En este caso, los coeficientes son, respectivamente, de 0.52815 y -0.20916, mostrando una notable correlación directa en el máximo SNR con el Índice Kp -lo que iría en contra de la hipótesis tratada-, y repitiendo un resultado de correlación inversa la evolución del mínimo SNR, en cuya gráfica se vuelve a apreciar una evolución de crecimientos y decrecimientos inversos. Así mismo, se observa también que cuando el Índice Kp tiene altos valores, el mínimo SNR tiene sus mínimos y viceversa.

Este comportamiento de aumento de los máximos y descenso de los mínimos en correlación con el Índice Kp sugiere un estudio de la desviación estándar, que se puede observar en la Imagen 6.16. Ésta muestra un índice de correlación de Pearson es igual a 0.44531, que denota una no muy destacable relación directa. Sin embargo, **atendiendo a los crecimientos y decrecimientos de esta desviación estándar, sí se observa una patente correlación** pues éstos coinciden en once de las doce muestras, siendo la única no coincidente el primer registro.

La explicación de este bajo coeficiente no coincidente con la observación directa es que la correlación de Pearson mide la covariación como el grado de aproximación de los puntos a la recta que representa la correlación máxima, es decir, mide la correlación de tipo lineal y proporcional, pero los crecimientos y decrecimientos, aunque coincidentes en signo, no son proporcionales en ambas variables. Es de esperar que un método específico de cálculo de correlación que tomase en cuenta el signo de la evolución, como requiere un estudio con tan pocas muestras, arrojase un coeficiente de correlación mucho mayor.

Al igual que en el anterior apartado, a fin de descartar la posibilidad de que exista una correlación entre el Índice Kp y el SNR registrado que esté desplazada en el tiempo, se procede a calcular la correlación cruzada según lo explicado en la Sección 6.2.1. Ésta esclarecerá si es posible que el ruido percibido se vea afectado con cierto retraso respecto a la actividad ionosférica.

