

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ciencias



TESIS

Estudio de las capas E esporádicas tipo
Blanketing sobre el Radio Observatorio de
Jicamarca

Para obtener el título profesional
de Licenciado en Física

Elaborado por:

José Manuel Suclupe Osorio

Asesor:

PhD. Edgardo Enrique Pacheco Josán

Lima - Perú
2019

Estudio de las capas E esporádicas tipo Blanketing sobre el Radio Observatorio de Jicamarca

José Manuel Suclupe Osorio

Propuesto para obtener el título de Licenciado en Física

Resumen

Las capas E esporádicas (Es) son regiones de incremento de la densidad de electrones observadas entre 90 y 130 km de altura y constituidas de iones metálicos de origen meteórico, tienen diferentes mecanismos de formación de acuerdo a la latitud donde se presentan. Las capas Es son de tipo blanketing (Esb) cuando pueden bloquear parcial o totalmente las ondas de radio en las frecuencias transmitidas por las ionosondas para el sondeo de la ionósfera superior (entre 1.0 MHz y 14.0 MHz). Estas capas suelen aparecer durante 15 – 45 minutos y sus mecanismos físicos de formación en regiones cercanas al ecuador magnético aún siguen siendo objeto de estudio. Las capas Esb pueden influir en las comunicaciones vía señales de alta frecuencia o HF (High Frequency).

Uno de los principales retos para el estudio estadístico de las capas E esporádicas tipo blanketing (Esb) en estaciones ecuatoriales es la forma de identificarlos. Anteriormente estos han sido identificados únicamente de forma visual a partir de los ionogramas, probablemente porque el software disponible de escalado automático no consigue identificar adecuadamente los eventos

de Esb. En esta tesis se ha utilizado técnicas de procesamiento de imágenes y algoritmos de machine learning para la identificación automática de los eventos Esb, consiguiendo un 89% de sensibilidad y un F1 - score de 80%.

En esta tesis se ha desarrollado el primer estudio estadístico de la ocurrencia de las capas Esb sobre el Radio Observatorio de Jicamarca usando ionogramas de la Digital Portable Sounder (DPS) – 4 registrados entre 2001 y 2018. Se ha encontrado que estas capas Esb ocurren principalmente en los meses del solsticio de Diciembre sobre todo en años de mínima actividad solar. Además presentan mayor ocurrencia en años de mínima actividad solar respecto a años de máxima actividad solar. Estas capas ocurren principalmente entre las 0700 y las 2000 horas LT con un pico principal alrededor de las 1600 LT y un segundo pico alrededor de las 0800-0900 LT. Se ha propuesto un nuevo criterio para identificar las capas Esb teniendo en cuenta la tendencia normal de la frecuencia mínima de la capa F de la ionósfera debido principalmente a la absorción de la región D (región entre 50 y 80 km de altura). Además se ha realizado comparaciones de eventos Esb registrados por la digisonda DPS-4 y por la ionosonda VIPIR. Adicionalmente se ha obtenido el ΔH entre los magnetómetros de Jicamarca y Piura para medir la intensidad del electrochorro ecuatorial y contra electrochorro ecuatorial y su comportamiento en los tiempos donde ocurren capas Esb. Finalmente discutimos las posibles condiciones que favorecen la formación de las capas Esb.

A mi madre María...

Agradecimientos

Agradezco al Instituto Geofísico del Perú por darme las facilidades para realizar esta tesis, a todo el personal del Radio Observatorio de Jicamarca por la ayuda brindada en todo este tiempo. A mi asesor el Dr. Edgardo Pacheco por las constantes sugerencias, al Msc. Percy Córdor, al ingeniero Fernando Villanueva, al Msc. Luis Condori y al Dr. Marco Milla por sus acertados comentarios.

Índice general

Resumen	I
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
1. Introducción	2
1.1. Marco teórico	4
1.1.1. Electrochorro ecuatorial	4
1.1.2. El ciclo solar, las manchas solares y el índice F10.7	10
1.1.3. Días calmados y disturbados	12
1.2. Planteamiento del problema	14
1.2.1. Descripción y análisis del tema	14
1.2.2. Problema	18
1.3. Objetivos y alcance de la investigación	18
1.3.1. Objetivos	18
1.3.2. Alcance	19
1.4. Importancia y justificación de la investigación	19
2. Desarrollo del software de identificación automática de capas E esporádicas Blanketing	21
2.1. Generación y obtención de los datos	21
2.1.1. Ionosonda	21
2.1.2. Digisonde Portable Sounder - 4 (DPS-4)	22
2.1.3. Ionosonda VIPIR	24
2.1.4. Ionogramas	24
2.1.5. Parámetros de interés de las capas E esporádicas Blanketing: h'Es, fbEs y foEs	26
2.2. Elección de métodos y algoritmos de procesamiento	31
2.3. Métodos y algoritmos	33
2.3.1. Fuzzy C Means	35

2.3.2.	Análisis de Componentes Principales	39
2.3.3.	Bosques aleatorios	40
2.3.4.	Implementación de rutina para eliminar múltiplos de las capas <i>Es</i> (<i>nEs</i>) y el primer múltiplo de la capa F (1F)	46
2.3.5.	Caracterización de la región F	57
2.3.6.	Modelo de rotores	71
2.4.	Evaluación y eficiencia del software	87
3.	Estadística de la ocurrencia de las capas E esporádicas Blanketing	89
3.1.	Datos entre 2001 y 2018 de la digisonda DPS-4	89
3.1.1.	Variabilidad respecto a días y horas del día	89
3.1.2.	Variabilidad respecto a estaciones del año	94
3.1.3.	Variabilidad con el ciclo solar	97
3.1.4.	Variabilidad en días calmados y disturbados	99
3.1.5.	Parámetros <i>h'Es</i> , <i>fbEs</i> y <i>foEs</i>	99
3.2.	Comparación con ionogramas de la ionosonda VIPIR	102
3.3.	Magnetogramas	105
3.3.1.	En la ocurrencia de los eventos <i>Esb</i>	105
3.3.2.	En los días de no ocurrencia de los eventos <i>Esb</i>	110
4.	Análisis de los resultados estadísticos	112
4.1.	Comparación de resultados	112
4.2.	Posibles condiciones que favorecen la aparición de las capas <i>Esb</i>	114
5.	Conclusiones y trabajos futuros	117
5.1.	Conclusiones	117
5.2.	Trabajos futuros	119
	Bibliografía	163

Índice de figuras

1.1.	Perfiles de densidad de neutros, obtenidos con el modelo MSIS-E 90 y perfil de densidad de electrones para las 00:00 horas LT y las 12:00 horas LT obtenidos con el modelo IRI, para el Radio Observatorio de Jicamarca para el día 15 de enero del 2015. Fuente: Modificado de Reyes [1].	3
1.2.	Perfiles verticales típicos diurnos de las conductividades de Hall (σ_H), Pedersen (σ_P) y paralelas (σ_o) de la ionosfera. Las conductividades de Hall (σ_H) y Pedersen (σ_P) están multiplicadas por un factor de 10^4 . Fuente: Shume [6].	5
1.3.	Direcciones asumidas para las coordenadas cartesianas y campos eléctrico y magnético en el modelo simple del electrochorro ecuatorial.	6
1.4.	Modelo laminar del electrochorro ecuatorial. En la izquierda se representa el perfil de densidad de corriente J_X generado por el campo principal \vec{E}_0 y el campo de polarización \vec{E}_P . Fuente: Modificado de Muralikrishna y Kulkarni [11].	8
1.5.	Modelo de electrochorro ecuatorial y efecto de partículas de polvo cargadas. En la izquierda se representa el perfil de densidad de corriente J_X alterado debido al campo de polarización \vec{E}'_P que ha sido generado debido a la presencia de las partículas de polvo meteórico. Fuente: Modificado de Muralikrishna y Kulkarni [11].	10
1.6.	Serie de tiempo de número de manchas solares e índice F10.7 promediado para cada día, entre 1993 y 2018.	12
1.7.	Observatorios Kp. Fuente: http://isgi.unistra.fr/indices_kp.php	13
1.8.	Capas E esporádicas blanketing y no blanketing	15
1.9.	Serie de ionogramas registrados cada 15 minutos el 11/01/2007 a partir de las 21:30:00 horas UT. A las 21:45, 22:00 y 22:15 se observa la presencia de E_s blanketing.	16

2.1.	Sistema digisonda DPS-4 del ROJ. a) El sistema DSP-4, donde están, entrada (teclado), salida (pantalla) del programa, el generador de pulsos, transmisor y el receptor; b) Una de las cuatro antenas receptoras; y c) antena transmisora.	22
2.2.	Esquema de la ubicación y geometría de la antena de transmisión y el arreglo de antenas de recepción de la digisonda DPS-4.	23
2.3.	Orientación del arreglo de antenas receptoras de la digisonda DPS-4. Fuente: http://jro.igp.gob.pe/digisonde/dps4text.htm	23
2.4.	Antena transmisora log-periodic de banda ancha (arriba) y antena receptora, arreglo de 8 dipolos de la ionosonda VIPIR (abajo). Fuente: Reyes [1].	25
2.5.	Ionograma típico en horas del día sobre el ROJ, registrado con la DPS-4 el 04/02/2008 a las 17:15:00 UT. Fuente: http://digisonde.igp.gob.pe/	26
2.6.	Ionograma típico en horas de las noches del ROJ en presencia de F dispersa, registrado con la DPS-4 el 04/02/2008 a las 05:00:00 UT. Fuente: http://digisonde.igp.gob.pe/	27
2.7.	Parámetros de las capas <i>Es</i> a ser escaladas. Fuente: Modificado de Piggott y Rawer [36].	28
2.8.	Esquema de una posible configuración de un archivo .GRM con bloques en formato .RSF. Los asteriscos indican que dichos tamaños pueden variar dependiendo de los parámetros que contiene el Header y el Prelude.	29
2.9.	Visualización de ionograma sin procesar y no umbralizado del día 23 de Julio del 2006 registrado a las 00:05:00.000 horas UTC usando el script grm2txt.py. Solo se visualizan los ecos de la onda ordinaria	29
2.10.	Visualización de ionograma sin procesar y umbralizado del día 23 de Julio del 2006 registrado a las 00:05:00.000 horas UTC usando el programa SAO-XPLORER. Solo se visualizan los ecos de la onda ordinaria de incidencia vertical.	30
2.11.	Número de días con ionogramas disponibles de la DPS-4.	32
2.12.	Esquema del algoritmo de identificación de las capas <i>Esb</i>	34
2.13.	Segmentación Fuzzy C Means aplicado a la región E de un ionograma registrado el 16/02/2008 a las 20:00 horas UT con 5 clusters. En el segundo cluster se obtiene los ecos de la capa <i>Esb</i>	37
2.14.	Imagen Base de 84 subimágenes (Regiones E de ionogramas) del día 16/02/2008 desde las 00:00 hasta las 20:45 horas.	38

2.15. Segmentación en 5 cluster de la Imagen Base aplicando Fuzzy C Means. En el cluster 1 de la imagen base se ha obtenido los ecos de la capa <i>Es</i> de una de las subimágenes.	39
2.16. Análisis de Componentes Principales para cada cluster. Vectores propios son las componentes principales y los valores propios miden el grado de dispersión en cada componente.	41
2.17. Esquema del algoritmo de Bosques Aleatorios de Clasificación. Fuente: Modificado de https://cdn-images-1.medium.com/max/1600/1*i0o8mjFfCn-uD79-F1Cqkw.png	42
2.18. Fichero PCA-Es_serieX.txt donde la columna Etiqueta <i>Es</i> será 1 si se ha identificado una capa <i>Es</i> o será 0 si no, además la columna foEs muestra el valor de la foEs estimado y h'Es muestra la altura mínima (en km) de la capa <i>Es</i> en caso estuviera presente.	45
2.19. Ionograma registrado 02/01/2008 a las 21:00 horas UT. a) Umbralizado para cada frecuencia (Max-40dB), b) Filtro de 45 grados y c) Filtro de 135 grados.	48
2.20. Esquema de la aplicación del filtro de 45 grados por ventanas de ancho "D" píxeles con desplazamiento "d" píxeles. Este filtro consiste en conservar el máximo valor en cada ventana.	49
2.21. Diagrama para buscar múltiplos nEs	50
2.22. Aplicación de b) filtro de 45 grados, c) eliminación del primer múltiplo de la capa F (1F), d) Eliminación de todos los múltiplos de la capa <i>Es</i> (nEs) y e) Resultado de aplicar los filtros anteriores a un evento de blanketing total.	51
2.23. Aplicación de b) filtro de 45 grados, c) eliminación del primer múltiplo de la capa F (1F), d) Eliminación de todos los múltiplos de la capa <i>Es</i> (nEs) y e) Resultado de aplicar los filtros anteriores a un ionograma donde hay presencia de múltiplo de la capa F.	52
2.24. Características de la capa F: La capa F1 suele presentarse con pendiente alta.	54
2.25. Características de la capa F: Si aparecen ecos del primer múltiplo de la capa F (1F), entonces deberían aparecer los ecos de la capa F para la misma frecuencia.	55
2.26. Algoritmo de eliminación nEs. a) Filtro leakage y se resalta el múltiplo 1F identificado. b) Filtro de 45 Y 135 grados. c) Eliminación del primer múltiplo de la capa F (1F). d) Eliminación de todos los múltiplos de la capa <i>Es</i> (nEs). e) Resultado de aplicar los filtros anteriores a un ionograma donde hay presencia de múltiplo de la capa F.	56

2.27. Algoritmo de eliminación nEs. a) Filtro leakage y no hay presencia del múltiplo 1F. b) Filtro de 45 y 135 grados. c) Eliminación del primer múltiplo de la capa F (1F). d) Eliminación de todos los múltiplos de la capa <i>Es</i> (nEs). e) Resultado de aplicar los filtros anteriores a un ionograma donde hay presencia de múltiplo de la capa <i>Es</i>	57
2.28. Segmentación de la región F en 8 clusters en presencia de F dispersa en los ionogramas.	58
2.29. Segmentación de la región F en 8 clusters en ausencia de F dispersa en los ionogramas y donde hay una capa F bien definida.	59
2.30. Algoritmo para identificar la presencia de F dispersa en los ionogramas.	61
2.31. Cálculo de parámetro pc3 de cada cada columna de cada cluster	62
2.32. Algoritmo para identificar si los ionogramas contienen F dispersa (info_Fregion=1), trazas de la capa F (info_Fregion=2) o solo contienen ruido o ningún eco (info_Fregion=0).	65
2.33. Fichero SpreadF.txt donde se caracteriza la región F. <i>InfoFreg</i> = 2: Si existe capa F, <i>InfoFreg</i> = 1: Si hay F dispersa, y <i>InfoFreg</i> = 0: si no hay región F.	66
2.34. Caracterización de la región F desde el 2001 al 2006 usando el algoritmo implementado.	68
2.35. Caracterización de la región F desde el 2007 al 2012 usando el algoritmo implementado.	69
2.36. Caracterización de la región F desde el 2013 al 2018 usando el algoritmo implementado.	70
2.37. Rutinas del modelo de rotores. a) Bordes b) Histograma angular c) Optimización de rotores d) Identificación de trazas.	72
2.38. Rutinas del modelo de rotores aplicado a la región F de un ionograma para identificar las trazas de las capas F1 y F2.	73
2.39. Histograma angular. Modificado de Galkin [47].	74
2.40. Esquema de Redes Neuronales Artificiales Feedback. Fuente Galkin [47].	75
2.41. Definición de los parámetros de los rotores 1. Modificado de Galkin y cols. [42].	76
2.42. Definición de los parámetros de los rotores 2. Modificado de Galkin y cols. [42].	77
2.43. Zonas de interacción de los rotores. Modificado de Galkin y cols. [42].	78
2.44. Fichero freq_min.txt. La última columna muestra el valor de fminF, en caso no fuera posible encontrar la capa F, muestra nan	80