6.4 Correlación cruzada de Índice Kp y valores SNR

6.4.1 Gráficas

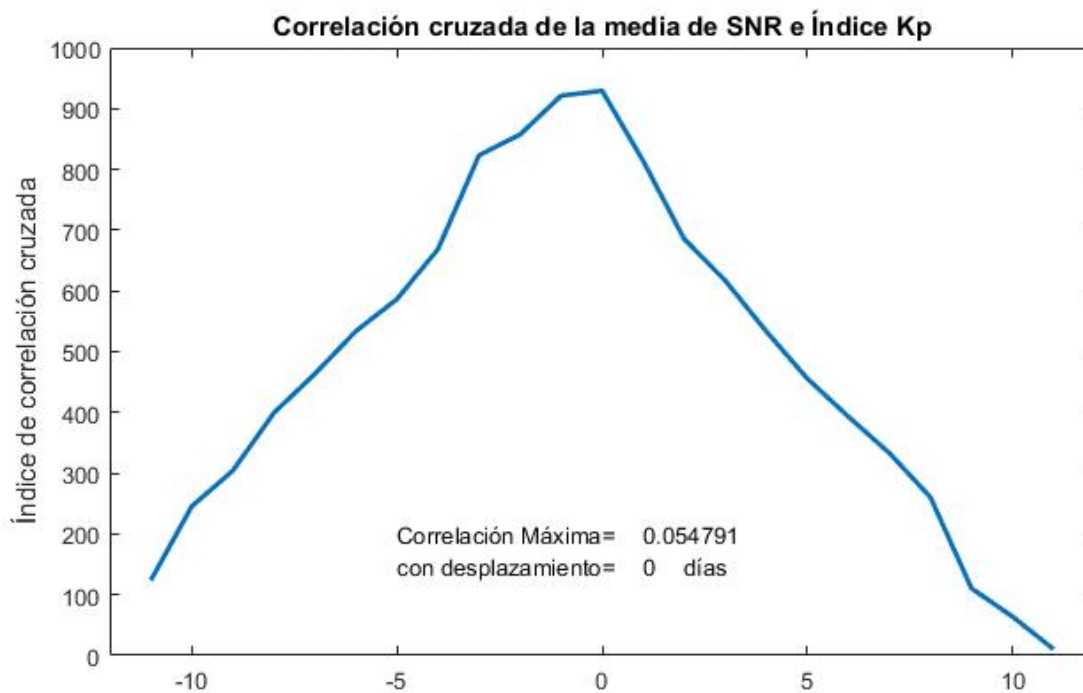


Imagen 6.18: Correlación cruzada de Índice Kp frente a la media SNR



Imagen 6.17: Correlación cruzada de Índice Kp frente a los 3 máximos SNR

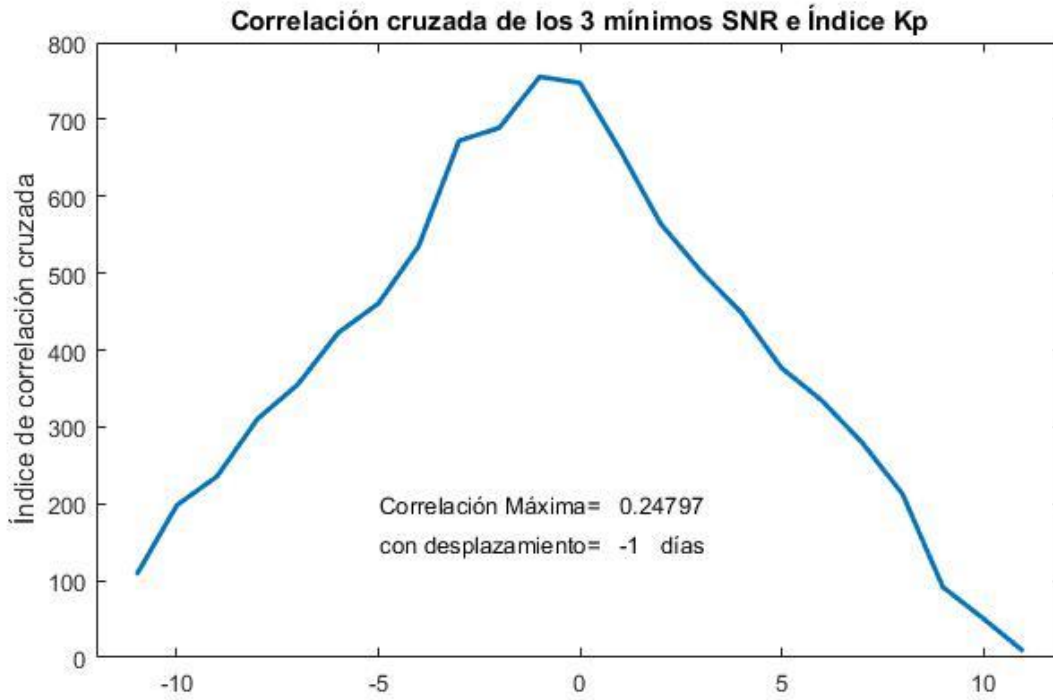


Imagen 6.19: Correlación cruzada de Índice Kp frente a los 3 mínimos SNR

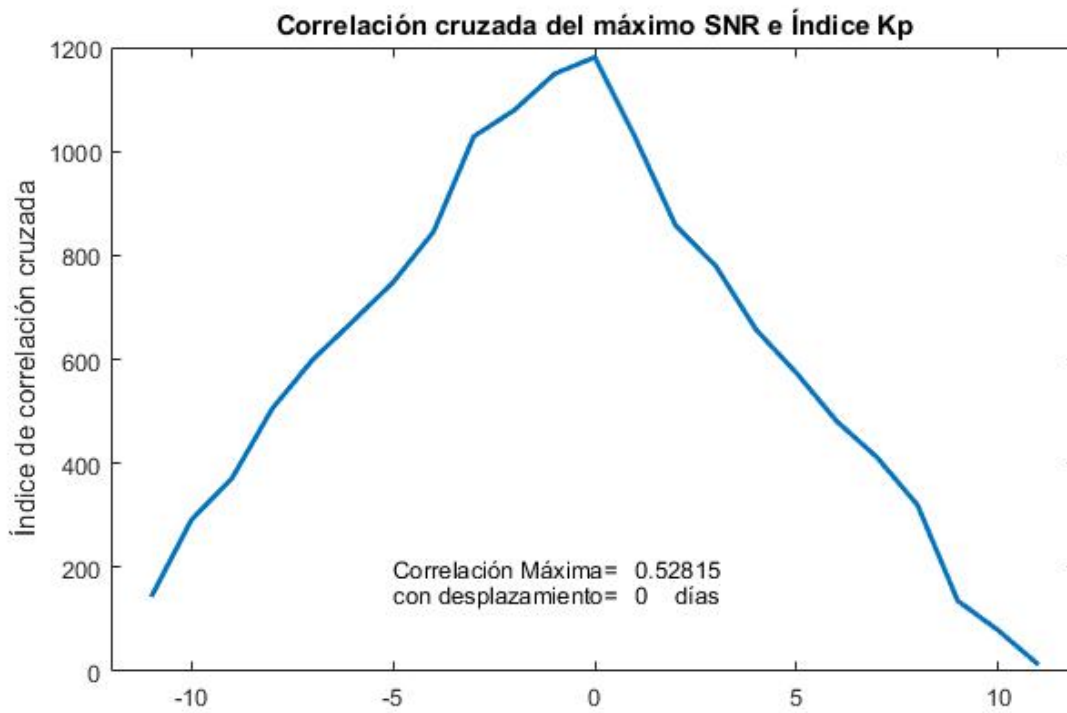


Imagen 6.20: Correlación cruzada de Índice Kp frente al máximo SNR

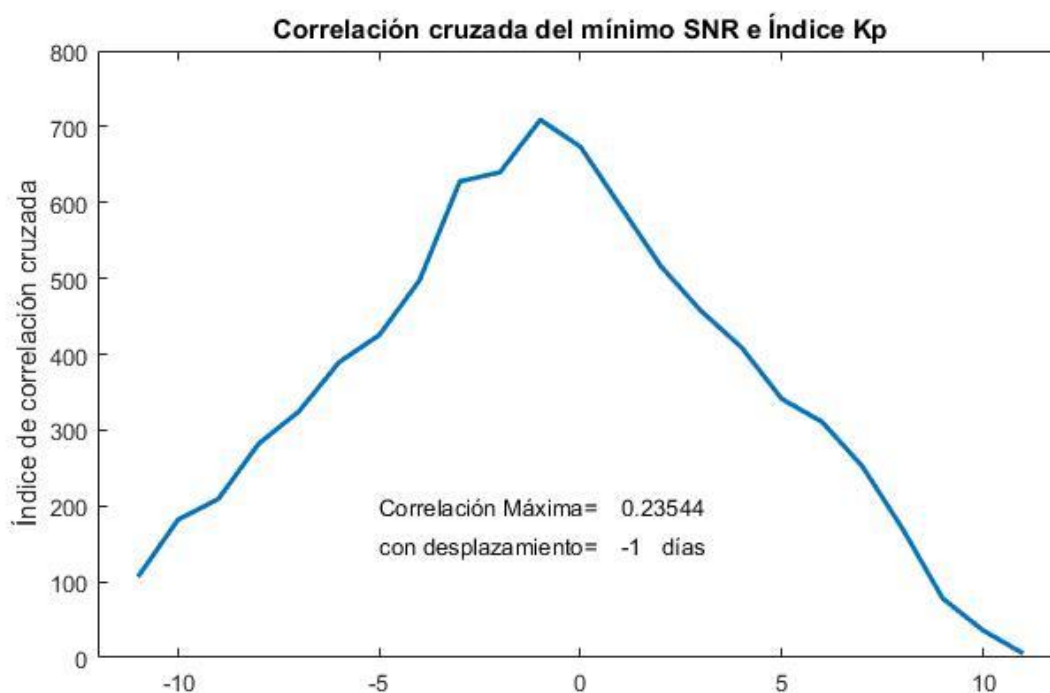


Imagen 6.21: Correlación cruzada de Índice Kp frente al mínimo SNR

6.4.2 Análisis

En este caso, el cálculo de la correlación cruzada no arroja conclusiones notables, algo que podía intuirse observando la evolución de las gráficas donde no se aprecia ninguna evolución llamativa desplazada en el tiempo entre ambas variables.

En el caso del cálculo de la evolución de los tres mínimos SNR y el mínimo SNR, el cálculo de la correlación cruzada aporta un valor mayor al desplazarse un día, pero este resultado no puede tomarse como significativo pues la correlación máxima que sugiere es muy pequeña y, dado el pequeño número de muestras que se tienen, este resultado podría ser consecuencia de simple aleatoriedad. Esto, sumado a que en el caso concreto de estas variables, el código numérico (que se puede consultar en el Anexo 8.2.5) descarta valores de registros para desplazar los vectores coincidentes, reduce aún más el número de muestras, aumentando la posibilidad de que una correlación tan baja como del orden de 0.2 sea simple coincidencia.

7 CONCLUSIONES



Imagen 7.1: Registro de datos satelitales durante el trabajo de campo en regiones árticas

Tras el análisis de los resultados obtenidos de los valores recopilados durante el trabajo de campo se obtienen una serie de conclusiones que, si bien no son las que se podían esperar con la hipótesis de partida, muestran conclusiones interesantes que pueden ser explotadas. Estas conclusiones, sin embargo, han de ser tomadas con la prudencia que un análisis inicial, carente de presupuesto y con escasos datos con los que trabajar, exige.

La primera evidencia experimental que puede aportar este estudio, aunque no sea su objetivo principal, es la relación de dependencia que exhibe el Índice Kp con ciertos parámetros ionosféricos y geomagnéticos. El resultado más notable en mostrar una correlación ha resultado la Intensidad del campo magnético, que a pesar del bajo número de muestras ha arrojado un coeficiente de correlación del orden de 0.75, mostrando además en las gráficas que en días con un gran aumento de este campo, el Índice Kp también sufre máximos.

También es posible observar una relación con otros parámetros geomagnéticos, como la correlación directa con la Declinación del campo magnético terrestre y una correlación inversa con la componente vertical de éste. Este resultado empírico es totalmente coherente con la teoría, pues el Índice Kp es una medida de las alteraciones de la componente horizontal del campo magnético. Ambos, con coeficientes de una magnitud del orden de 0.65, podrían ser también objeto de estudios más extensos que caractericen cómo la geometría y movimiento del campo magnético de la Tierra u otros planetas afecta a la señal EM recibida en su superficie.

Además se puede extraer un resultado interesante estudiando la evolución del Índice Kp con la Velocidad del viento solar incidente en la atmósfera, y es que éste sufre un máximo entre uno y dos días después de que lo haya sufrido el Índice Kp. Esto puede entenderse atendiendo a la relación que existe entre la Intensidad del campo magnético y la Velocidad del viento solar, y la correlación que ambos tienen con el Índice Kp. Con el cálculo de la correlación cruzada, se evidencia que el irrisorio coeficiente de correlación de Pearson de -0.008 mostrado en un primer momento aumenta notoriamente a 0.6 cuando se desplaza dos días en el tiempo.

Finalmente, las conclusiones principales del presente estudio, que trata de caracterizar la evolución de la calidad de la señal recibida de los GNSS en regiones polares bajo la presencia de auroras y que parte de la hipótesis de que, bajo fuertes fenómenos de aurora consecuencia de los fenómenos ionosféricos y geomagnéticos, la señal recibida se ve perjudicada, arroja resultados ligeramente diferentes a los esperados.