2.45. Serie de tiempo de la frecuencia mínima de la capa F para 84 ionogramas consecutivos. Tendencia típica durante el día, para el 29 de marzo del 2008. Los eventos cuyo $f_{min}F$ se aleje un valor 0.5 MHz de la curva roja ajustada (círculo amarillo) son los posibles eventos <i>Esb</i>	83
2.46. Ejemplo de un estudio de una sola capa para una frecuencia en un período de tres días. Los puntos azules representan las alturas de los ecos seleccionados (eje vertical derecho); los puntos negros representan la atenuación ionosférica, calculada después de restar la atenuación geométrica (eje vertical izquierdo). Fuente: Gilli y cols. [49].	84
2.47. Ejemplo de la absorción media mensual en 2.3 MHz. Cada línea representa las atenuaciones como en la figura 2.46 promediadas a lo largo de un mes (solo para ecos entre 95 y 140 km). Fuente: Gilli y cols. [49].	85
2.48. Comparación de la medición de la atenuación ionosférica de 2.3 MHz por la ionosonda AIS-INGV (de Gilli y cols. [49]) versus la atenuación predicha que tiene en cuenta la absorción de la onda ordinaria y extraordinaria. Los datos fueron registrados el 03/09/2016 desde las 00:00 horas a las 17:00 horas UTC. Los efectos de la atenuación geométrica han sido sustraídos de la data empírica. Fuente: Fontell [52].	86
3.1. Ocurrencia <i>Esb</i> identificado entre 2001 y 2006.	90
3.2. Ocurrencia <i>Esb</i> identificado entre 2007 y 2012.	91
3.3. Ocurrencia <i>Esb</i> identificado entre 2013 y 2018.	92
3.4. Distribución de ocurrencia de eventos <i>Esb</i> identificados en función de la hora local entre 2001 y 2018.	93
3.5. Distribución de ocurrencia de eventos <i>Esb</i> identificados en función de días del año entre 2001 y 2018.	94
3.6. Distribución de ocurrencia de ionogramas con <i>Esb</i> identificados en función de alturas de las <i>Esb</i> identificado entre 2001 y 2018 en km.	95
3.7. Días de ocurrencia de <i>Esb</i> por estaciones entre 2001 y 2018.	96
3.8. Histograma de horas de ocurrencia de <i>Esb</i> por estaciones entre 2001 y 2018.	97
3.9. Histograma de alturas de km de <i>Esb</i> por estaciones entre 2001 y 2018.	97
3.10. Días de ocurrencia de <i>Esb</i> por año.	98
3.11. Días calmados o disturbados con <i>Esb</i> por año, el eje de la derecha muestra el porcentaje de data faltante.	99

3.12.	Porcentaje de días con <i>Esb</i> respecto a los días calmados. . . .	100
3.13.	Porcentaje de días con <i>Esb</i> respecto a los días disturbados. . .	101
3.14.	Diagrama de cajas de las frecuencias de blanketing por año. . .	102
3.15.	E esporádica blanketing en los ionogramas de VIPIR y la DPS-4.	103
3.16.	E esporádica blanketing en los ionogramas de la DPS-4 mas no en VIPIR.	104
3.17.	Magnetograma muestra el ΔH y los parámetros calculados alre- dedor de 6 minutos antes y 6 minutos después de la ocurrencia del <i>Esb</i> a las 20:30 horas UT el día 20/02/2008.	106
3.18.	Histograma de los valores promedio de los ΔH por minuto en un rango desde 6 minutos antes hasta 6 minutos después de las ocurrencias de los <i>Esb</i>	107
3.19.	Histograma de las pendientes de los ΔH obtenida al ajustar los valores de ΔH a una recta en un rango desde 6 minutos antes hasta 6 minutos después de las ocurrencias de los <i>Esb</i> . . .	107
3.20.	Histograma de los errores cuadrático medio obtenidos a partir de los valores reales y la recta ajustada para los valores de ΔH en un rango desde 6 minutos antes hasta 6 minutos después de las ocurrencias de los <i>Esb</i>	108
3.21.	Histograma de la razón entre el valor promedio de los ΔH (en un rango de 6 minutos antes y después del registro de las capas <i>Esb</i>) y el valor máximo (mínimo) de los valores de ΔH si el promedio de los ΔH es positivo (negativo), este máximo (mínimo) es tomado en un rango de 5 horas antes y después del registro de la capas <i>Esb</i>	109
3.22.	Tasa $\Delta H/\Delta H_{maximo}$ vs $\Delta H_{promedio}$	109
3.23.	ΔH promedio vs pendiente de ΔH en un rango desde 6 minutos antes hasta 6 minutos después de las ocurrencias de los <i>Esb</i> . . .	110
3.24.	ΔH promedio entre las 11 y las 13 horas (hora local) para días calmados en los que no hubo ocurrencia de <i>Esb</i> para años de a) Mínima actividad solar (2007, 2008, 2009, 2016, 2017 y 2018) y b) Máxima actividad solar (2001, 2002, 2003, 2013 y 2014). . .	111
4.1.	Evento <i>Esb</i> de altura 160 km aparentemente generado a partir de la parte baja de la capa F1 registrado el día 17/07/2007 que inicia a las 21:00 horas UT.	116
4.2.	Posibles condiciones que favorecen la formación de las capas <i>Esb</i> .	116
5.1.	Distribución global de las estaciones de las digisondas di- señadas por el UMLCAR. Fuente: http://ulcar.uml.edu/ stationmap.html	120

5.2. Imágen RTI (rango-tiempo-intensidad) del radar principal del ROJ en modo JULIA - 150 km del día 24 de noviembre del 2018, los dos eventos *Esb* registrados por la digisonda a las 11:15 y a las 13:00 horas LT se observan como capas delgadas que duran alrededor de 15 minutos. Imagen proporcionada por Iván Manay del Radio Observatorio de Jicamarca. 120

Capítulo 1

Introducción

La ionósfera es un gas parcialmente ionizado que envuelve la Tierra que se extiende aproximadamente desde los 50 km a los 1000 km de altitud, es decir es aquella región en donde los electrones libres y iones coexisten con las moléculas y átomos neutros. De acuerdo a la concentración de electrones libres la ionósfera puede ser dividida en la región D, región E y región F.

La figura 1.1, muestra la concentración de electrones libres como función de la altura y se indican las diferentes capas (regiones D, E y F) de la ionósfera. En esta figura N_e (N_n) indica el número de electrones (partículas neutras) por metro cúbico. La ionización de la especie neutra en la atmósfera es causada por la radiación solar, especialmente por los rayos X y la radiación ultravioleta, que proporcionan la cantidad adecuada de energía a un electrón unido a un átomo (o molécula) para hacer que escape de su pozo potencial y se obtenga un electrón libre y un ión cargado positivamente [1].

Los electrones libres en la región D (región entre 50 y 80 km) existen solo durante el día. Esta región se caracteriza por ser la región más absorbente de las ondas de radio. En la región E (entre 80 y 150 km), la ionización varía notablemente durante el día y la noche, y en el caso de la región F (150 a 1000 km), el pico de densidad de electrones varía aproximadamente en un rango de 10^{11} y 10^{12} electrones por metro cúbico.

El Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ), sede científica del Instituto Geofísico del Perú, es la principal estación ecuatorial de la cadena de radio observatorios de dispersión incoherente del hemisferio oeste, la más importante en el mundo para el estudio de la ionosfera ecuatorial, cuyo radar principal posee un arreglo de antenas de 18432 dipolos que cubre un área de 85 000 m^2 y está compuesto de tres transmisores de 1.5 MW. En el ROJ se han realizado estudios de distintos fenómenos ionosféricos, en la región E, se ha venido estudiando por ejemplo el electrochorro ecuatorial (EEJ - Equatorial Electrojet), que es una gran corriente de electrones que se genera a una altura

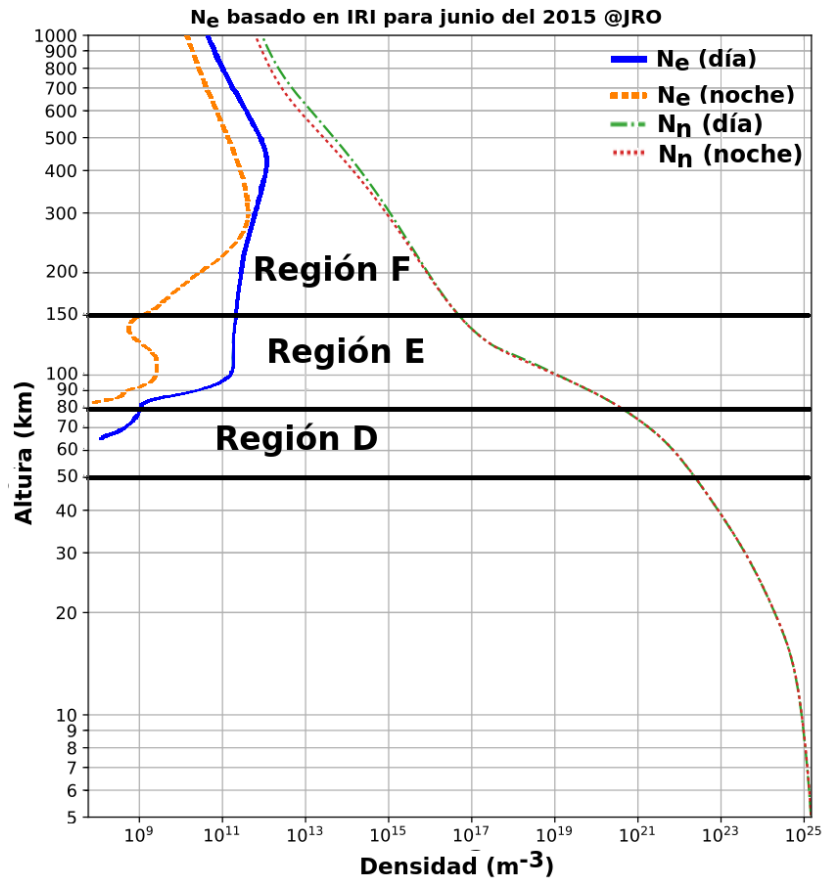


Figura 1.1: Perfiles de densidad de neutros, obtenidos con el modelo MSIS-E 90 y perfil de densidad de electrones para las 00:00 horas LT y las 12:00 horas LT obtenidos con el modelo IRI, para el Radio Observatorio de Jicamarca para el día 15 de enero del 2015. Fuente: Modificado de Reyes [1].

aproximada de 100 km a lo largo del ecuador magnético, sobre el Perú y otros países, y está presente la mayor parte del día y la noche salvo en los periodos llamados de reversión diurna y reversión nocturna [2]. Otro fenómeno que se viene estudiando en la parte superior de la región E, son los Ecos de 150 km, los cuales son ecos que se observan en horas del día en latitudes magnéticas ecuatoriales confinados alrededor de 150 km, entre 140 km y 170 km [3]. Además en la región F, se realizan estudios de un fenómeno típico de las noches en latitudes magnéticas ecuatoriales, llamado F dispersa que vienen a ser irregularidades en el plasma de la región F [4].

1.1. Marco teórico

1.1.1. Electrochorro ecuatorial

El electrochorro ecuatorial es una corriente, que existe en la región E ecuatorial magnética entre 95-120 km durante el día. Esta corriente transporta principalmente electrones magnetizados (en presencia del campo magnético de la Tierra) y fluye al este durante el día y se revierte durante la noche con densidad de corriente menor debido al decrecimiento de la densidad de electrones. Su extensión norte-sur es aproximadamente 600 kilómetros [5].

La dinámica de las corrientes eléctricas en la ionósfera es causada por la interacción entre los diversos constituyentes del plasma y los campos de fuerza: Campos eléctricos y geomagnéticos, el campo de viento de la atmósfera neutra, el campo gravitatorio, los gradientes de presión de plasma, etc. Las conductividades ionosféricas dependen de la dirección debido a la presencia del campo geomagnético y, por lo tanto, la corriente ionosférica es anisotrópica. La deducción para la expresión general del vector densidad de corriente se encuentra en Shume [6] y Kelley [7]. Para la región E, podemos considerar que las principales contribuciones al vector densidad de corriente vienen dadas por:

$$\vec{J} = \sigma_P(\vec{E}_\perp + \vec{U} \times \vec{B}) + \sigma_H \hat{b} \times (\vec{E} + \vec{U} \times \vec{B}) + \sigma_o(\vec{E}_\parallel) \quad (1.1.1)$$

Los coeficientes, σ_P , σ_H y σ_o son las conductividades de Pedersen, Hall y directa (o paralela), respectivamente. \vec{E} representa el campo eléctrico. \vec{U} representa el vector velocidad del viento neutro, $\hat{b} = \frac{\vec{B}}{|\vec{B}|}$, y los subíndices \perp y \parallel denotan componentes del vector perpendicular y paralelo al campo geomagnético \vec{B} . La figura 1.2 muestra los valores típicos de las conductividades en el día. El primer, segundo y tercer término en la ecuación 1.1.1, son conocidos como las corrientes de Pedersen, Hall, y directa (o paralela), respectivamente. Ellos están en la dirección perpendicular al campo magnético, en la dirección perpendicular al campo magnético y eléctrico, y paralelo al campo magnético respectivamente.

Se está considerando un sistema de coordenadas, donde el eje X apunta hacia el Este geomagnético, el eje Y hacia el norte geomagnético y el eje Z en la dirección vertical apuntando hacia arriba.

Por simplicidad, no vamos a considerar los campos de vientos (\vec{U}). Además para latitudes sobre el ecuador magnético tenemos que el campo geomagnético

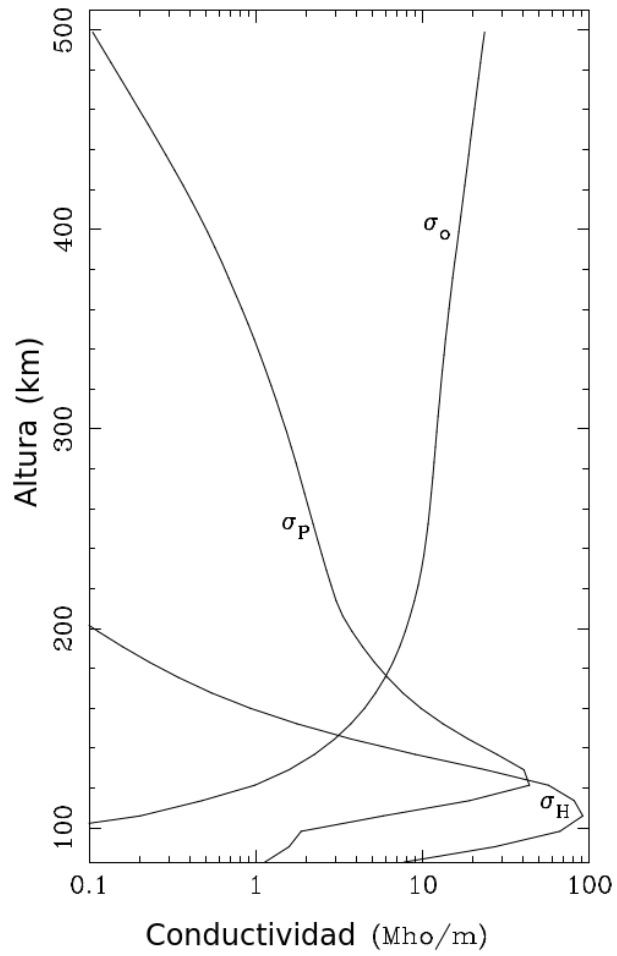


Figura 1.2: Perfiles verticales típicos diurnos de las conductividades de Hall (σ_H), Pedersen (σ_P) y paralelas (σ_o) de la ionosfera. Las conductividades de Hall (σ_H) y Pedersen (σ_P) están multiplicadas por un factor de 10^4 . Fuente: Shume [6].

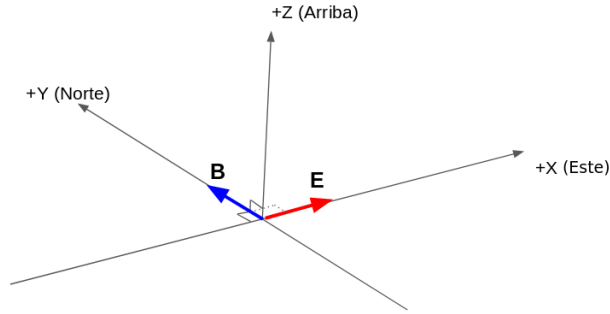


Figura 1.3: Direcciones asumidas para las coordenadas cartesianas y campos eléctrico y magnético en el modelo simple del electrochorro ecuatorial.

se caracteriza por ser casi completamente horizontal, entonces podemos considerar que \vec{B} está en la dirección $+Y$. Además siempre que el campo eléctrico sea perpendicular al campo geomagnético podemos escribir $\vec{E}_\perp = \vec{E}$ y $\vec{E}_\parallel = \vec{0}$ (ver figura 1.3). Entonces para estas condiciones se obtiene la siguiente expresión para el vector densidad de corriente:

$$\vec{J} = \underbrace{\sigma_P \vec{E}}_{\vec{J}_{Pedersen}} + \underbrace{\sigma_H \hat{b} \times \vec{E}}_{\vec{J}_{Hall}} \quad (1.1.2)$$

Durante horas del día, para un día calmado, el campo eléctrico primario \vec{E}_0 está en la dirección $+X$ (ver figura 1.4) e impulsa los electrones libres en la dirección $-X$ y los iones positivos en la dirección $+X$ causando una corriente neta de Pedersen de $\sigma_P E_0$ en la dirección $+X$ (ver ecuación 1.1.2). \vec{E}_0 además causa una deriva de Hall hacia arriba de electrones e iones en la dirección $+Z$. Esta deriva se produce debido a que una partícula cargada en un campo magnético \vec{B} y eléctrico \vec{E} , con \vec{E} y \vec{B} perpendiculares se moverá con una velocidad de deriva en la dirección $\vec{E} \times \vec{B}$ [8]. En la región del electrochorro la movilidad de Hall de electrones es mucho mayor que de los iones positivos [9], por lo que los electrones se moverán mucho más rápido que los iones. Esta diferencia en las movilidades de los electrones e iones (debido a la diferencia de masa y otros factores) es responsable que el efecto neto sea producir una corriente neta de Hall de $\sigma_H E_0$ en la dirección $-Z$ (ver ecuación 1.1.2). Como una simple aproximación para la dinámica de la región E, el modelo laminar asume que no hay densidad de corriente en el eje vertical, es decir $J_z = 0$, produciendo la inhibición de corriente en el eje vertical tal como se discute en [7, 10]. La inhibición de esta corriente vertical, resulta en la acumulación de electrones en la parte superior del bloque de espesor finito e iones positivos en la parte inferior, generando así un campo de polarización \vec{E}_P en la dirección

+Z. Este campo eléctrico de polarización \vec{E}_P genera una corriente de Pedersen ($\sigma_P E_P$) en la dirección +Z y una corriente de Hall $\sigma_H E_P$ en la dirección +X (ver ecuación 1.1.2).

Una forma simplificada de ver las corrientes del electrochorro es que la corriente de Pedersen debido al campo de polarización \vec{E}_P en la dirección +Z es anulada por la corriente de Hall debido a \vec{E}_0 en la dirección -Z, dando la relación [11]:

$$\sigma_P E_P - \sigma_H E_0 = 0, \quad (1.1.3)$$

$$E_P = \frac{\sigma_H}{\sigma_P} E_0. \quad (1.1.4)$$

La corriente neta en la dirección +X es la resultante de la corriente de Pedersen causada por \vec{E}_0 y la corriente de Hall causada por \vec{E}_P (ver figura 1.4). Esta corriente se representa en la parte izquierda de la figura 1.4 y puede ser escrita como:

$$J_X = \sigma_P E_0 + \sigma_H E_P. \quad (1.1.5)$$

Sustituyendo para E_P de la ecuación 1.1.4, se tiene:

$$J_X = \left[\sigma_P + \frac{\sigma_H^2}{\sigma_P} \right] E_0, \quad (1.1.6)$$

$$J_X = \sigma_C E_0, \quad (1.1.7)$$

donde,

$$\sigma_C = \left[\sigma_P + \frac{\sigma_H^2}{\sigma_P} \right], \quad (1.1.8)$$

σ_C es la conductividad de Cowling.

Influencia de las partículas de polvo meteórico en el EEJ - modelo de Muralikrishna y Kulkarni [11]

Muralikrishna y Kulkarni [11, 12] reportaron el efecto de las partículas de polvo de origen meteórico compuestas de iones metálicos (como Fe^+ , Mg^+ y Ca^+) que terminan capturando electrones del ambiente de plasma, quedándose finalmente cargadas negativamente, reduciendo el número de densidad de electrones. Las conductividades de Pedersen y Hall en la región del electrochorro son principalmente debido a los electrones, ya que estos

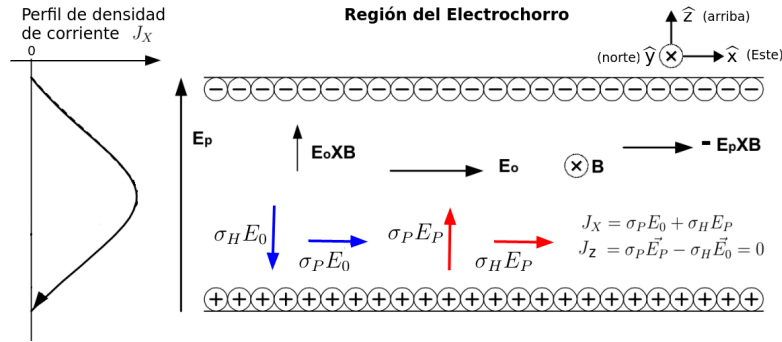


Figura 1.4: Modelo laminar del electrochorro ecuatorial. En la izquierda se representa el perfil de densidad de corriente J_X generado por el campo principal \vec{E}_0 y el campo de polarización \vec{E}_P . Fuente: Modificado de Muralikrishna y Kulkarni [11].

tienen mucha mayor movilidad comparada con los iones positivos en esta región. Cualquier variación en la densidad de electrones debido a las partículas de polvo cargadas, por lo tanto afectarán la conductividad. Debe notarse que las partículas de polvo tienen masas en el rango de 50 000 - 150 000 uma y por lo tanto son mucho más pesadas que los iones positivos. El valor de su movilidad en la región del electrochorro puede ser asumida prácticamente cero. Si ellos existen en gran número del orden de 10^4 por centímetro cúbico, ellos pueden afectar la corriente de Hall, especialmente en la región debajo del pico del electrochorro donde la densidad de electrones son del orden de 10^4 . Durante los días de lluvias de meteoros, se pueden esperar partículas de polvo de un amplio espectro de tamaños que van desde unos pocos nanómetros hasta unos pocos micrómetros o incluso más en cantidades suficientes para atraer todos los electrones en la región de altura por debajo del pico del electrochorro. Esto puede causar una reducción o incluso revertir la corriente normal del electrochorro en las alturas de esta región, a este fenómeno se le llama contraelectrochorro ecuatorial. Si esto resulta en la reversión del campo de polarización de Hall vertical en la región de la capa de polvo, incluso podría esperarse que las corrientes invertidas sean lo suficientemente grande como para causar el fenómeno de contraelectrochorro como se identifica en los magnetogramas.

En las alturas de la región sobre el pico del electrochorro, donde las partículas de polvo están prácticamente ausentes, el campo de polarización \vec{E}_P aumenta la corriente del electrochorro como se explica a través de las ecuaciones (1.1.6) - (1.1.7). En esta región, la deriva de Hall tanto de los electrones

libres como de los iones positivos está en la dirección $\vec{E}_P \times \vec{B}$ (dirección -X), y debido a que la deriva de Hall de los electrones es mucho mayor que la de los iones, esto causa una corriente neta de Hall en la dirección $-\vec{E}_P \times \vec{B}$ (dirección +X). Pero en la región debajo del pico del electrochorro, donde las partículas de polvo cargadas eliminan una gran cantidad de electrones libres del plasma ambiental, la figura es diferente. Si bien la densidad de corriente neta se debe a las derivas de Pedersen y Hall de los electrones y los iones positivos, la densidad de números de electrones e iones positivos no son iguales en esta región. Las contribuciones relativas de electrones e iones positivos a esta corriente neta depende mucho de la densidad de número relativa. La adquisición de electrones por las partículas de polvo depende de su densidad numérica y distribución de tamaño. En el caso extremo, cuando todos los electrones libres están unidos a las partículas de polvo, la corriente de Hall neta está determinada por la deriva de Hall de los iones positivos y estará en la dirección -X, opuesta a la corriente del electrochorro normal. Aunque esto representa una fracción pequeña de la corriente total de Hall, su efecto es reducir la corriente normal en la región inferior del electrochorro o incluso causar que se revierta.

La figura 1.5 muestra como la presencia de una capa delgada de polvo puede alterar el perfil vertical del campo de polarización de Hall. Bajo condiciones normales de electrochorro (en ausencia del efecto de la capa de polvo) el campo primario \vec{E}_0 conduce a una deriva de Hall vertical $\vec{E}_0 \times \vec{B}$. Los electrones con movilidad alta se mueven más rápido y se acumulan en la parte superior del límite del electrochorro, mientras que los iones positivos permanecen más cerca del límite inferior, lo que provoca el desarrollo del campo de polarización de Hall \vec{E}_P dirigido hacia arriba (ver figura 1.5). La presencia de una capa de polvo con partículas de polvo cargadas que son mucho más pesadas que los electrones e iones positivos afecta el desarrollo de \vec{E}_P y causa una distorsión en este campo como se muestra en la figura 1.5. Las cargas negativas en la capa de polvo, siendo muy pesados en comparación con los electrones libres no participan en la deriva de Hall vertical hacia arriba $\vec{E}_0 \times \vec{B}$ de electrones e iones causa por el campo eléctrico primario \vec{E}_0 . Los electrones libres así como los iones positivos se mueven hacia arriba más rápido que las partículas de polvo cargadas negativamente, creando la acumulación de cargas positivas en el límite superior de la capa de polvo y las cargas negativas (de las partículas de polvo) en el límite inferior. El campo de polarización dentro de la capa de polvo \vec{E}'_p se dirige hacia abajo. Esto produce una distorsión en el campo de polarización vertical normal \vec{E}_p que incluso puede dar como resultado la inversión de este campo por debajo del pico del electrochorro, y por tanto

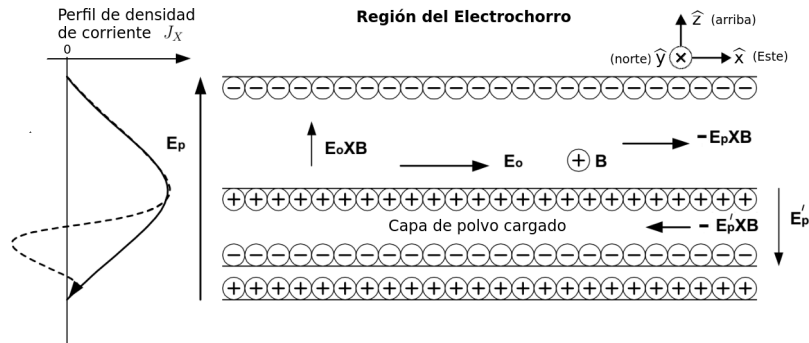


Figura 1.5: Modelo de electrochorro ecuatorial y efecto de partículas de polvo cargadas. En la izquierda se representa el perfil de densidad de corriente J_X alterado debido al campo de polarización E'_P que ha sido generado debido a la presencia de las partículas de polvo meteórico. Fuente: Modificado de Muralikrishna y Kulkarni [11].

la inversión de las corrientes del electrochorro en esta región. Por lo tanto, considerando el efecto de las partículas de polvo cargadas en las corrientes del electrochorro, uno puede tener las siguientes situaciones diferentes.

- La cantidad de partículas de polvo cargadas es despreciablemente pequeña. Esto deja inalterado el perfil vertical de las corrientes del electrochorro y se tiene la situación del electrochorro normal.
- El número de partículas de polvo cargadas es considerable, especialmente en la región de altura debajo del pico del electrochorro. Incluso si se supone que esta capa de polvo cargado no afecta el campo de polarización de Hall Vertical, puede reducir las corrientes de Hall debidas a los electrones en esta región, reduciendo la corriente del electrochorro en la dirección $+X$.
- El número de partículas de polvo cargadas es significativamente alto en la región debajo del pico del electrochorro y puede distorsionar el perfil de altura del campo de polarización vertical, produciendo regiones donde el campo de polarización vertical esté invertida, lo que provoca una inversión en la corriente normal del electrochorro en estas regiones. Esto puede resultar en el flujo de un contra electrochorro parcial o total.

1.1.2. El ciclo solar, las manchas solares y el índice F10.7

El Sol es la principal fuente de radiación electromagnética y responsable de la ionización del gas neutro de nuestra atmósfera terrestre. Este emite

radiación en una amplia región del espectro electromagnético, además de plasma y partículas energéticas [13].

El Sol tiene un periodo de rotación de aproximadamente 27 días, pero debido a que la superficie del Sol no es sólida hay una rotación diferencial entre el ecuador (25 días) y los polos (31 días). Esta rotación y la convección del plasma actúan para producir intensas corrientes eléctricas y campos magnéticos vía acción del dínamo. Sin embargo, los campos magnéticos que se generan muestran una variación temporal distinta. Específicamente, hay un aumento y disminución general de la actividad magnética que sigue un ciclo total de 22 años (2 ciclos de 11 años), que coincide con el cambio en la polaridad de los polos magnéticos del Sol. Es decir, que la polaridad del Sol cambia paulatinamente, tal que cada 11 años ocurre una inversión en sus polos magnéticos. Una de las principales manifestaciones de la actividad magnética solar es la aparición de manchas solares que son regiones oscuras en un Sol activo. Se sabe que la cantidad de manchas solares varía con este ciclo de 11 años [14].