El primer resultado que contradiría la hipótesis inicial es la media de los SNR registrados bajo distintas condiciones de Índice Kp, que muestra una casi nula correlación. Siendo la media de esta relación de calidad de la señal independiente de la evolución del Índice Kp, podría entenderse como que no se ve alterada la calidad de la señal recibida.

Sin embargo, aunque la media de estos valores no se vea afectada, **sí se observa una variación significativa en sus máximos y mínimos.** La evolución de los tres máximos SNR registrados, con un coeficiente de correlación de 0.36, y más aún el máximo SNR, con un valor de 0.53, muestra una cierta correlación directa con el Índice Kp. Esto parece ir en contra de lo esperable.

Un comportamiento parecido pero de relación inversa se manifiesta al estudiar los mínimos SNR, que a favor de la hipótesis de que cuanto mayor es el Índice Kp, marcador de la actividad ionosférica, menor sea la señal a ruidio, arroja coeficientes de correlación negativos -aunque bajos-. Y esta relación inversa, aunque no manifestada cuantitativamente mediante la correlación de Pearson, se puede observar más intuitivamente observando sus gráficas, donde coinciden de manera significativa los máximos valores de Índice Kp con los menores SNR y viceversa.

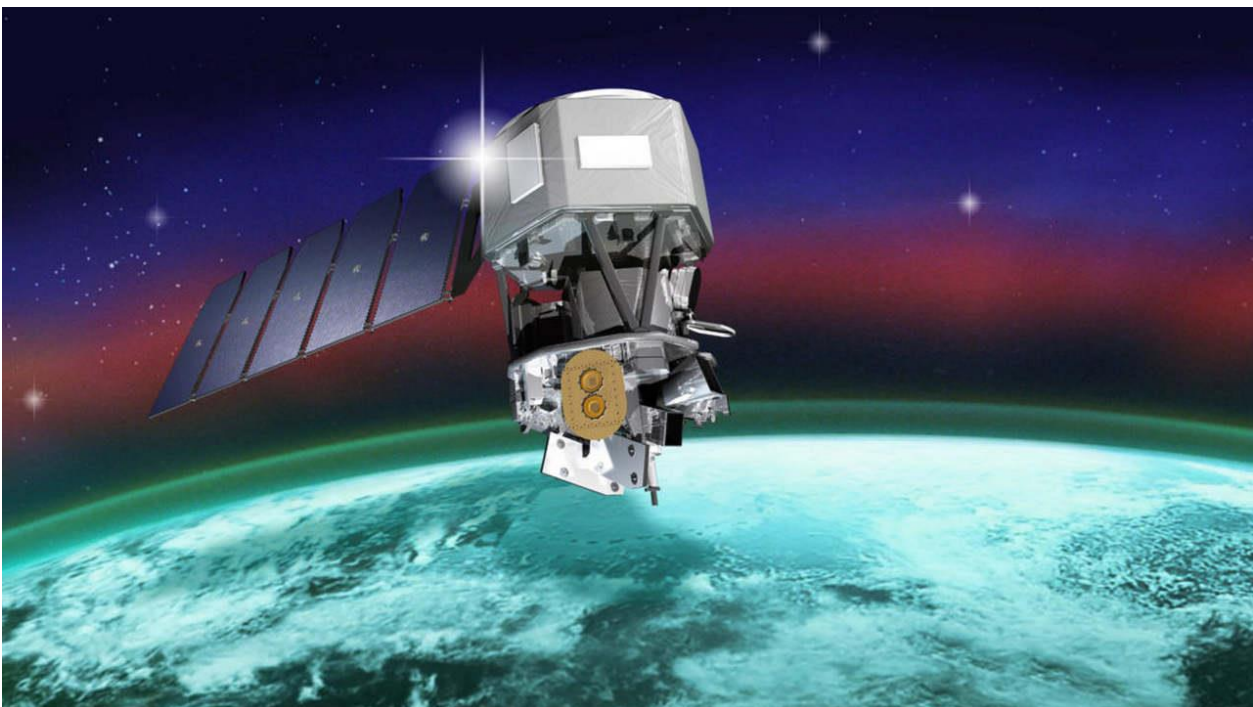


Imagen 7.2: Satélite ICON para el estudio de la ionosfera (22)

El hecho de que la media de los SNR no se vea significativamente alterada pero sí la distribución de sus máximos y mínimos motiva el estudio de un parámetro estadístico como es la desviación típica o estándar de estos valores. Esto puede arrojar luz sobre el comportamiento de la señal electromagnética bajo estas condiciones, un comportamiento que no sólo consistiría en disminuir el SNR de manera uniforme.

Efectivamente, al calcular las desviaciones estándar de los SNR obtenidos en cada registro, se observa una evolución claramente correlacionada entre esta variable estadística y el Índice Kp. Si bien no se ve correspondida cuantitativamente con un modesto coeficiente de correlación de Pearson de 0.44, cualitativamente se puede observar cómo los crecimientos y decrecimientos de ambos parámetros a lo largo de los días coinciden claramente.

Todo esto pondría de relieve que, si bien no todas las señales de los satélites se ven perjudicadas, al aumentar el Índice Kp y con ello la probabilidad de presencia de auroras en una región, la distribución de la calidad de las señales recibidas sí puede verse alterada. Una desviación estándar muy grande sí podría alterar el resultado de la posición medida si no se tiene en cuenta adecuadamente.

Esto es debido a que, si bien la media no se ve alterada, el hecho de que haya señales de muy buena calidad no compensa que haya señales de otros satélites que sí se vean muy dañadas. Tal y como se explicó en el Capítulo 4, para la correcta trilateración en 3D es necesaria la señal de posición precisa de al menos cuatro satélites, y aunque la señal de tres de ellos fuese muy correcta, si la señal de sólo uno de ellos se viese muy perjudicada, podría afectar al correcto geoposicionamiento.

Por último, es muy importante recordar que la contundencia de los todos los resultados del presente estudio se ven supeditados al limitado número de muestras tomadas en un tiempo tan corto. Por ello, **todas las interpretaciones aquí extraídas no pueden ni han de tomarse como concluyentes, siendo sólo una aproximación inicial a una forma de estudio de este importante fenómeno. Su intención es que sirva para marcar el camino a futuros estudios más exhaustivos y con mayor presupuesto,** que puedan tomar estos resultados como indicación de cómo han de acometer su investigación y atendiendo a qué parámetros, para que piedra a piedra, entre todas las personas trabajando para la Ciencia, se vaya avanzando en el conocimiento que tenemos del comportamiento de las señales electromagnéticas, nuestra atmósfera, las regiones polares, las auroras y todos los misterios que éstas aún ocultan.

8 ANEXOS

8.1 Parámetros de los satélites y valores SNR registrados

En esta sección se presentan los valores obtenidos de las lecturas del receptor GPS en cada uno de los registros efectuados. Se observa cómo, de los quince registros de mediciones de condiciones geomagnéticas, tres de ellas no se pudieron complementar con mediciones de parámetros satelitales. Esto fue debido a las limitaciones en el tiempo disponible para realizar las lecturas GPS y la necesidad de permanecer en un lugar fijo a cielo abierto durante todo el proceso, algo que no era necesario para tomar nota de las condiciones geomagnéticas, pues éstas eran provistas por los diferentes organismos internacionales de observación de la ionosfera.

Por ello, se tienen doce registros con los valores SNR recibidos de los satélites, cada uno de ellos con un número de lecturas variable en función del número de satélites con visibilidad directa en dicho momento, dando un total de 136 valores de Identificador de satélite, Azimut y Elevación de dichos satélites con respecto al receptor observador, y el valor de SNR de la señal recibida de cada uno.

	Identificador	SNR	Azimut	Elevación		Identificador	SNR	Azimut	Elevación
Registro 1	Sin registros de satélites				Registro 3	4	32	0	0
						7	34	319	16
						8	29	292	26
						10	34	180	30
						13	31	37	22
						15	37	80	24
						16	38	220	37
						20	37	56	28
						21	28	101	56
						26	38	199	16
						27	42	272	56
						30	32	348	14
Registro 2	4	39	0	0	Registro 4	1	35	274	16
	5	35	56	32		8	41	234	57
	16	34	296	40		10	34	108	64
	20	24	119	36		11	37	279	31
	21	39	199	50		14	31	142	21
	26	38	254	57		15	30	30	13
	29	35	109	47		18	36	71	35
	31	16	223	6		21	36	105	7
						22	34	220	19
						24	36	59	9
						27	30	184	41
						28	37	334	19
						32	32	149	20
						33	30	0	0

Registro 5	Identificador	SNR	Azimut	Elevación
	4	39	0	0
	5	29	67	34
	9	28	344	12
	16	32	300	31
	20	31	127	29
	23	27	316	3
	25	26	153	9
	26	41	271	54
	29	36	109	57
	31	24	227	15

Registro 6	Identificador	SNR	Azimut	Elevación
	4	40	0	0
	5	33	35	14
	7	34	343	16
	13	34	63	14
	16	43	255	54
	18	33	158	30
	20	29	81	45
	21	41	154	71
	26	33	210	41
	27	43	282	30
30	32	8	2	

Registro 7	Identificador	SNR	Azimut	Elevación
	1	35	277	30
	8	23	213	48
	10	26	85	54
	11	42	274	45
	14	33	133	34
	15	29	25	2
	22	35	222	33
	24	32	46	16
	27	23	180	26
	28	34	322	24
	32	34	142	34
	33	31	0	0

Registro 8	Identificador	SNR	Azimut	Elevación
	4	28	0	0
	7	36	338	17
	8	28	291	7
	13	28	57	17
	15	24	95	11
	16	31	244	52
	18	35	156	36
	20	26	73	41
	21	31	133	71
	26	33	206	36
	27	36	281	37
	29	29	118	12
30	30	4	6	

Registro 9	Identificador	SNR	Azimut	Elevación
	1	35	277	30
	8	23	213	48
	10	26	85	54
	11	42	274	45
	14	33	133	34
	15	29	25	2
	22	35	222	33
	24	32	46	16
	27	23	180	26
	28	34	322	24
	32	34	142	34
33	31	0	0	

Registro 10	Identificador	SNR	Azimut	Elevación
	7	30	319	23
	8	27	281	23
	10	21	167	17
	13	31	40	18
	15	34	78	13
	16	31	210	48
	18	43	135	40
	20	30	56	31
	21	27	99	58
	26	21	187	25
27	40	265	54	
30	36	348	14	

Registro 11	Identificador	SNR	Azimut	Elevación	
	Sin registros de satélites				

	Identificador	SNR	Azimut	Elevación
Registro 12	4	24	0	0
	5	30	26	10
	7	33	333	20
	13	30	53	12
	16	34	232	58
	18	22	144	28
	20	26	70	38
	21	19	126	65
	29	32	105	10
	30	36	357	6
Registro 13	1	37	260	46
	8	25	201	24
	10	23	88	40
	11	37	240	55
	14	33	123	42
	17	28	325	16
	22	33	215	44
	24	36	33	25
	27	32	180	5
	28	18	300	26
Registro 14				
	Registro 15	1	32	264
8		37	234	58
10		38	132	60
11		39	271	26
13		29	1	4
15		32	33	22
18		29	78	41
22		32	213	5
27		38	180	45
28		37	336	21
33		31	0	0
38		30	0	0

Tabla 8.1: Valores de Identificador, Azimut, Elevación y SNR de cada satélite registrado

8.2 Código de funciones utilizadas en Matlab

8.2.1 Cálculo de índice de refracción local de la troposfera

```
function [n, N]=refraccion(humedad, presion, temperatura)
H=humedad; %en tanto por ciento(%)
P=presion; %en hPa
t=temperatura; %en Celsius
T=t+263; %en Kelvin

a = 6.1121; b =18.678; c =257.14; d =234.5;

EFagua=1+10^(-4)*(7.2+P*(0.0320+5.9*10^(-6)*t^2 ));

es=EFagua*a*exp(((b-t/d)*t)/(t+c));

e=H*es/100;
%%%%%%%%%%

N=(77.6/T)*(P+4810*e/T); %correccion
n = 1 + N * 1e-6; %índice de refracción radioeléctrica de la atmósfera
```

8.2.2 Cálculo del índice de refracción equivalente para troposfera en vertical (para h=15 km)

```
function [nh, n_equiv]=refrac_altura(h)

h0=7.35; N0=315;
n = @(h)( 1 + N0*1e-6*exp (-h/h0));
nh=n(h); % n en el límite superior de la troposfera

Area=quadgk (n, 0, h); % area total encerrada por la evolución de n en todas las alturas
n_equiv=Area/h; % n equivalente de atravesar toda la troposfera en vertical
% n_mitad=(n(0)+n(h))/2
% dif=n_equiv/n_mitad

s=0:0.01:10;
plot(s, n_equiv.*ones(length(s)), 'r'); hold on;
plot(s, n(s)); shg % representación gráfica de los valores de n(h) y n equivalente
```

8.2.3 Creación de matrices de los registros de parámetros geomagnéticos y atmosféricos

```
function [Dias, Kp, Bz, Mag, Decli, Dens, Vel]=medidas_geomag
%Creación de los vectores con los valores de los parámetros geomagnéticos y
%atmosféricos en cada registro. Un total de 15 registros

Dias=(1:15);

Kp=[3.67 3.67 4 2.33 3 2 2.33 1.67 2 4.67 4.33 1.33 1.67 0.4 0.33];

Bz=[19.2 18.8 17.3 16.7 23.7 24.2 24.6 20.7 21.8 17.6 18.4 19.2 24.9 23.7 24.9];

Mag=[56 56 56 54 54 51 51 51 53 70 70 50 50 52 53];

Decli=[12.3 12 12 12 12 12 12 12 12 13 13 13 13 10 10];

Dens=[2.8 3.1 2.9 9.1 6.6 5.3 3.6 6.9 4.8 4.5 3.1 1.3 1.1 0.9];

Vel=[413 405 411 405 399 398 379 427 383 430 446 542 538 379 377];
```

- Creación de matrices de los registros de parámetros satelitales

```
function [id, SNR, Azimut, Elevacion, NumMedidas]=medidas_satelites
%Matrices con los valores obtenidos en los registros
%Cada fila de la matriz corresponde a un registro
%Cada columna corresponde a un satélite

id=[4 5 16 20 21 26 29 31 0 0 0 0 0
4 7 8 10 13 15 16 20 21 26 27 30 0 0
1 8 10 11 14 15 18 21 22 24 27 28 32 33
4 5 9 16 20 23 25 26 29 31 0 0 0 0
4 5 7 13 16 18 20 21 26 27 30 0 0 0
1 8 10 11 14 15 22 24 27 28 32 33 0 0
4 7 8 13 15 16 18 20 21 26 27 29 30 0
1 8 10 11 14 15 22 24 27 28 32 33 0 0
7 8 10 13 15 16 18 20 21 26 27 30 0 0
4 5 7 13 16 18 20 21 29 30 0 0 0 0
1 8 10 11 14 17 22 24 27 28 0 0 0 0
1 8 10 11 13 15 18 22 27 28 33 38 0 0];

SNR=[39 35 34 24 39 38 35 16 0 0 0 0 0 0
32 34 29 34 31 37 38 37 28 38 42 32 0 0
35 41 34 37 31 30 36 36 34 36 30 37 32 30
39 29 28 32 31 27 26 41 36 24 0 0 0 0
40 33 34 34 43 33 29 41 33 43 32 0 0 0
35 23 26 42 33 29 35 32 23 34 34 31 0 0
28 36 28 28 24 31 35 26 31 33 36 29 30 0
35 23 26 42 33 29 35 32 23 34 34 31 0 0
30 27 21 31 34 31 43 30 27 21 40 36 0 0
24 30 33 30 34 22 26 19 32 36 0 0 0 0
37 25 23 37 33 28 33 36 32 18 0 0 0 0
32 37 38 39 29 32 29 32 38 37 31 30 0 0];
```

```

Azimut=[0 56 296 119 199 254 109 223 0 0 0 0 0 0
0 319 292 180 37 80 220 56 101 199 272 348 0 0
274 234 108 279 142 30 71 105 220 59 184 334 149 0
0 67 344 300 127 316 153 271 109 227 0 0 0 0
0 35 343 63 255 158 81 154 210 282 8 0 0 0
277 213 85 274 133 25 222 46 180 322 142 0 0 0
0 338 291 57 95 244 156 73 133 206 281 118 4 0
277 213 85 274 133 25 222 46 180 322 142 0 0 0
319 281 167 40 78 210 135 56 99 187 265 348 0 0
0 26 333 53 232 144 70 126 105 357 0 0 0 0
260 201 88 240 123 325 215 33 180 300 0 0 0 0
264 234 132 271 1 33 78 213 180 336 0 0 0 0];