El espectro de radiación presenta un máximo absoluto en el visible, para luego decaer en longitudes de onda más largas (infrarrojo y radio) y más cortas (ultravioleta y rayos X). Las emisiones en longitudes de radio, rayos X y ultravioleta lejano muestran importantes fluctuaciones que dependen del nivel de actividad solar. El número de manchas solares es un indicador del nivel de actividad solar. Estas manchas solares son regiones frías del Sol que emiten una cantidad de radiación significativamente menor a la de sus alrededores, por lo que se observan como regiones oscuras en comparación con el resto de la superficie visible del Sol. En épocas de alta actividad solar se observa mayor número de manchas en comparación a épocas de baja actividad solar [13].

El índice F10.7 mide el grado de actividad solar mediante el flujo de emisiones de radio en la banda 10.7 cm. Dicho índice muestra una fuerte correlación empírica con el número de manchas solares y sirve como medida de la potencia de emisión solar media en el ultravioleta y en rayos X [13].

Diversos parámetros de la variabilidad solar se pueden descargar de <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>. La figura 1.6 muestra una serie de tiempo de promedio diario del índice F10.7 y del número de manchas solares entre los años 1993 y 2018 descargados de esta web. Se observa la alta correlación entre ambos parámetros.

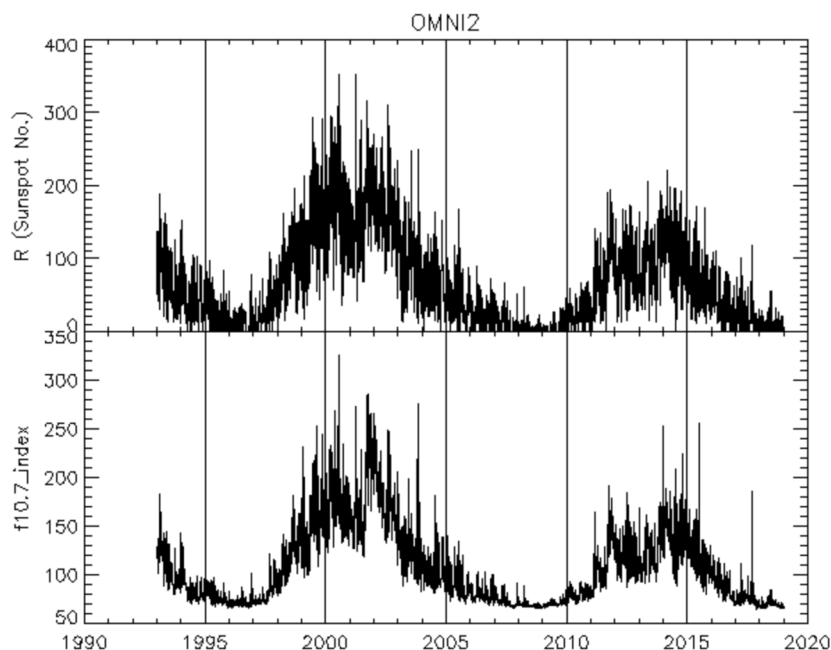


Figura 1.6: Serie de tiempo de número de manchas solares e índice F10.7 promediado para cada día, entre 1993 y 2018.

1.1.3. Días calmados y disturbados

Los índices geomagnéticos se suelen usar para cuantificar cómo responde la Tierra a un tipo dado de estructura de viento solar; un índice comúnmente usado es el índice K_p , que es calculado usando mediciones de la componente horizontal del campo magnético de 13 estaciones terrenas de magnetómetros subaurorales [15].

El índice K_p , el cual es un índice planetario o global, es derivado del índice K , el cual es un índice local, de cada una de las 13 estaciones. La distribución de estos observatorios se muestra en la figura 1.7.

El índice K , fue introducido por Bartels y cols. [16], es un índice diseñado para cuantificar el nivel de perturbación causado por la influencia del viento solar sobre un punto de la superficie terrestre. Este índice es derivado a partir de mediciones de las componentes horizontales del campo magnético de cada observatorio, tiene un valor entero entre 0 y 9, se caracteriza por ser obtenido en intervalos de 3 horas y por tener una escala cuasi-logarítmica que depende del observatorio. Los índices K se miden y calculan para cada observatorio en particular, teniendo en cuenta datos característicos del observatorio como su

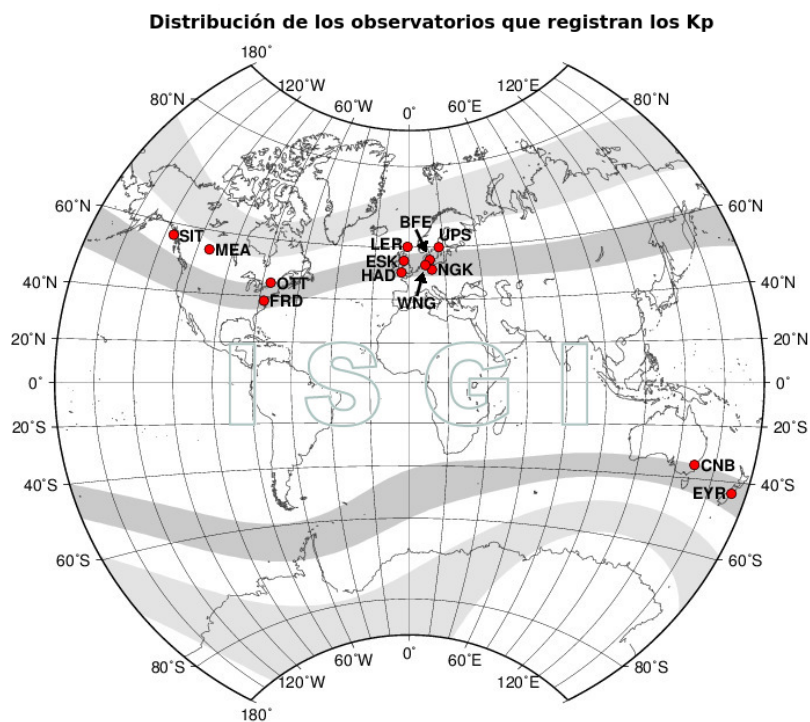


Figura 1.7: Observatorios Kp. Fuente: http://isgi.unistra.fr/indices_kp.php.

posición geográfica y tipo de instrumento usado para su medición.

El índice Kp se obtiene a partir del índice K y fue introducido por Bartels [17], igualmente a K, es un dígito que va de 0 a 9 con una subdivisión en tercios (0, 0+, 1-, 1, 1+, 2-, 2, 2+, ...) para cada intervalo de 3 horas que comienza a la media noche, UT. Bartels reconoció que los índices K de diferentes observatorios tenían que ser estandarizados (Ks) antes de que pudieran combinarse en un índice planetario. Bartels realizó las correcciones latitudinales y de tiempo local/estacional a través de unas tablas de conversión para determinar así el índice Ks estandarizado para cada uno de los 13 observatorios. El índice Kp nos brinda información sobre la actividad magnética global y se calcula a partir del promedio de los Ks para los observatorios seleccionados [18].

La serie de tiempo Kp por hora ha sido descargado de <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>. En esta base de datos se muestra la siguiente variación en el formato de los valores del Kp estándar los cuales aparecen como: 0, 0+, 1-, 1, 1+, 2-, 2, 2+, 3-, 3, 3+, 4... en esta base de datos son

mapeados como: 0.0, 0.3, 0.7, 1.0, 1.3, 1.7, 2.0, 2.3, 2.7, 3.0, 3.3, 3.7, 4.0,... Se debe notar que en la escala estándar 0 corresponde a 0.0 en la escala de omniweb, que 0+ en la escala estándar corresponde a 0.3 en la escala omniweb, que 1- en la escala estándar corresponde a 0.7 en la escala omniweb, que 1 en la escala estándar corresponde a 1.0 en la escala omniweb, que 1+ en la escala estándar corresponde a 1.3 en la escala omniweb, y así sucesivamente.

En nuestro caso vamos a considerar los días con $\sum Kp > 24$ como días disturbados, y el resto como días calmados, igual que en Yadav y cols. [19].

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Descripción y análisis del tema

De las distintas definiciones que existen para las capas E esporádicas (Es), vemos conveniente usar la definición general dada por Resende y cols. [20]. Ellos las definen como regiones de incremento de la densidad de electrones, observadas entre 90 y 130 km de altura y constituidas de iones metálicos como Mg^+ , Si^+ , Fe^+ , Ca^+ , Na^+ , tienen diferentes mecanismos de formación de acuerdo a la región del globo donde son detectados (latitudes ecuatoriales, bajas/medias y auroral).

Las capas E esporádicas son de tipo blanketing (*Esb*) cuando pueden bloquear parcial o totalmente las ondas de radio en las frecuencias transmitidas por las ionosondas para el sondeo de la ionósfera superior (entre 1.0 MHz y 14.0 MHz). La figura 1.8 muestra un esquema de las capas E esporádicas y su clasificación de blanketing y no blanketing. Se puede observar que en el caso blanketing ocurre una reflexión total en una zona de la región E por lo que a ciertas frecuencias no se puede sondear la región F.

La figura 1.9 muestra una serie de cinco ionogramas registrados en el Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ) por la digisonda DPS-4 cada 15 minutos el día 11 de enero del 2007 a partir de las 21:30:00 UT. Cada ionograma es una matriz cuyo eje horizontal indica la frecuencia de la onda transmitida por la ionosonda y el eje vertical muestra la altura virtual, es decir la distancia que recorrería la onda electromagnética en regresar como un eco asumiendo que la onda viaja a la velocidad de la luz en la ionósfera. El valor almacenado en cada posición de la matriz es la amplitud de la señal recibida expresada en escala de colores.

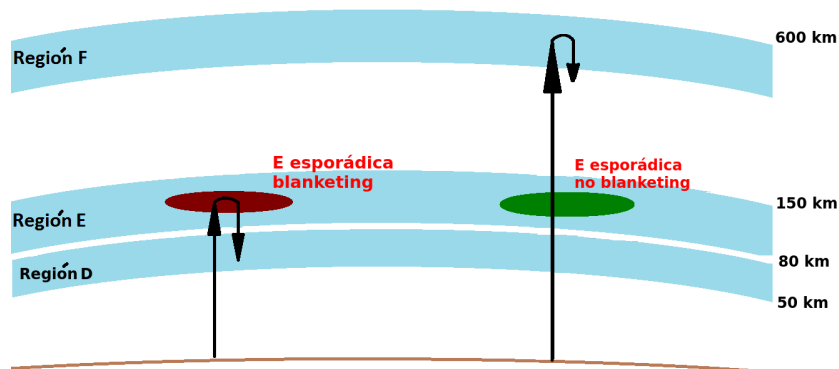


Figura 1.8: Capas E esporádicas blanketing y no blanketing

En la figura 1.9 podemos notar la aparición de las capas *Esb* en la serie de ionogramas. A las 21:30:00 horas no hay presencia de *Esb* y la capa F es observada entre 200 y 500 km, a las 21:45:00 horas se observa la repentina aparición de una capa *Esb* la cual oculta parcialmente la capa F, a las 22:00:00 horas permanece la capa *Esb*, a las 22:15:00 empieza a desvanecerse y a las 22:30:00 horas la capa *Esb* desaparece y la traza de la capa F vuelve a aparecer.

En cuanto a los mecanismos de formación de las capas *Es*, la teoría de Cizalladura Vertical de Vientos (Vertical Windshear) es la más aceptada para explicar la formación de las capas *Es* en latitudes medias y bajas, sin embargo esta teoría no explica su formación en latitudes ecuatoriales (latitudes cercanas al ecuador magnético) donde el campo magnético es principalmente horizontal [21]. Por lo tanto, esta teoría no explicaría la presencia de *Esb* sobre el Radio Observatorio de Jicamarca (latitud 11.95° Sur, longitud 76.87° Oeste y $\sim 1^\circ$ dip latitude). En la región ecuatorial los mecanismos de convergencia de iones para la formación de las capas *Esb* aún debe ser ampliamente explorado [22] y se necesitan mayores esfuerzos para un mejor entendimiento [19].

Debe aclararse que históricamente se ha llamado E esporádica ecuatorial (*Esq*) a los ecos provenientes de una región de dispersión anómala en la Región E que se registran en los ionogramas en estaciones ecuatoriales y se caracterizan por ser no blanketing, estos eventos están relacionados con el Electrochorro Ecuatorial (*EEJ*) y han sido bien explicados por las inestabilidades del *EEJ* [23]. En esta tesis, estudiaremos aquellas capas *Es* de tipo blanketing que ocurren muy cerca al ecuador magnético (como es el caso del *ROJ*) y cuyos mecanismos físicos de formación aún siguen siendo objeto de

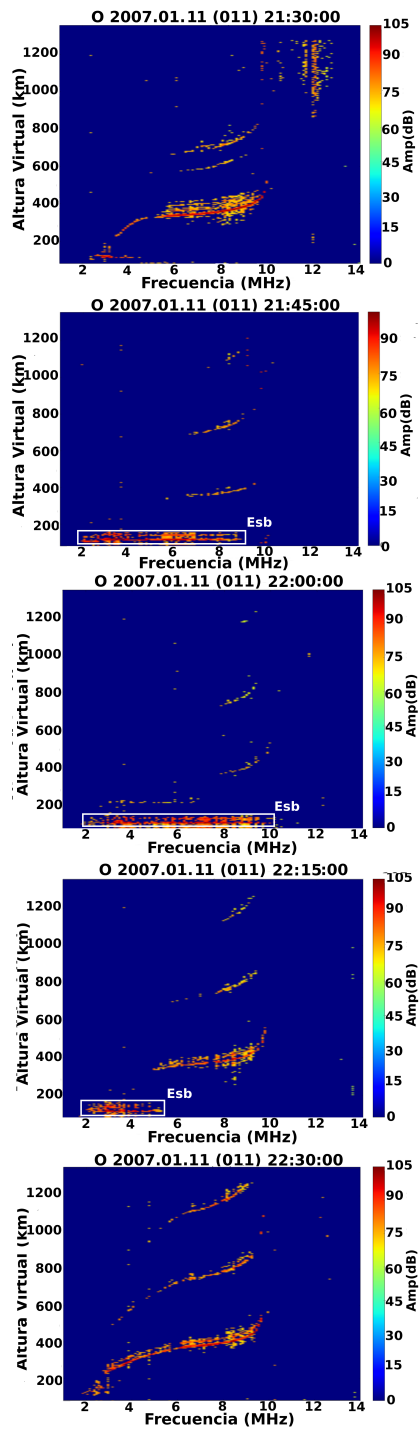


Figura 1.9: Serie de ionogramas registrados cada 15 minutos el 11/01/2007 a partir de las 21:30:00 horas UT. A las 21:45, 22:00 y 22:15 se observa la presencia de *Es* blanketing.

estudio.