```

```

Elevacion=[0 32 40 36 50 57 47 6 0 0 0 0 0 0
0 16 26 30 22 24 37 28 56 16 56 14 0 0
16 57 64 31 21 13 35 7 19 9 41 19 20 0
0 34 12 31 29 3 9 54 57 15 0 0 0 0
0 14 16 14 54 30 45 71 41 30 2 0 0 0
30 48 54 45 34 2 33 16 26 24 34 0 0 0
0 17 7 17 11 52 36 41 71 36 37 12 6 0
30 48 54 45 34 2 33 16 26 24 34 0 0 0
23 23 17 18 13 48 40 31 58 25 54 14 0 0
0 10 20 12 58 28 38 65 10 6 0 0 0 0
46 24 40 55 42 16 44 25 5 26 0 0 0 0
10 58 60 26 4 22 41 5 45 21 0 0 0 0];

```

```

NumMedidas=numel(SNR)-numel(find(SNR==0));

```

8.2.4 Creación de gráficas de los parámetros geomagnéticos y cálculo de índice de correlación

%Muestra en gráficas los valores de los parámetros geomagnéticos y
 %atmosféricos cada día frente al parámetro Kp, indicador de la probabilidad
 %de auroras en la región.

```

[Dias, Kp, Bz, Mag, Decli, Dens, Vel]=medidas_geomag;

```

```

close all

```

```

%%

```

```

figure(1) %Mostramos índice Kp frente a Intensidad B
yyaxis left;
plot(Dias, Kp, 'DisplayName', 'Índice Kp', 'LineWidth', 2);
ylabel('Índice Kp');

```

```

yyaxis right;
plot(Dias, Mag, 'DisplayName', 'Intensidad campo Magnético', 'LineWidth', 2)
ylabel('Intensidad campo Magnético');

```

```

xlabel('Día de registro')
title('Índice Kp frente a Intensidad de Campo Magnético')
axis([0,16, 30, 80])

```

```

Correlacion=corrcoef([Kp Mag]);

```



```
text(8, 35, 'Correlación=')
text(10, 35, num2str(Correlacion(2)))
legend('Show');

%%
figure(2) %Mostramos índice Kp frente a componente Bz
yyaxis left;
plot(Dias, Kp, 'DisplayName', 'Índice Kp', 'LineWidth', 2);
ylabel('Índice Kp');

yyaxis right;
plot(Dias, Bz, 'DisplayName', 'Componente Bz', 'LineWidth', 2)
ylabel('Componente Bz');

xlabel('Día de registro')
title('Índice Kp frente a componente Bz')
axis([0,16, 0, 50])

Correlacion=corrcoef([Kp Bz]);
text(8, 7, 'Correlación=')
text(10, 7, num2str(Correlacion(2)))
legend('Show');

%%
figure(3) %Mostramos índice Kp frente a Declinación del campo
yyaxis left;
plot(Dias, Kp, 'DisplayName', 'Índice Kp', 'LineWidth', 2);
ylabel('Índice Kp');

yyaxis right;
plot(Dias, Decli, 'DisplayName', 'Declinación campo B', 'LineWidth', 2)
ylabel('Declinación campo B');

xlabel('Día de registro')
title('Índice Kp frente a Declinación campo B')
axis([0,16, 9, 15])

Correlacion=corrcoef([Kp Decli]);
text(8, 9.5, 'Correlación=')
text(10, 9.5, num2str(Correlacion(2)))
legend('Show');

%%
figure(4) %Mostramos índice Kp frente a Densidad electrónica atmósfera
yyaxis left;
plot(Dias, Kp, 'DisplayName', 'Índice Kp', 'LineWidth', 2);
ylabel('Índice Kp');

yyaxis right;
plot(Dias, Dens, 'DisplayName', 'Densidad electrónica', 'LineWidth', 2)
ylabel('Densidad electrónica');

xlabel('Día de registro')
title('Índice Kp frente a Densidad electrónica')
axis([0,16, -2, 15])
```

```

Correlacion=corrcoef([Kp Dens]);
text(8, 0, 'Correlación=')
text(10, 0, num2str(Correlacion(2)))
legend('Show');

%%
figure(5) %Mostramos índice Kp frente a Velocidad viento solar
yyaxis left;
plot(Dias, Kp, 'DisplayName', 'Índice Kp', 'LineWidth', 2);
ylabel('Índice Kp');

yyaxis right;
plot(Dias, Vel, 'DisplayName', 'Velocidad viento solar', 'LineWidth', 2)
ylabel('Velocidad viento solar');

xlabel('Día de registro')
title('Índice Kp frente a Velocidad viento solar')
axis([0,16, 200, 700])

Correlacion=corrcoef([Kp Vel]);
text(8, 250, 'Correlación=')
text(10, 250, num2str(Correlacion(2)))
legend('Show');

%%
%Correlación cruzada de Kp e Intensidad de campo magnético
figure (6)
C=xcorr(Kp, Mag);
vv=-14:14;

plot(vv, C, 'LineWidth', 2 ); axis([-15,15, 0, 2300])
ylabel('Índice de correlación cruzada');
title('Correlación cruzada de Intensidad de campo magnético e Índice Kp')

[~,p]=max(C); desplaz=vv(p);
Zdesplaz = Mag(-desplaz+1:end);
Kpdesplaz = Kp(1:end+desplaz);
CorrMax=corrcoef(Kpdesplaz, Zdesplaz);

text(-6, 400, 'Correlación Máxima=')
text(1, 400, num2str(CorrMax(1,2)))
text(-6, 300, 'con desplazamiento=')
text(1, 300, num2str(desplaz))
text(2, 300, 'días')

%%
%Correlación cruzada de Kp e Componente Bz
figure (7)
C=xcorr(Kp, Bz)
vv=-14:14;

hold on
plot(vv, C, 'LineWidth', 2 ); axis([-15,15, 0, 900]);
% plot(vv, Cneg)
ylabel('Índice de correlación cruzada');
title('Correlación cruzada de Componente Bz e Índice Kp')

```

```

[~,p]=max(C); desplaz=vv(p);
Zdesplaz = Bz(-desplaz+1:end);
Kpdesplaz = Kp(1:end+desplaz);
CorrMax=corrcoef(Kpdesplaz, Zdesplaz);

text(-6, 300, 'Correlación Máxima=')
text(1, 300, num2str(CorrMax(1,2)))
text(-6, 200, 'con desplazamiento=')
text(1, 200, num2str(desplaz))
text(2, 200, 'días')

%%
%Correlación cruzada de Kp y Declinación del campo B
figure (8)
C=xcorr(Kp, Decli);
vv=-14:14;

plot(vv, C, 'LineWidth', 2 ); axis([-15,15, 0, 500])
ylabel('Índice de correlación cruzada');
title('Correlación cruzada de Declinación del campo B e Índice Kp')

[~,p]=max(C); desplaz=vv(p);
Zdesplaz = Decli(-desplaz+1:end);
Kpdesplaz = Kp(1:end+desplaz);
CorrMax=corrcoef(Kpdesplaz, Zdesplaz);

text(-6, 150, 'Correlación Máxima=')
text(1, 150, num2str(CorrMax(1,2)))
text(-6, 100, 'con desplazamiento=')
text(1, 100, num2str(desplaz))
text(2, 100, 'días')

%%
%Correlación cruzada de Kp y Velocidad de viento solar
figure (9)
C=xcorr(Kp, Vel);
vv=-14:14;

plot(vv, C, 'LineWidth', 2 ); axis([-15,15, 0, 20000])
ylabel('Índice de correlación cruzada');
title('Correlación cruzada de Velocidad de viento solar e Índice Kp')

[~,p]=max(C); desplaz=vv(p);
Zdesplaz = Vel(-desplaz+1:end);
Kpdesplaz = Kp(1:end+desplaz);
CorrMax=corrcoef(Kpdesplaz, Zdesplaz);

text(-6, 6000, 'Correlación Máxima=')
text(1, 6000, num2str(CorrMax(1,2)))
text(-6, 4000, 'con desplazamiento=')
text(1, 4000, num2str(desplaz))
text(2, 4000, 'días')

%%
%Correlación cruzada de Kp y Densidad electrónica

```

```

figure (10)
C=xcorr(Kp, Dens);
vv=-14:14;

plot(vv, C, 'LineWidth', 2 ); axis([-15,15, 0, 200])
    ylabel('Índice de correlación cruzada');
    title('Correlación cruzada de Densidad electrónica e Índice Kp')

[~,p]=max(C); desplaz=vv(p);
Zdesplaz = Dens(-desplaz+1:end);
Kpdesplaz = Kp(1:end+desplaz);
CorrMax=corrcoef(Kpdesplaz, Zdesplaz);

    text(-6, 60, 'Correlación Máxima=')
    text(1, 60, num2str(CorrMax(1,2)))
    text(-6, 40, 'con desplazamiento=')
    text(1, 40, num2str(desplaz))
    text(2, 40, 'días')

%%
shg

```

8.2.5 Creación de gráficas de los parámetros satelitales y cálculo de índice de correlación

```

%%
%Esta función trabaja los valores SNR registrados y los presenta en distintas
%combinaciones en gráficas frente al índice Kp. También calcula y representa la
%correlación cruzada, para identificar si se presentara una correlación desplazada
%en el tiempo.

function [mediatotal, mediamaxis, mediaminis, maxSNR, minSNR, desviacion]=satelites

[id, SNR, Azimut, Elevacion]=medidas_satelites;

for k=1:12

    %Creamos vectores correspondientes a cada registro para trabajar sus
    %valores
    vSNR=SNR(k,:);
    vAzimut=Azimut(k:1);
    vElevacion=Elevacion(k:1);

    %Descartamos los satélites a menos de 15° sobre el horizonte
    vSNR(find(vSNR==0))=[];
    vAzimut(find(vElevacion<15))=[];
    vSNR(find(vElevacion<15))=[];

    %Maximo y mínima SNR entre todos los satélites
    maxSNR(k,1)=max(vSNR);
    minSNR(k,1)=min(vSNR);

    %Buscamos ahora los 3 mayores y menores valores de SNR de cada registro

```

```
ascendente=sort(vSNR); %ordena los SNR en orden ascendente y descendente
descendente=flip(sort(vSNR));
```

```
%tomamos los 3 mayores y menores SNR recibidos
```

```
tresmaxSNR(k, :)=descendente(1:3);
tresminSNR(k, :)=ascendente(1:3);
```

```
%Calculamos las medias de SNR entre todos los satélites y los 3 mayores y
%menores y lo metemos en un vector
```

```
mediatotal(k,1)=mean(vSNR);
mediamax(k,1)=mean(tresmaxSNR(k, :));
mediamin(k,1)=mean(tresminSNR(k, :));
```

```
%Calculamos las desviaciones estándar de los SNR de cada
%día y los introducimos en un vector
```

```
desviacion(k,1)=std(vSNR);
```

```
end
```

```
format short g
```

```
%%
```

```
close all
```

```
[Dias, Kp, Bz, Mag, Decli]=medidas_geomag;
```

```
%Eliminamos del registro de medidas geomagnéticas las correspondientes a
%los momentos en que no se pudieron tomar datos GPS correctamente
```

```
Kp(1)=[]; Kp(10)=[]; Kp(12)=[];
Dias=Dias(1:12);
```

```
%%
```

```
%Dibujo de Kp frente a media SNR
```

```
figure(1)
```

```
yyaxis left;
```

```
plot(Dias, Kp, 'DisplayName', 'Índice Kp', 'LineWidth', 2);
ylabel('Índice Kp');
```

```
yyaxis right;
```

```
plot(Dias, mediatotal, 'DisplayName', 'Media SNR', 'LineWidth', 2)
ylabel('Media SNR');
```

```
xlabel('Número de registro'); axis([1,13, 15, 45])
title('Índice Kp frente a la Media de SNR')
```

```
Correlacion=corrcoef([Kp mediatotal]);
```

```
text(6.5, 18, 'Correlación=')
```

```
text(8, 18, num2str(Correlacion(1,2)))
```

```
legend('show')
```

```
%%
```

```
%Dibujo de Kp frente a SNR mínimos
```

```
figure(2)
```

```
yyaxis left;
```

```
plot(Dias, Kp, 'DisplayName', 'Índice Kp', 'LineWidth', 2);
```

```

ylabel('Índice Kp');

yyaxis right;
plot(Dias, mediaminis, 'DisplayName', 'Mínimos SNR', 'LineWidth', 2)
ylabel('Mínimos SNR');

xlabel('Número de registro'); axis([1,13, 15, 45])
title('Índice Kp frente a la media de los 3 mínimos SNR')

Correlacion=corrcoef([Kp mediaminis]);
text(6.5, 18, 'Correlación=')
text(8, 18, num2str(Correlacion(1,2)))

legend('show');

%%
%Dibujo de Kp frente a SNR maximos
figure(3)
yyaxis left;
plot(Dias, Kp, 'DisplayName', 'Índice Kp', 'LineWidth', 2);
ylabel('Índice Kp');

yyaxis right;
plot(Dias, mediamaxis, 'DisplayName', 'Maximos SNR', 'LineWidth', 2)
ylabel('Maximos SNR');

xlabel('Número de registro'); axis([1,13, 15, 45])
title('Índice Kp frente a la media de los 3 máximos SNR')

Correlacion=corrcoef([Kp mediamaxis]);
text(6.5, 18, 'Correlación=')
text(8, 18, num2str(Correlacion(1,2)))

legend('show')

%%
%Dibujo de Kp frente al máximo SNR
figure(4)
yyaxis left;
plot(Dias, Kp, 'DisplayName', 'Índice Kp', 'LineWidth', 2);
ylabel('Índice Kp');

yyaxis right;
plot(Dias, maxSNR, 'DisplayName', 'El máximo valor SNR', 'LineWidth', 2)
ylabel('Máximo SNR');

xlabel('Número de registro'); axis([1,13, 20, 50])
title('Índice Kp frente al máximo SNR')

Correlacion=corrcoef([Kp maxSNR]);
text(6.5, 25, 'Correlación=')
text(8, 25, num2str(Correlacion(1,2)))

legend('show')

%%