La mayoría de estudios estadísticos sobre las capas E esporádicas blanketing ecuatoriales son de hace más de 40 años y/o abarcan eventos particulares o cortos periodos de tiempo por ejemplo los estudios realizados por Reddy y Devasia [24], Devasia [25] y Chandra y Rastogi [26] en la India o por Oyinloye [27] en Nigeria, así como por Oyinloye [28] en Perú, excepto los estudios recientes de Yadav y cols. [19, 29]. Estos últimos realizaron un estudio estadístico de la ocurrencia de las capas *Esb* identificadas visualmente en ionogramas registrados entre 1996 y 2006 sobre la estación de Trivandrum en la India con dip latitude de 0.5 grados Norte. No se ha realizado anteriormente un estudio estadístico de la ocurrencia de las capas *Esb* sobre el ROJ.

Uno de los principales retos para el estudio estadístico de las capas *Esb* en estaciones ecuatoriales es la forma de identificarlos, anteriormente y hasta la actualidad estos han sido identificados de forma visual y no de forma automática probablemente porque el software disponible de escalado automático no consiguen identificar adecuadamente los eventos de *Esb* en estaciones ecuatoriales debido a la presencia de los ecos del Electrochorro Ecuatorial durante el día, lo que genera una gran cantidad de falsos positivos en los programas que se utilizan para el escalado automático de los ionogramas, como el SAO-XPLORER cuyo algoritmo de escalado automático es el ARTIST [30]. El escalado se refiere a la identificación de las distintas trazas de las capas E, *Es*, *F1* y *F2* a partir de la cual se identifican los parámetros de interés. En esta tesis se ha desarrollado un algoritmo y se ha implementado un software para la identificación automática de eventos *Esb* usando técnicas y métodos de procesamiento de imágenes y machine learning o aprendizaje de máquina.

Varios autores han encontrado características o condiciones que se presentan en la ocurrencia de las capas E esporádicas blanketing cerca al ecuador magnético pero en longitudes diferentes a las del ROJ, como la dependencia con el nivel de actividad solar, las estaciones del año, tiempo local, contraelectrochorro ecuatorial [19, 26, 28, 29, 31]. Debido a que en Jicamarca no se ha realizado anteriormente un estudio estadístico de la ocurrencia de las capas *Esb*, resulta interesante encontrar las condiciones que favorecen su aparición en el ROJ y compararlas con estudios de otros observatorios ecuatoriales. En la presente tesis se obtendrá una estadística de la ocurrencia de las capas *Esb* sobre el ROJ a fin de poder encontrar las características y condiciones en las que se presentan.

Respecto a la data disponible para realizar este estudio, la digisonda DPS-4 del ROJ está registrando ionogramas por lo general cada 15 minutos

desde el año 1993, por lo que se tienen registros de al menos dos ciclos solares entre 1993 y 2018. Además se tienen ionogramas registrados por la ionosonda VIPIR a partir del año 2008 este último nos permitirá hacer una comparación de las capas *Esb* en ionogramas provenientes de ambas ionosondas. Toda esta data disponible permitirá que las conclusiones sean representativas.

1.2.2. Problema

Lo que se pretende analizar y responder es la siguiente interrogante: ¿Cuáles son las características de la ocurrencia de eventos *Esb* sobre el ROJ y qué condiciones favorecen la formación de las capas *Esb*? .

1.3. Objetivos y alcance de la investigación

1.3.1. Objetivos

Objetivo general

El objetivo general es estudiar la ocurrencia de las capas E esporádicas blanketing en la región ecuatorial sobre el Radio Observatorio de Jicamarca, a partir de ahí poder identificar posibles condiciones que favorecen su formación.

Objetivos específicos

- Realizar una estadística de las capas *Esb*, su ocurrencia y sus parámetros con ionogramas disponibles registrados desde 2001 al 2018 en el ROJ.
- Realizar un algoritmo e implementar un software de identificación automática de las capas *Es* blanketing ecuatoriales utilizando métodos de procesamiento de imágenes y aprendizaje de máquina.
- Caracterizar las capas *Esb* sobre el ROJ, estudiar su variabilidad con el ciclo solar, días calmados y disturbados, estaciones del año, horas del día, frecuencia de blanketing, alturas de las capas *Esb*.
- Buscar posibles periodos o tendencias de la formación de las capas *Esb*.
- Identificar las posibles condiciones que favorecen la formación de las capas *Esb*.

1.3.2. Alcance

La presente tesis es una investigación de alcance descriptiva de la ocurrencia de las capas E esporádicas de tipo blanketing en la región ecuatorial sobre el Radio Observatorio de Jicamarca.

1.4. Importancia y justificación de la investigación

- Las capas *Esb* influyen en las comunicaciones vía señales de alta frecuencia o HF (de las siglas en inglés High Frequency) de manera que las distancias de propagaciones se ven afectadas lo que trae efectos positivos y negativos para los que usan este tipo de comunicaciones, por lo tanto este estudio podría aportar para el entendimiento de estos fenómenos y así poder aprovechar los efectos positivos como la propagación via HF a más larga distancia que la usual.
- Aún no existe una teoría que pueda explicar los mecanismos que generan las capas *Esb* en latitudes ecuatoriales por lo que viene siendo una pregunta abierta, posiblemente por la falta de caracterización de este fenómeno en distintas estaciones ecuatoriales, por lo que este estudio cuantitativo y cualitativo daría información importante para futuras teorías.
- No se ha realizado anteriormente un estudio estadístico de la ocurrencia de las capas *Esb* sobre el ROJ por lo que los resultados serían novedosos en esta región.
- La mayoría de estudios sobre las capas E esporádicas abarcan eventos particulares o cortos periodos de tiempo, por tanto sus conclusiones no son muy representativas, en esta investigación se usaron ionogramas entre 2001 y 2018 lo cual nos permite obtener conclusiones representativas.
- El software disponible (SAO-XPLORER) no consiguen calcular los parámetros ni identificar adecuadamente las capas *Esb* en regiones ecuatoriales debido a la presencia de ecos del EEJ en los ionogramas, esta puede ser la razón por la que la mayoría de estadísticas han sido realizadas de forma visual lo que se convierte en una dificultad cuando se tiene una gran cantidad de ionogramas. En esta investigación se ha puesto énfasis en desarrollar un algoritmo y un software para la

identificación de las capas *Esb* en regiones ecuatoriales usando técnicas de procesamiento de imágenes y machine learning o aprendizaje de máquina.

- Existen varios estudios donde correlacionan los eventos de *Esb* en diferentes latitudes con otros fenómenos, como tormentas solares [32], el ciclo solar [31], F dispersa [33], ionización de meteoros [34] en diferentes latitudes, por lo que estos resultados permitirían comparar si estas correlaciones se siguen cumpliendo en el ROJ.

Capítulo 2

Desarrollo del software de identificación automática de capas E esporádicas Blanketing

2.1. Generación y obtención de los datos

2.1.1. Ionosonda

La ionosonda es aquel sistema de radar que permite medir parámetros de señales reflejadas (en incidencia vertical) en la ionósfera a través de un sondeo para distintas frecuencias HF. Debido a que los parámetros físicos del plasma ionosférico afectan la reflexión o refracción de las ondas de radio a través de la ionósfera, es posible medir estos parámetros observables en una serie de alturas discretas y frecuencias discretas para mapear y caracterizar la estructura del plasma en la ionósfera. La ionosonda empieza a transmitir señales de radio frecuencia al espacio, haciendo un barrido de frecuencia en un rango de 1.0 a 15.0 MHz. Estas señales se reflejan en la ionósfera y son recepcionadas para luego identificar los parámetros de las capas ionosféricas. Esta medición resultante se llama ionograma (Ref: Manual Digisonda DPS-4).

El Radio Observatorio de Jicamarca cuenta con dos ionosondas:

- Digisonde Portable Sounder - 4 (DPS-4) de Lowell Digisonde International.
- Ionosonda Vertical Incidence Pulsed Ionospheric Radar (VIPIR) de la red LOW LATITUDE IONOSPHERIC SENSOR NETWORK (LISN) [1, 35].

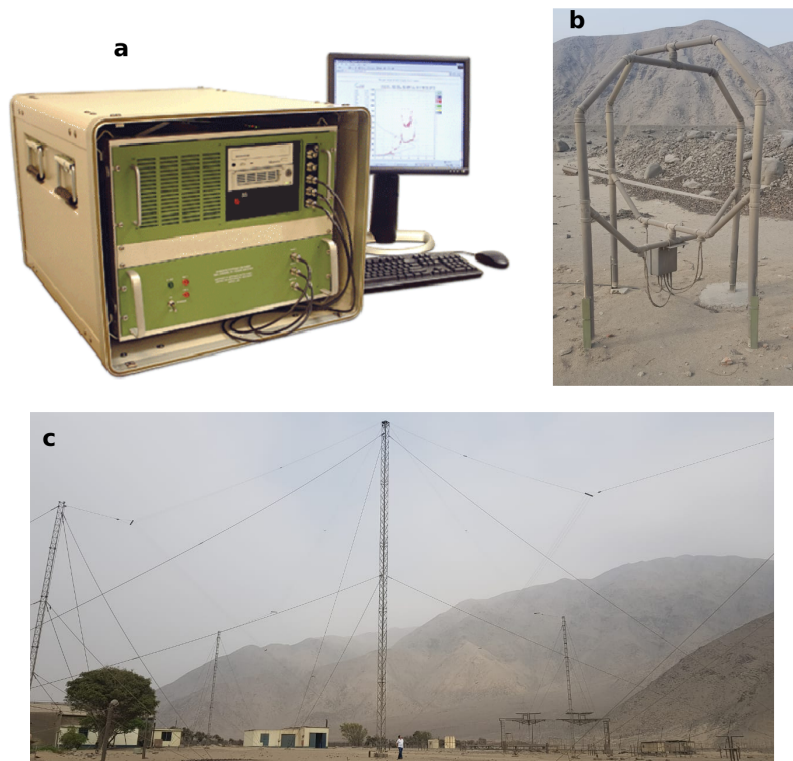


Figura 2.1: Sistema digisonda DPS-4 del ROJ. a) El sistema DSP-4, donde están, entrada (teclado), salida (pantalla) del programa, el generador de pulsos, transmisor y el receptor; b) Una de las cuatro antenas receptoras; y c) antena transmisora.

2.1.2. Digisonde Portable Sounder - 4 (DPS-4)

La figura 2.1-a muestra el sistema del DSP-4, donde están, entrada (teclado), salida (pantalla) del programa, el generador de pulsos, transmisor y el receptor. La figura 2.1-b muestra una de las cuatro antenas de recepción y la 2.1-c muestra la antena de transmisión. La figura 2.2 muestra un esquema de las antenas de transmisión y recepción. La antena transmisora de este modelo de la digisonda (DPS-4) tiene forma de dos rombos perpendiculares y la antena receptora consiste de un arreglo de cuatro antenas, cada una en forma de dos hexágonos perpendiculares, la potencia de transmisión es 250 W para cada antena de transmisión, las antenas receptoras están distribuidas en los vértices de un triángulo equilátero y en su respectivo circuncentro orientados según la figura 2.3 (notar la referencia del polo magnético).

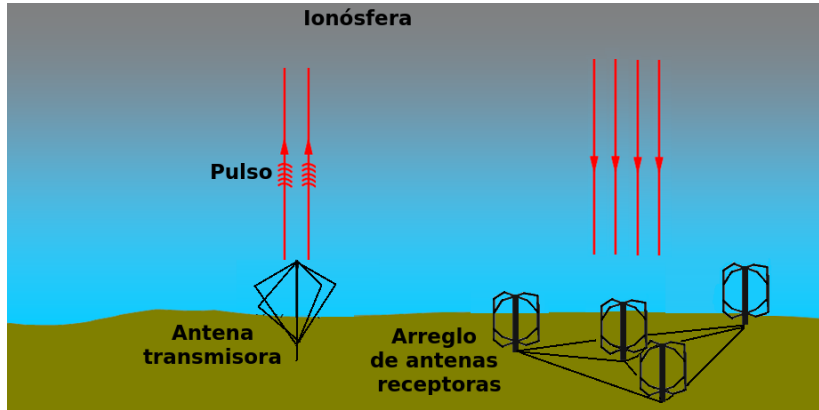


Figura 2.2: Esquema de la ubicación y geometría de la antena de transmisión y el arreglo de antenas de recepción de la digisonda DPS-4.

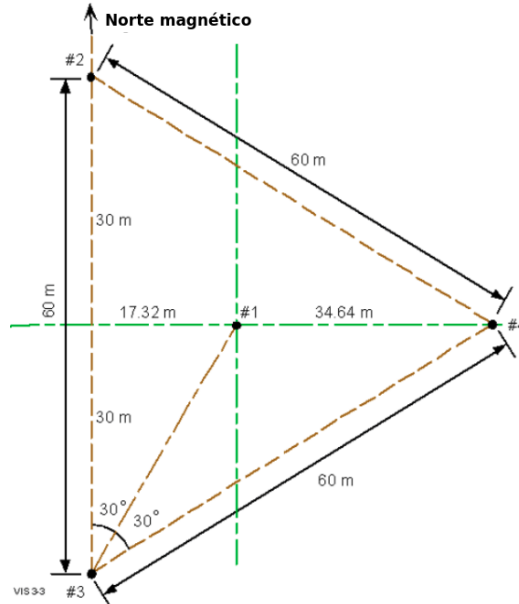


Figura 2.3: Orientación del arreglo de antenas receptoras de la digisonda DPS-4. Fuente: <http://jro.igp.gob.pe/digisonde/dps4text.htm>.

2.1.3. Ionosonda VIPIR

La ionosonda VIPIR del ROJ consiste en una antena log-periodic de banda ancha (ver figura superior de 2.4) que envía pulsos de onda de radio que se propagan verticalmente, por medio de un transmisor de potencia pico de 4 kW que barre su frecuencia de 0.3 a 25.0 MHz. Los pulsos transmitidos tienen una longitud de $70\mu s$ (10.5 km), afiliados con un pulso coseno elevado. La detección de los pulsos reflejados se realiza mediante 8 dipolos cortos (ver figura inferior de 2.4) conectados a 8 receptores. Las antenas receptoras forman dos conjuntos de líneas de base interferométricas ortogonales, en las direcciones noroeste y noreste, que se utilizarán para detectar el ángulo de llegada de las ondas de radio reflejadas. Las antenas en las líneas de base del noroeste están polarizadas en la dirección norte-oeste, mientras que las antenas en las líneas de base del noreste están polarizadas en la dirección norte-este [1]. Las imágenes (ESR, POWER, SNR, OX), ionogramas (ngi) y archivos escalados (SAO) están disponibles para descargar en <http://lisn.igp.gob.pe/>.