```

```

%Dibujo de Kp frente al mínimo SNR
figure(5)
    yyaxis left;
    plot(Dias, Kp, 'DisplayName', 'Índice Kp', 'LineWidth', 2);
    ylabel('Índice Kp');

    yyaxis right;
    plot(Dias, minSNR, 'DisplayName', 'El mínimo valor SNR', 'LineWidth', 2)
    ylabel('Mínimo SNR');

    xlabel('Número de registro'); axis([1,13, 15, 45])
    title('Índice Kp frente al mínimo SNR')

Correlacion=corrcoef([Kp minSNR]);
text(6.5, 18, 'Correlación=')
text(8, 18, num2str(Correlacion(1,2)))

legend('show');

%%
%Gráfica y cálculo de las correlaciones cruzadas de los parámetros anteriores

%Correlación cruzada de Kp y el mínimo SNR
figure (6)
C=xcorr(Kp, minSNR);
vv=-11:11;

plot(vv, C, 'LineWidth', 2 ); axis([-12,12, 0, 800])
    ylabel('Índice de correlación cruzada');
    title('Correlación cruzada del mínimo SNR e Índice Kp')

[~,p]=max(C); desplaz=vv(p);
Zdesplaz = minSNR(-desplaz+1:end);
Kpdesplaz = Kp(1:end+desplaz);
CorrMax=corrcoef(Kpdesplaz, Zdesplaz);

text(-5, 200, 'Correlación Máxima=')
text(1, 200, num2str(CorrMax(1,2)))
text(-5, 150, 'con desplazamiento=')
text(1, 150, num2str(desplaz))
text(2, 150, 'días')

%%
%Correlación cruzada de Kp y el máximo SNR
figure (7)
C=xcorr(Kp, maxSNR);
vv=-11:11;

plot(vv, C, 'LineWidth', 2 ); axis([-12,12, 0, 1200])
    ylabel('Índice de correlación cruzada');
    title('Correlación cruzada del máximo SNR e Índice Kp')

[~,p]=max(C); desplaz=vv(p);
Zdesplaz = maxSNR(-desplaz+1:end);
Kpdesplaz = Kp(1:end+desplaz);
CorrMax=corrcoef(Kpdesplaz, Zdesplaz);

```

```

text(-5, 200, 'Correlación Máxima=')
text(1, 200, num2str(CorrMax(1,2)))
text(-5, 150, 'con desplazamiento=')
text(1, 150, num2str(desplaz))
text(2, 150, 'días')

%%
%Correlación cruzada de Kp y la media de los 3 máximos SNR
figure (8)
C=xcorr(Kp, mediamaxis);
vv=-11:11;

plot(vv, C, 'LineWidth', 2 ); axis([-12,12, 0, 1200])
ylabel('Índice de correlación cruzada');
title('Correlación cruzada de los 3 máximos SNR e Índice Kp')

[~,p]=max(C); desplaz=vv(p);
Zdesplaz = mediamaxis(-desplaz+1:end);
Kpdesplaz = Kp(1:end+desplaz);
CorrMax=corrcoef(Kpdesplaz, Zdesplaz);

text(-5, 200, 'Correlación Máxima=')
text(1, 200, num2str(CorrMax(1,2)))
text(-5, 150, 'con desplazamiento=')
text(1, 150, num2str(desplaz))
text(2, 150, 'días')

%%
%Correlación cruzada de Kp y la media de los 3 máximos SNR
figure (9)
C=xcorr(Kp, mediaminis);
vv=-11:11;
plot(vv, C, 'LineWidth', 2 ); axis([-12,12, 0, 800])
ylabel('Índice de correlación cruzada');
title('Correlación cruzada de los 3 mínimos SNR e Índice Kp')

[~,p]=max(C); desplaz=vv(p);
Zdesplaz = mediaminis(-desplaz+1:end);
Kpdesplaz = Kp(1:end+desplaz);
CorrMax=corrcoef(Kpdesplaz, Zdesplaz);

text(-5, 200, 'Correlación Máxima=')
text(1, 200, num2str(CorrMax(1,2)))
text(-5, 150, 'con desplazamiento=')
text(1, 150, num2str(desplaz))
text(2, 150, 'días')

%%
%Correlación cruzada de Kp y la media de los 3 máximos SNR
figure (10)
C=xcorr(Kp, mediatotal);
vv=-11:11;

plot(vv, C, 'LineWidth', 2 ); axis([-12,12, 0, 1000])
ylabel('Índice de correlación cruzada');
title('Correlación cruzada de la media de SNR e Índice Kp')

```



```

[~,p]=max(C); desplaz=vv(p);
Zdesplaz = mediatotal(-desplaz+1:end);
Kpdesplaz = Kp(1:end+desplaz);
CorrMax=corrcoef(Kpdesplaz, Zdesplaz);

text(-5, 200, 'Correlación Máxima=')
text(1, 200, num2str(CorrMax(1,2)))
text(-5, 150, 'con desplazamiento=')
text(1, 150, num2str(desplaz))
text(2, 150, 'días')

%%
%%Representamos la desviación estándar de los SNR frente al índice Kp de
%%cada registro

figure (11)

yyaxis left;
plot(Dias, Kp, 'DisplayName', 'Índice Kp', 'LineWidth', 2);
ylabel('Índice Kp');

yyaxis right;
plot(Dias, desviacion, 'DisplayName', 'Desviación estándar', 'LineWidth', 2)

ylabel('Desviación estándar');
xlabel('Número de registro'); axis([1,13, 0, 10])
title('Índice Kp frente al desviación estándar del SNR')

Correlacion=corrcoef([Kp desviacion]);
text(6.5, 1.5, 'Correlación=')
text(8, 1.5, num2str(Correlacion(1,2)))

legend('show');

%%
shg

end

```

8.3 Recomendación UIT-R P.453-13 de calculo de Índice de refracción radioeléctrica en troposfera

8.3.1 Cálculo de n local

El índice de refracción radioeléctrica de la atmósfera, n , se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$n = 1 + N \times 10^{-6} \quad (1)$$

donde la refracción radioeléctrica, N , es:

$$N = 77,6 \frac{P_d}{T} + 72 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (\text{unidades N}) \quad (2)$$

siendo el término seco, N_{seco} , de la refracción radioeléctrica:

$$N_{dry} = 77,6 \frac{P_d}{T} \quad (3)$$

y el término húmedo $N_{húmedo}$, de la refracción radioeléctrica:

$$N_{wet} = 72 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (4)$$

donde:

- P_d : presión atmosférica seca
- P : presión atmosférica total (hPa)
- e : presión del vapor de agua (hPa)
- T : temperatura absoluta (K)

y

$$P = P_d + e \quad (5)$$

dado que la ecuación $P_d = P - e$ (2) puede reformularse como:

$$N = 77,6 \frac{P}{T} - 5,6 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (6)$$

La ecuación (6) permitirá hacer una aproximación con menor precisión como:

$$N = \frac{77,6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (7)$$

La ecuación (7) expresa los valores de N dentro del 0,02 por ciento del valor obtenido a partir de la ecuación (2) para el rango de temperatura de -50°C a $+40^\circ\text{C}$. Para perfiles representativos de temperatura, presión y presión del vapor de agua, véase la Recomendación UIT-R P.835.

Para mayor facilidad, la relación entre la presión del vapor de agua, e , y la humedad relativa, H , se expresa por:

$$e = \frac{H \cdot e_s}{100} \quad (8)$$

con:

$$e_s = EF \cdot a \cdot \exp \left[\frac{(b-t) \cdot t}{t+c} \right] \quad (9)$$

y:

$$EF_{agua} = 1 + 10^{-4}[7,2 + P \cdot (0,0320 + 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot t^2)]$$

$$EF_{hielo} = 1 + 10^{-4}[2,2 + P \cdot (0,0383 + 6,4 \cdot 10^{-6} \cdot t^2)]$$

donde:

t : temperatura (°C)

P : presión atmosférica total (hPa)

H : humedad relativa (%)

e_s : presión de vapor de saturación (hPa) a la temperatura t (°C). Los coeficientes a , b , c y d son:

para agua

$$a = 6,1121$$

$$b = 18,678$$

$$c = 257,14$$

$$d = 234,5$$

(valores válidos entre -40° y $+50^\circ$)

para hielo

$$a = 6,1115$$

$$b = 23,036$$

$$c = 279,82$$

$$d = 333,7$$

(valores válidos entre -80° y 0°)

8.3.2 Cálculo de n con la altura

Se ha determinado que el valor medio a largo plazo del índice de refracción, n , depende de la altura, h , y se expresa adecuadamente mediante la ley exponencial siguiente:

$$n(h) = 1 + N_0 \times 10^{-6} \times \exp(-h/h_0) \quad (11)$$

donde:

N_0 : valor medio de la refractividad atmosférica considerada al nivel del mar

h_0 : altura de escala (km).