2.1.4. Ionogramas

La digisona DPS-4 genera ionogramas que muestran la altura virtual de los ecos correspondientes en las frecuencias de las señales transmitidas. Para cada altura virtual (o rango) y frecuencia transmitida almacena medidas de amplitud (que son mostradas como intensidad) y polarización de la onda. La figura 2.5 muestra un ionograma típico en horas del día de Jicamarca. Los píxeles de la tonalidad roja representan los ecos de la onda ordinaria y los ecos de la tonalidad verde los ecos de la onda extraordinaria provenientes del sondeo vertical. Se observan los ecos de las capas E, F1 y F2, así como ecos del electrochorro ecuatorial. La onda ordinaria (extraordinaria) hace referencia a la polarización de la onda, es decir, es aquella en la que el campo eléctrico es paralelo (perpendicular) al campo magnético terrestre. Además se muestra el perfil de densidad de electrones $N(h)$ calculado automáticamente por la digisona (a partir de la traza de la onda ordinaria) luego de su escalado automático. El proceso de escalado en los ionogramas consiste en identificar las trazas o curvas que representan los ecos provenientes de las distintas capas de la ionósfera. El proceso de escalado es importante pues a partir de información de la curva escalada distintos modelos son capaces de estimar información física relevante como un perfil de la densidad de electrones. El software de la digisona llamado ARTIST (el DPS-4 del ROJ utiliza la versión 4 del ARTIST) escala los ionogramas e identifica automáticamente los parámetros de interés, por ejemplo calcula la frecuencia crítica de la capa F2,

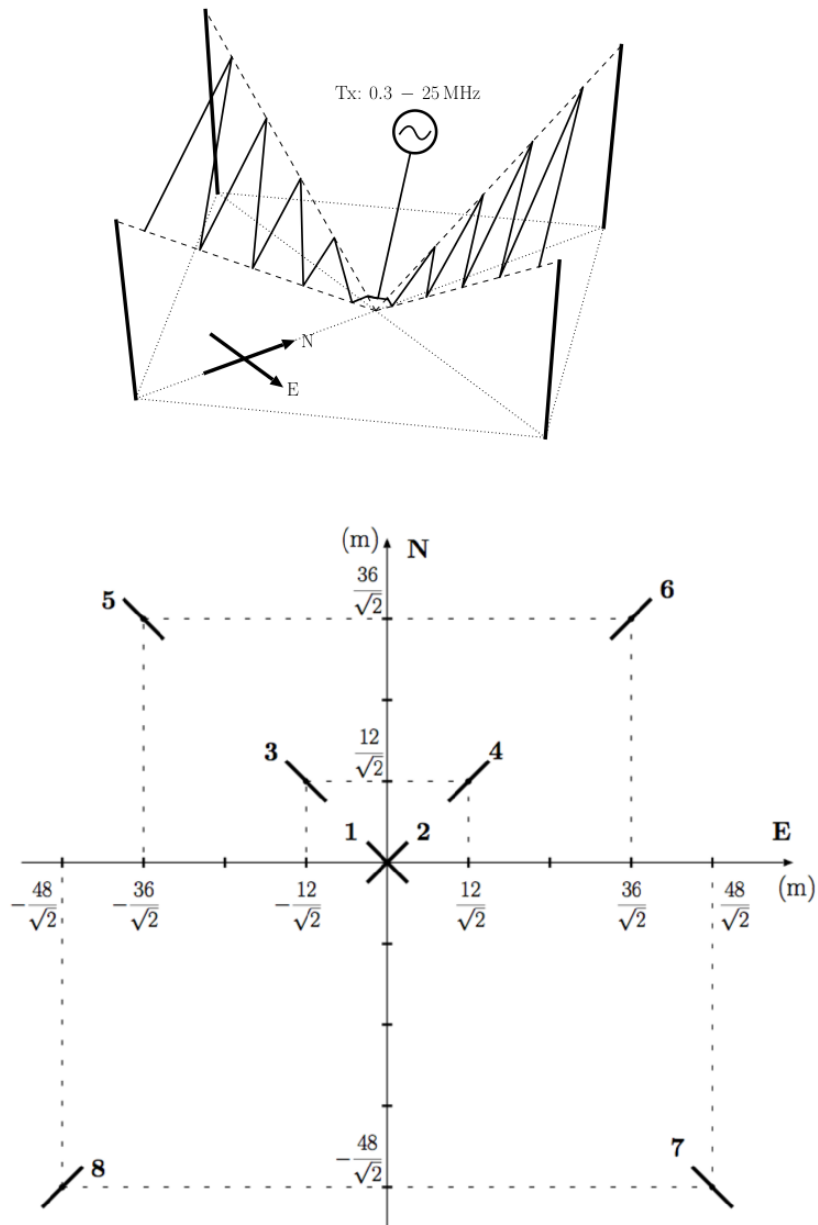


Figura 2.4: Antena transmisora log-periodic de banda ancha (arriba) y antena receptora, arreglo de 8 dipolos de la ionosonda VIPIR (abajo). Fuente: Reyes [1].

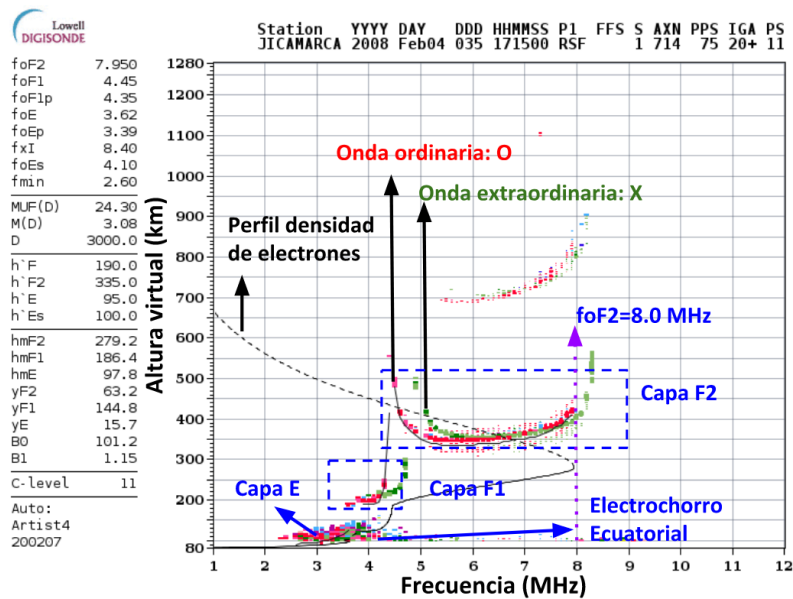


Figura 2.5: Ionograma típico en horas del día sobre el ROJ, registrado con la DPS-4 el 04/02/2008 a las 17:15:00 UT. Fuente: <http://digisonde.igp.gob.pe/>.

es decir la frecuencia máxima a la que se reciben ecos de la capa F2, foF2. Este parámetro le permite estimar el perfil de densidad de electrones. De igual forma se tiene las frecuencias críticas de las capas F1 y E, denotadas por foF1 y foE. Asimismo las alturas virtuales de dichas capas vienen a ser las alturas mínimas a las que se reciben los ecos, denotadas por h'F1, h'F2 y h'E.

La figura 2.6 muestra un ionograma típico en horas de las noches del ROJ cuando se presenta un fenómeno llamado F dispersa, cuyos ionogramas se caracterizan por mostrar ecos dispersos para las distintas frecuencias.

2.1.5. Parámetros de interés de las capas E esporádicas Blanketing: h'Es, fbEs y foEs

El manual de la U.R.S.I. (International Union of Radio Science) contiene las reglas estándar acordadas para la interpretación de ionogramas, así como las técnicas y nomenclaturas para el escalado de estos [36, 37].

Los siguientes parámetros son normalmente escalados para las capas *Es*, estos se muestran en la figura 2.7

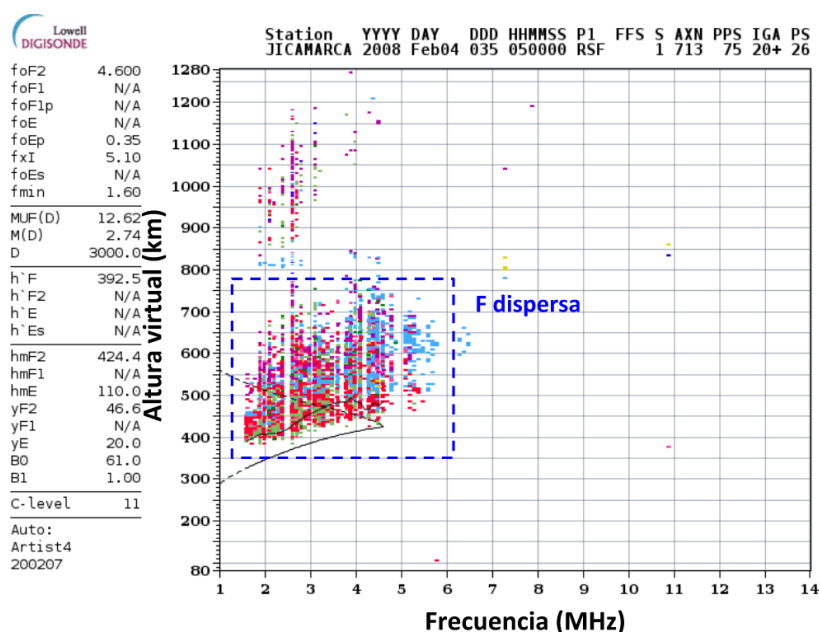


Figura 2.6: Ionograma típico en horas de las noches del ROJ en presencia de F dispersa, registrado con la DPS-4 el 04/02/2008 a las 05:00:00 UT. Fuente: <http://digisonde.igp.gob.pe/>.

- foEs: La frecuencia superior de la onda ordinaria correspondiente a la frecuencia más alta en la que se observa una traza E esporádica principalmente continua.
- h'Es: La altura virtual más baja de la traza usada para identificar la traza de la capa *Es*.
- fbEs: La frecuencia de blanketing de una capa *Es*, es decir la frecuencia de la onda ordinaria en que la capa *Es* empieza a ser transparente. Esto es usualmente determinado de la frecuencia mínima en que las reflexiones de la onda ordinaria de la capa F son observadas. Por razones prácticas la frecuencia de blanketing fbEs y la altura virtual h'Es debe siempre referirse a la componente de la onda ordinaria.

Obtención de ionogramas crudos

Se implementó el script *grm2txt.py* en python para desempaquetar los archivos binarios .GRM que contienen la información de los ionogramas crudos y sin umbralizar. El formato de los archivos .GRM se encuentra en el manual de la digisonda y se muestra un esquema del mismo en la figura 2.8. Los archivos

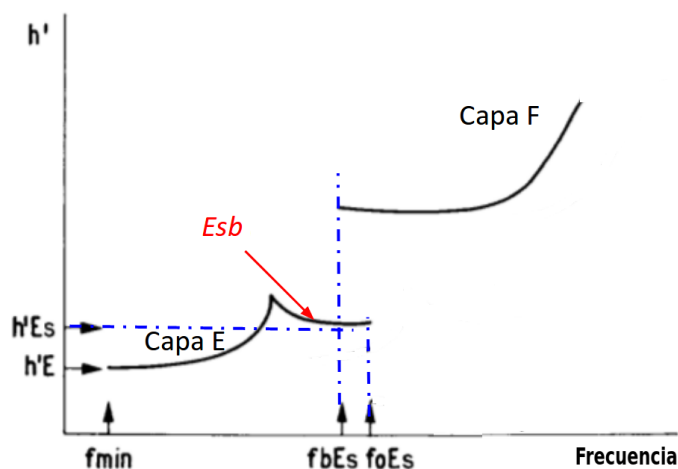


Figura 2.7: Parámetros de las capas E_s a ser escaladas. Fuente: Modificado de Piggott y Rawer [36].

.GRM son archivos binarios que empaquetan los ionogramas en los formatos MMM, RSF y SBF. Estos formatos consisten en bloques consecutivos de 4096 bytes, cada bloque contiene un header y grupos de frecuencia, cada grupo de frecuencia contiene un prelude el cual contiene información de la polarización, la frecuencia leída, la ganancia adicional, a continuación de cada prelude vienen los bins que dependiendo del formato contienen información de la amplitud, de la fase, el número doppler o el azimuth. Para mayor información de estos formatos, revisar el manual de la digisonda DPS-4D (http://www.digisonde.com/pdfs/Digisonde4DManual_LDI-web1-2-6.pdf).

En la figura 2.9 se visualiza un ionograma sin procesar y sin umbralizar leído y desempquetado con el script *grm2txt.py* (solo se visualizan los ecos de la onda ordinaria). La figura 2.10 muestra el respectivo ionograma visualizado con el programa SAO-XPLORER. Se puede notar la presencia de interferencias en el ionograma sin umbralizar.

El script *grm2txt.py* permite obtener sin mayor problema los ionogramas con bloques en formato .RSF, y .SBF. los ionogramas generados por la digisonda a partir de abril del 2001 tienen formatos .RSF o .SBF. Los ionogramas de años anteriores al 2001 tienen el formato .MMM debido a que en este año se realizó una actualización del sistema digisonda del ROJ. En esta tesis solo consideraremos los ionogramas a partir del 2001 con el fin de comparar ionogramas registrados con el mismo sistema. Los formatos se diferencian en

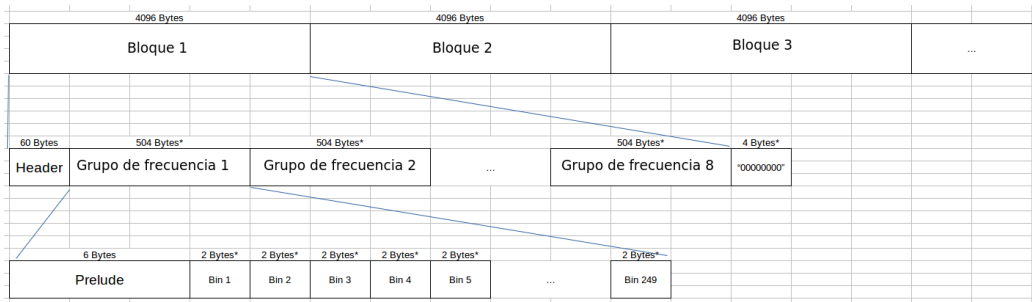


Figura 2.8: Esquema de una posible configuración de un archivo .GRM con bloques en formato .RSF. Los asteriscos indican que dichos tamaños pueden variar dependiendo de los parámetros que contiene el Header y el Prelude.