N_0 y h_0 pueden determinarse estadísticamente para distintos climas. A título de referencia, pueden tomarse los siguientes valores medios globalizantes de estas dos características:

$$N_0 = 315$$

$$h_0 = 7,35 \text{ km}$$

Estos valores numéricos se aplican únicamente para trayectos terrenales.

Estas características de referencia pueden utilizarse para calcular el valor de refractividad, N_s , en la superficie terrestre a partir de N_0 y según la siguiente fórmula:

$$N_s = N_0 \exp(-h_s/h_0) \quad (12)$$

donde:

h_s : altura de la superficie terrestre por encima del nivel del mar (km).

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

1. **GSA, European Global Navigation Satellite System Agency.** *GNSS Market Report*. Pague : s.n., 2017. ISSN 2443-5236.
2. **Camps, Adriano, y otros.** *Ionospheric Effects in GNSS-Reflectometry*. , s.l. : IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, Vol. 9, Issue 12, págs. 5851 - 5861. 10.1109/5.736342.
3. **Wikipedia, anónimo.** Satellite Navigation @Wikipedia. [Artículo en línea] 2019. https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation.
4. **Wikipedia, anónimo.** GPS @Wikipedia. [Artículo en línea] 2019. <https://es.wikipedia.org/wiki/GPS>.
5. **Misra, P. y Enge, P.** *Global Positioning System. Signals, measurements and performance*. Londres : Ganga-Jamuna Press, 2001. 0970954409.
6. **Gutzman, Britany .** Trilateración 3D. *Slideshare*. [En línea] 2010. <https://es.slideshare.net/gutzy6/what-is-gps>.
7. **Teunissen, P. y Kleusberg, A.** *GPS observation equations and positioning concepts*. . [ed.] GPS for Geodesy. Berlin : Springer, 1998. 978-3-642-72011-6.
8. **Alkan, R.** *GPS-single point positioning without selective availability*. Boston : U.S. Hydrographic Conference, 2001.
9. **Beran, T., Bisnath, S. y Langley, R** *Evaluation of High-Precision, Single Frequency GPS Point Positioning Models*. Long Beach, CA : Proceedings ION Meeting, 17th International Technical Meeting of The Institute of Navigation, 21-24 de September de 2004, págs. 1893-1901.
10. **Heroux, P. y Kouba, J.** *GPS Precise Point Positioning with a Difference*. Geodetic Survey Division, Geomatics Canada, Natural Resources Canada. Ottawa, Ontario : Geomatics '95, 1995. K1A 0E9.
11. **Misra, P., Burke, B. y Pratt, M.** *GPS Performance in Navigation*. 1, s.l. : Proceedings of the IEEE, 1999, Vol. 87, págs. 65-85.
12. **Moreira Cabeza, Carlos y Márquez Lepe, Alberto.** *EGNOS y la ionosfera. Trabajo de asignatura*. Sevilla : Escuela Superior de Ingeniería de Sevilla, 2011.

13. **Unión Internacional de Telecomunicaciones, Sector de Radiocomunicaciones.** Recomendación P.532-1. *Efectos Ionosféricos y explotaciones de consideración.* 1992. pág. 3.
14. **Hargreaves, J. K.** *The solar-terrestrial environment.* Cambridge : Cambridge University Press, 1992.
15. **Ratcliffe, J. A.** *An introduction to the ionosphere and magnetosphere.* , s.l. : American Journal of Physics, 1972, Vol. 42, Issue 5
16. **Mohino Harris, Elsa.** *Tesis doctoral. Análisis y migración del error ionosférico en los sistemas globales de navegación por satélite con los receptores de una frecuencia.* Madrid : Universidad Complutense de Madrid, 2006. 978-84-669-2788-8.
17. **Klobuchard, J. A.** *Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-frequency users.* , s.l. : IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, mayo de 1987, Vols. AES-23, Issue 3 págs. 325 - 331. 10.1109/TAES.1987.310829.
18. **Camargo, Po.** *Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores de uma frequência.* s.l. : Tesis Doctoral, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999. pág. 191.
19. **Martínez, Ramón y Calvo, Miguel.** *Comunicaciones por Satélite.* [En línea] 2009. <http://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/csat/material/CSAT09-2-OrbitasConstelaciones.pdf>.
20. **Gobierno de EEUU.** www.gps.gov. [Recurso en línea] <https://www.gps.gov>.
21. **NASA.** *NASA Website.* [Recurso en línea] www.nasa.gov.
23. **Brekke, Pal y Broms, Fredrik.** www.solarmax.no. [En línea] www.solarmax.no.
24. **Innovation Norway** www.visitnorway.es. [Infografía] <https://www.visitnorway.es/que-hacer-en-noruega/atractivos-naturales/auroras-boreales/infografia-como-se-forman-auroras-boreales/>.
25. **Bolaji, O.S. et al** *Ionospheric Time-delay over Akure Using Global Positioning System Observations..* s.l. : Acta Geophysica, 2015.
26. **Tomio Matsuoka, Marcelo, Oliveira Camargo, de, Paulo y Staciariini Batista, Inez.** *Análise da ionosfera usando dados de receptores GPS durante um período de alta atividade solar e comparação com dados de digissondas.* , s.l. : Revista Brasileira de Geofísica, 2009, Vol. 27, Issue 4, págs. 565-582. ISSN 0102-261X.
27. **Kai Borre, Dennis Akos, Peter Rinder, Nikolaj Bertelsen, Søren Holdt Jensen.** *A Software-Defined GPS and Galileo Receiver.* Boston : Birkhäuser Boston, 2007. 978-0-8176-4540-3.
28. **Dave Anderson, Tim Fuller-Rowell.** *Ionosphere Profile NOAA.* NOAA, s.l. : 1999.
29. **Muñoz, Jose Luis.** *La Estación Espacial Internacional y la temperatura de la Ionosfera. Agrupación Astronómica Jerezana Magallanes.* [Artículo en línea] 2012. <https://agrupacionastronomicamagallanes.wordpress.com/2012/04/27/la-estacion-espacial-internacional-y-la-temperatura-de-la-ionosfera/>.

30. **Hunsucker, R. D., Hargreaves, J. K. y Dessler, Alexander J. .** *The High-Latitude Ionosphere and its Effects on Radio Propagation*. s.l. : Cambridge University Press, 2002. 9780521041362.
31. **Saakian, Artem.** *Radio wave propagation fundamentals*. s.l. : Artech House, 2017. 978-1-60807-137-1.
32. **JPL, Jet Propulsion Laboratory.** Global Ionosphere Maps. [Recurso en línea] <https://iono.jpl.nasa.gov/gim.html>.
33. **Evans, J. V. y Hagfors, T.** *Radar Astronomy*. , s.l. : McGraw-Hill Education, mayo de 1968, Science, Vol. 160, issue 3831 , págs. 980-981. 160.3831.980.
34. **NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration.** NWS Training Division. [En línea] <https://training.weather.gov/nwstc/spacewx/wmo/lesson2/solarcycle.html>.
35. **Kaase, Aaron.** *Earth's Magnetosphere*. NASA, s.l. : 2011.