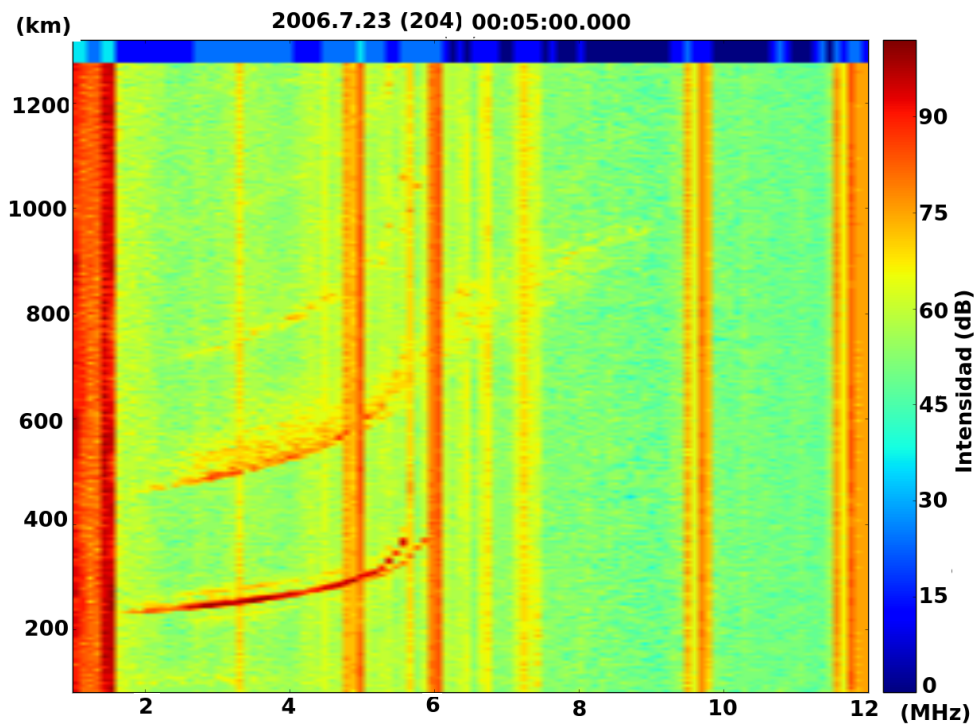


Figura 2.9: Visualización de ionograma sin procesar y no umbralizado del día 23 de Julio del 2006 registrado a las 00:05:00.000 horas UTC usando el script grm2txt.py. Solo se visualizan los ecos de la onda ordinaria

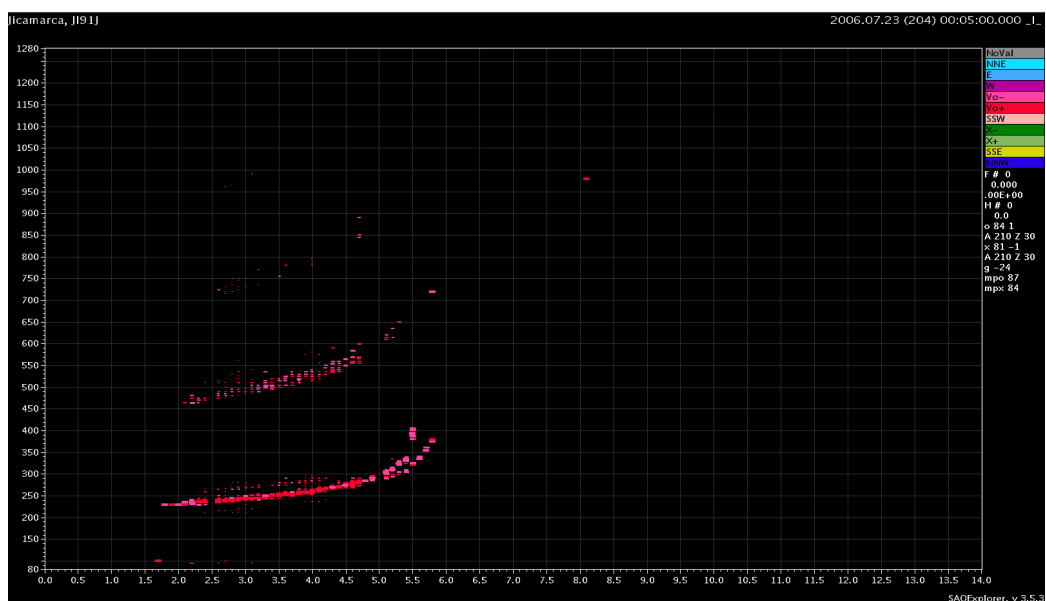


Figura 2.10: Visualización de ionograma sin procesar y umbralizado del día 23 de Julio del 2006 registrado a las 00:05:00.000 horas UTC usando el programa SAO-XPLORER. Solo se visualizan los ecos de la onda ordinaria de incidencia vertical.

cuanto a la interpretación de los bins.

Ionogramas disponibles

El número de días con ionogramas disponibles para cada mes y año registrados por la digisonda del ROJ desde 1993 hasta el 2018, se muestran en la figura 2.11.

2.2. Elección de métodos y algoritmos de procesamiento

Considerando que la digisonda DPS-4 registra datos desde el año 1993, se tiene data de alrededor de 25 años, y como en casi todos los días se tiene registros de cada 15 minutos, entonces se tienen alrededor de 876000 ionogramas. Además, suponiendo que los eventos E esporádicos de tipo blanketing buscados pueden ocurrir en cualquier momento del día se debe hacer una búsqueda por cada ionograma. En lugar de realizar la identificación y búsqueda de forma visual, se optó por implementar técnicas de procesamiento de imágenes e implementar un algoritmo para la identificación de las *Esb*. Además se decidió usar la tecnología de procesamiento paralelo en unidad de procesamiento gráfico (GPU por sus siglas en inglés, Graphics Processing Unit) en el lenguaje CUDA de las tarjetas Nvidia, este último a fin de probar este tipo de tecnologías y minimizar el tiempo de procesamiento. Se utilizó la versión CUDA 9.0 y la tarjeta gráfica GTX 1080, la cual tiene 20 Streaming Multiprocessors y 2560 CUDA cores y 8 GB de memoria. El procesador usado fue Intel(R) Core(TM) i5-4670 CPU @ 3.40GHz.

Los métodos que se implementaron son los siguientes y están basados en las siguientes referencias.

- C-medias difuso o Fuzzy C Means implementado en CUDA:
 - Ghosh y Berkey [38]
 - Ghosh y Kumar [39]
 - Matloff [40]
- Análisis de Componentes Principales en python:
 - Ghosh y Berkey [38]

Inventory information for JI91J JICAMARCA													1980.01.01 2	
JI91J JICAMARCA													1980.01.01 2018.12.17	
Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec		
1993					11	31	29	31	30	27				
1994	31	28	31	30	31	29	28	31	24	29	30	31		
1995	31	28	30	30	31	7		9	26	29	31			
1996	26	27	31	30	31	28	24	24	30	31	30	31		
1997	21	28	26	29	31	30	31	31	30	30		21		
1998	31	26	27	29	29	23	26	21	29	30	28	26		
1999	29	25	25	28	28	28	31	30	28	28	29	28		
2000	19	29	31	20										
2001				25	25	31	30	31	30	31				
2002	31	27	31	30	31	30	28	31	30	31	30	29		
2003	31	28	30	30	31	29	28	31	28	31	30	31		
2004	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31		
2005	31	28	27	30	31	30	31	31	30	31	28	31		
2006	31	24	30	30	31	30	30	31	30	31	30	31		
2007	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31		
2008	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31		
2009	29	27	31	30	31	29	28	31	20	31	30	31		
2010	29	28	31	30	31	30	6		4	30	31			
2011	31	28	30	30	9	30	31	31	27	31	30	29		
2012	31	29	31	30	31	30	31	31	30	29	30	31		
2013	31	25	23	30	27	28	31	31	30	28	26	31		
2014	31	17	31	30	31	30	31	31	30	27	30	24		
2015	26	28	31	28	29	28	31	30	30	31	30	31		
2016	19	26	31	29	30	30	29	31	28	28	29	31		
2017	31	28	31	24	24	21	12	29	27	31	28	31		
2018	27	3	24	30	31	30	31	28	30	29	30	17		

Figura 2.11: Número de días con ionogramas disponibles de la DPS-4.

- Jackson [41]
- Modelo de rotores en python:
 - Galkin y cols. [42]
 - Galkin y cols. [30]

2.3. Métodos y algoritmos

La figura 2.12 muestra un esquema del algoritmo desarrollado para la identificación de las capas *Esb*. El input inicial vienen a ser los ionogramas umbralizados de las ondas ordinarias del sondeo vertical. Umbralizados significa que los píxeles cuyo valor menor a un valor umbral son reemplazados por cero. Los píxeles de los ionogramas almacenan valores de la amplitud, y el valor umbral para cada frecuencia (para cada columna) viene a ser $MPA + 6$, donde MPA es la amplitud más probable y es dado en cada Prelude. De cada ionograma, considerado una matriz o imagen, se obtendrán dos subimágenes, que vendrían a ser las regiones E y F de cada ionograma.

El rango considerado para la región E ha sido entre 80 y 180 km. El rango de la región F ha sido considerado dependiendo de la hora del día, entre las 10:00 y las 16:00 horas LT se ha considerado un rango de 160 a 680 km y en el resto de horas entre 180 a 700 km, esto es debido a que la región F de la ionósfera tiende a tener su límite inferior menor en el día que durante la noche. El tamaño en píxeles para cada región son 20 filas x 73 columnas para la región E y 104 filas x 73 columnas para la región F. Se debe tener en cuenta que la altura inicial de los ionogramas ha sido tomada en 80 km en pasos de 5 km y la frecuencia inicial ha sido tomada en 1.0 MHz en pasos de 0.1 MHz. Para los ionogramas cuyo rango ha sido registrado en pasos de 2.5 km, o cuyo rango inicial ha sido 90 km, o cuyos pasos de frecuencia han sido 0.05 MHz o frecuencia inicial ha sido 1.5 MHz, se ha hecho el escalado necesario para llevarla a las condiciones antes mencionadas, ya sea agregando o quitando filas, o tomando solo las columnas pares.

Se han aplicado los siguientes algoritmos para cada región, en el orden en el que aparecen en la figura 2.12.

- | |
|-------------------|
| Entrada: Región E |
|-------------------|

 y

Salida: Eventos con capas <i>Es</i>

 - Segmentación: Fuzzy C Means (FCM)
 - Identificación: Análisis de Componentes Principales (ACP)
 - Modelo de clasificación: Bosques aleatorios

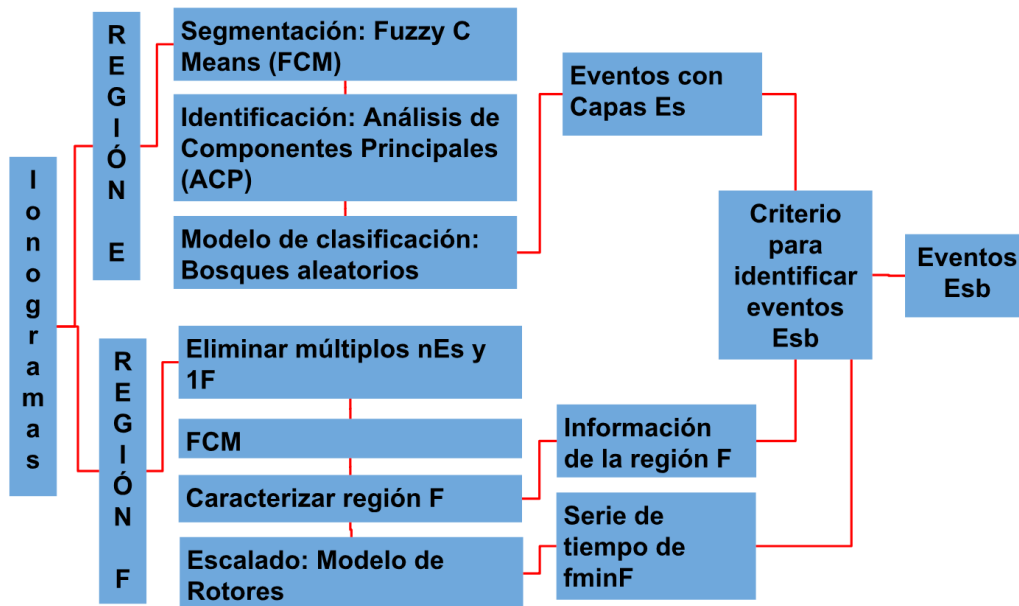


Figura 2.12: Esquema del algoritmo de identificación de las capas Esb.

- | |
|-------------------|
| Entrada: Región F |
|-------------------|

 y

Salidas: Información de la región F y serie de tiempo de fminF
--

 - Eliminación de múltiples nEs y 1F
 - Segmentación: Fuzzy C Means (FCM)
 - Caracterización de Región F
 - Escalado: Modelo de rotores

Las tres salidas anteriores (Eventos con capas *Es*, información de la región F y serie de tiempo de fminF) ingresarán a un criterio propuesto para la identificación de las capas *Esb*, obteniendo finalmente la ocurrencia de los eventos *Esb* y sus parámetros de interés (*h'Es* y *fbEs*).

2.3.1. Fuzzy C Means

Fuzzy C Means o C medias difuso es un algoritmo de aprendizaje no supervisado. Este algoritmo es usado para segmentar o separar en clusters o grupos un conjunto de puntos de datos de entrada basado en la distancia de cada punto con el centroide de cada grupo, minimizando iterativamente una función de error mínimo cuadrático. Este algoritmo se utiliza para el análisis basado en la distancia entre varios puntos de datos de entrada. Los grupos se forman según la distancia entre los puntos de datos y los centros del grupo se forman para cada grupo. El algoritmo se resume a continuación:

Sea $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ un subconjunto del espacio \mathbb{R}^3 , donde x_{kj} es la j -ésima componente ($j = 1, 2, 3$) del k -ésimo dato ($k = 1, 2, \dots, n$) y c un entero positivo mayor que 1 que será el número de clusters esperados y m un valor fijo ($m = 2$ en nuestro caso), sea $\nu = (\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots, \nu_c)$ el conjunto de los centroides, donde ν_{ij} es la j -ésima componente del centroide del grupo i ($i = 1, 2, \dots, c$), y sea $U = [\mu_{ik}]_{c \times n}$ la matriz de partición donde μ_{ik} es el grado de pertenencia del k -ésimo dato al grupo i .

- PASO 1: Inicializamos la matriz de partición $U^{(0)}$, cada paso de este algoritmo será etiquetado como r , donde $r = 0, 1, 2, \dots$
- PASO 2: Calcular los centros de los grupos para cada paso con:

$$\nu_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^m x_{kj}}{\sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^m}. \quad (2.3.1)$$

- PASO 3: Calcular la matriz de distancias $D_{[c,n]}$:

$$d_{ik} = \|x_k - \nu_i\|. \quad (2.3.2)$$

- PASO 4: Actualizar la matriz de partición para el r^{th} ésimo paso, con

$$\mu_{ik} = \frac{1}{(\sum_{j=1}^c d_{ik}^r / d_{jk}^r)^{\frac{2}{m-1}}}. \quad (2.3.3)$$

Si se cumple un criterio de parada, entonces regresamos al paso 2, actualizando los centroides y los grados de pertenencia iterativamente. El criterio de parada usado es

$$\|U^{(K+1)} - U^{(K)}\| < \delta, \quad (2.3.4)$$

donde δ toma el valor de 0.225, lo cual indica que la variación de la matriz de pertenencia es muy pequeña.

En este caso, los elementos del conjunto X, son $x_i=(\text{fila}, \text{columna}, \text{amplitud})$ de cada píxel de la imagen. Teniendo en cuenta que las componentes de X están en diferentes escalas, es necesario realizar un escalado estándar, es decir restarle la media y dividirla entre la desviación estándar, antes de que ingrese al algoritmo del FCM. Para fines prácticos se multiplicó por 10 a la transformación del escalado estándar. Una característica de este algoritmo FCM es que cada elemento tiene cierto grado de pertenencia a cada cluster o grupo. Tal como se indicó anteriormente μ_{ik} es el grado de pertenencia del k-ésimo elemento al cluster i. En este trabajo, se utilizó el máximo grado de pertenencia para definir la pertenencia de cada elemento a cada cluster, por lo que siendo más específicos se ha utilizado el método K-Means o K medias.

El objetivo de aplicar esta segmentación a la región E de los ionogramas es separar los ecos de las capas *Es* de los ecos del electrochorro ecuatorial, los primeros se caracterizan por ser más intensos y no dispersos. La figura 2.13 muestra en la parte izquierda superior un ionograma registrado el 16/02/2008 a las 20:00:00 horas; en la parte central se muestra la segmentación en 5 clusters a la región E del ionograma (en este caso tomada desde 80 a 145 km), se observa que los ecos de la capa *Esb* se obtienen en el segundo cluster y en el resto de clusters se obtienen ecos del electrochorro ecuatorial. Los ecos de las capas *Esb* se presentan más intensas que los ecos del EEJ. Los ecos del EEJ se presentan dispersos.

Paralelización del método Fuzzy C Means para segmentar las regiones E y F de varios ionogramas en simultáneo

Se ha paralelizado el algoritmo Fuzzy C Means para más de una imagen, haciendo las siguientes variaciones, respecto a lo implementado anteriormente:

- Se crea una Imagen Base que contiene 84 subimágenes (distribuidos en 6 subimágenes por cada fila y 14 subimágenes por cada columna), cada subimagen representa la sección del ionograma donde se encuentra la región E (o F) de su respectivo ionograma (ver figura 2.14).
- El conjunto de datos a ser segmentados: X es de dimensión $S=3$, donde cada elemento almacena las características (fila del píxel en la subimagen, columna del píxel en la subimagen, intensidad del píxel), se escogió pasar la data con este formato a fin de evitar pasar la data como una matriz (pasar la subimagen tal cual) para no saturar la memoria de la GPU al cargar innecesariamente píxeles vacíos.
- Al momento de lanzar los bloques de hilos se optó por lanzar un bloque

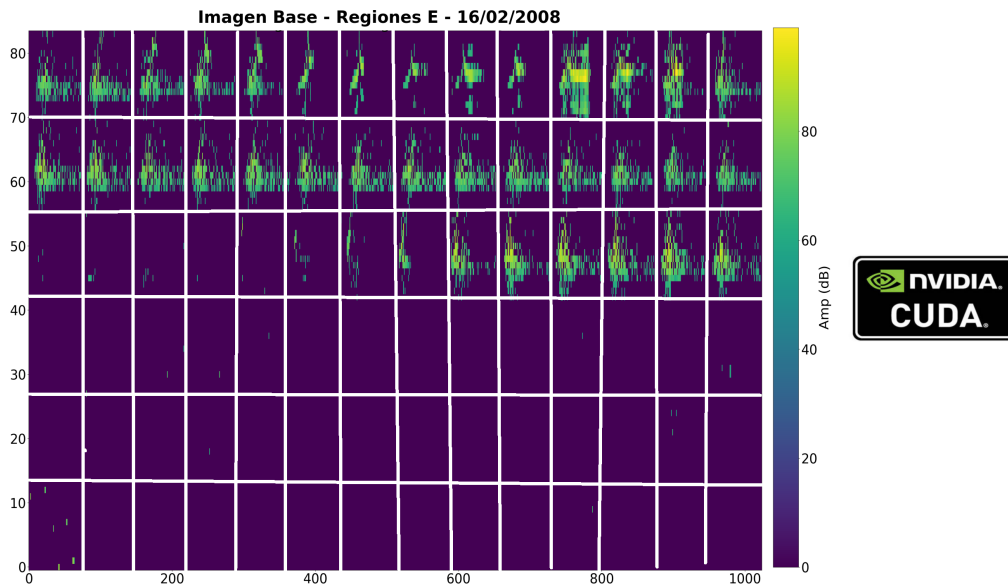


Figura 2.14: Imagen Base de 84 subimágenes (Regiones E de ionogramas) del día 16/02/2008 desde las 00:00 hasta las 20:45 horas.

de hilo por cada subimagen. Seguidamente el algoritmo FCM es aplicado para cada subimagen. De esta forma con una GPU (Nvidia GTX 1080) de 20 Streaming Multiprocessors, se pueden segmentar 20 subimágenes en simultáneo.

- Para el criterio de parada, es decir para el cual el algoritmo FCM se detiene, se optó por detener el método FCM cuando TODAS las subimágenes que contienen al menos 5 píxeles (5 elementos) contienen un error menor al delta dado (ver expresión 2.3.4 para $\delta = 0.225$).

Se han implementado los programas `IdentifyEs1.X.Y.cu` y `load_iono_identify1.X.Y.cu` que generan el ejecutable `fcm-Eregion.out`, el cual se encarga de segmentar la región E de los ionogramas en bloques de 84 subimágenes en paralelo. La figura 2.14 muestra la imagen base de 84 subimágenes (regiones E de 84 ionogramas), en este caso han sido segmentadas en 5 clusters (figura 2.15). Por ejemplo en el cluster 1 de la imagen base se obtienen los ecos de la capa *Es* de una de las subimágenes.

De igual forma se han implementado los programas `Identify-F-RegionX.Y.cu` y `load_iono_identify-F-Region1.X.Y.cu` que generan el ejecutable `fcm-Fregion.out` que segmentan las regiones F de los ionogramas. Para la segmentación de la

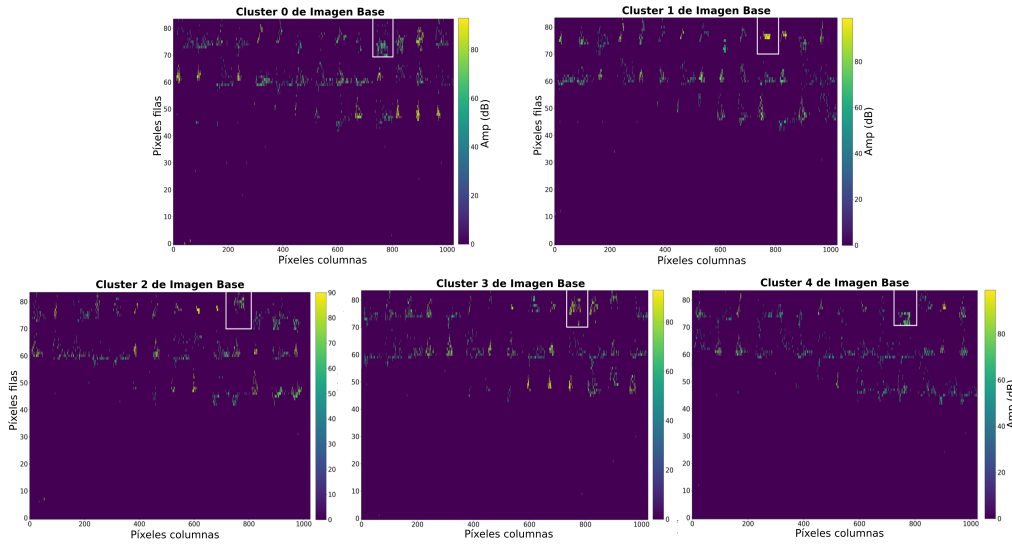


Figura 2.15: Segmentación en 5 cluster de la Imagen Base aplicando Fuzzy C Means. En el cluster 1 de la imagen base se ha obtenido los ecos de la capa *Es* de una de las subimágenes.

región E y F final se usó $c=8$, es decir 8 clusters o grupos en la segmentación.

2.3.2. Análisis de Componentes Principales

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es un método de aprendizaje no supervisado. Este método es muy usado para reconocimiento de patrones y describir un conjunto de datos en una nueva base de menor dimensionalidad sin perder información significativa. El método consiste en hallar la matriz de covarianza de los datos centrados y calcular los vectores propios que vendrían a ser las componentes principales y sus respectivos valores propios miden el grado de dispersión en cada componente principal. En nuestro caso lo aplicaremos al caso más sencillo en \mathbb{R}^2 para obtener los ejes de máxima dispersión.

A continuación mostramos el teorema que nos permite obtener las componentes principales y sus propiedades:

Sean nuestros datos un conjunto $(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{x}_3, \dots, \vec{x}_n)$ de n vectores en \mathbb{R}^m , y sea el vector $\vec{u} = \frac{1}{n}(\vec{x}_1 + \vec{x}_2 + \vec{x}_3 + \dots + \vec{x}_n)$ que almacena la media de todos los n vectores (cada vector tiene m componentes), es común centrar los datos tal que la media sea cero, esto se consigue restando el vector \vec{u} a cada vector

\vec{x}_i .

Sea B la matriz $m \times n$ cuya i -ésima columna es $\vec{x}_i - \vec{u}$:

$$B = \begin{bmatrix} x_{11} - u_1 & x_{21} - u_1 & \dots & x_{n1} - u_1 \\ x_{12} - u_2 & x_{22} - u_2 & \dots & x_{n2} - u_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{1m} - u_m & x_{2m} - u_m & \dots & x_{nm} - u_m \end{bmatrix} \quad (2.3.5)$$

Sea la matriz de covarianza definida como:

$$S = \frac{1}{n-1}(BB^T) \quad (2.3.6)$$

Debido a que S es una matriz $m \times m$ simétrica, esta puede ser ortogonalmente diagonalizada, sean λ_i los vectores propios:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_m \geq 0 \quad (2.3.7)$$

de S , tal que (en orden decreciente) con sus correspondientes vectores propios $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_m$. Esos eigenvectores son llamados las componentes principales del conjunto de datos.

Observación: Sea T la traza de S , la cual viene a ser la suma de las varianzas de las m variables y debido a la conservación de la varianza total, se tiene que la dirección en \mathbb{R}^m dada por \vec{u}_1 , la primera componente principal, “explica” o “representa” una cantidad $\frac{\lambda_1}{T}$ del total de la varianza, de igual forma, \vec{u}_2 “explica” una cantidad $\frac{\lambda_2}{T}$ del total de la varianza, y así sucesivamente [43, 44].

Considerando los clusters obtenidos luego de aplicar el FCM a cada subimagen (ver figura 2.16) y considerando cada elemento como las coordenadas de cada píxel en la subimagen (es decir $xi=(columna, fila)$ del i -ésimo píxel de la subimagen) se calcula los vectores propios que representan los nuevos ejes luego de realizar una rotación de coordenadas para conseguir los ejes donde la dispersión es máxima, además el valor propio del vector propio correspondiente al eje de mínima dispersión (V_2) representa una medida del ancho de la capa E_s si hubiera.

2.3.3. Bosques aleatorios

Random Forest Classification o bosques aleatorios de clasificación es un método de aprendizaje supervisado que se caracteriza por la formación de

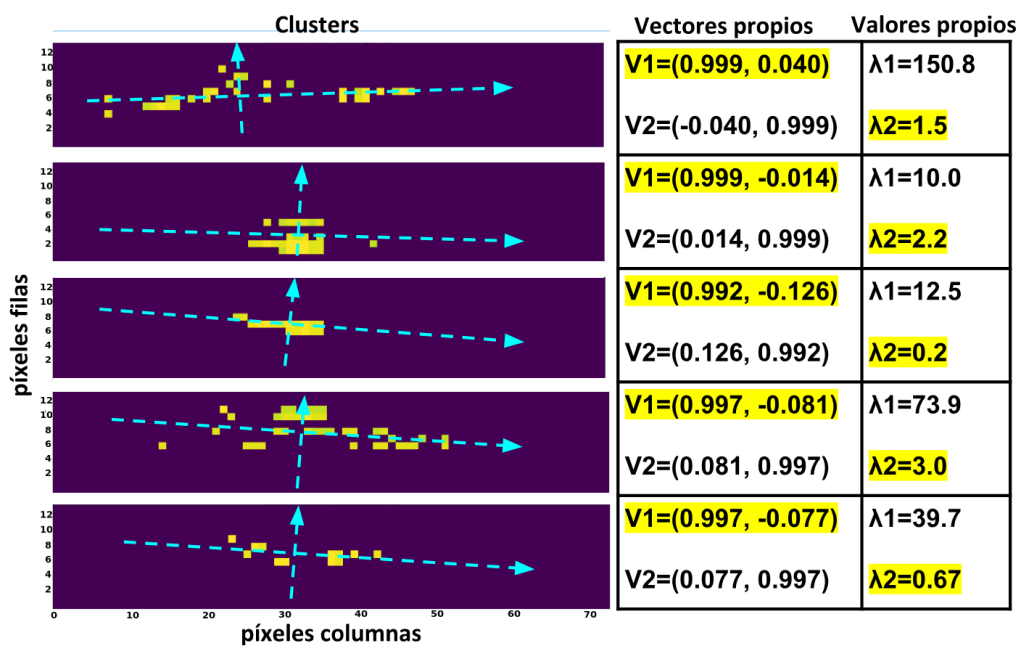


Figura 2.16: Análisis de Componentes Principales para cada cluster. Vectores propios son las componentes principales y los valores propios miden el grado de dispersión en cada componente.

como un parámetro $pc3$ (que será descrito más adelante) que da una medida de que tan juntos o compactos están los ecos en un eje para cada cluster de la región E. A continuación se describen las variables explicativas del modelo para identificar capas E esporádicas.

Esta versión del FCM requiere un número de clusters “ c ” predeterminado. Entonces puede ocurrir que en el proceso de segmentación se tenga los ecos pertenecientes a la capa Esb en un solo cluster (como es el caso de la figura 2.16). Sin embargo, para nuestro caso donde hemos escogido $c = 8$ se puede dar que los ecos de la capa Esb se obtengan en dos clusters distintos. Con el fin de reconstruir la capa Esb completa (o en su mayoría) se han combinado los clusters de 2 en 2 (esta combinación de dos clusters consiste en superponer dos clusters para generar uno nuevo). Teniendo en cuenta esta consideración, se procede a calcular las siguientes variables explicativas para cada cluster (cluster 0, cluster 1, ... , cluster 7) y cada grupo de clusters de dos en dos (clusters 0 y 1, clusters 0 y 2 , ..., clusters 6 y 7):

- *eigenvalor_minimo*: Este parámetro se obtiene del ACP, se refiere al mínimo valor propio del vector propio que es paralelo al eje de mínima dispersión, es decir λ_2 en la figura 2.16.
- *pend_eigenvector*: Este parámetro se obtiene del ACP, se refiere a la pendiente del vector propio del eje de máxima dispersión (V_1 en la figura 2.16).
- *pc3*: Este parámetro se describirá más adelante y mide que tan juntos o compactos están los píxeles en el eje X.
- *hEs*: Altura mínima a la que aparecen los píxeles en cada cluster (de la capa Es si hubiera).
- *Esright-Esleft*: Viene a ser una medida del ancho del cluster. *Esleft* (*Esright*) es calculado junto al parámetro $pc3$ y viene a ser el extremo izquierdo (derecho) de la *region_in* que se describirá más adelante.
- *num_pixeles_si*: Número total de píxeles de la subimagen (Región E).
- *perc_A_95/perc_Asi_95*: Es un parámetro que mide la tasa de intensidad máxima (en realidad son percentiles 95 de la distribución de sus amplitudes) del cluster con la subimagen. Este parámetro permite diferenciar los ecos de las capas Esb del electrochorro que suelen ser menos intensos cuando se superponen.

- $perc_A50/perc_Atot_hh_95$: Es un valor que mide la tasa de la mediana de la distribución de las amplitudes del cluster con el percentil 95 de la distribución de las amplitudes del grupo de subimágenes de la respectiva hora.
- $num_pixeles_si/num_pixeles_CCs$: Es un parámetro que mide la tasa del número de píxeles de la subimagen con el número de píxeles del cluster.
- $perc_Asi_50/perc_A50$: Es un parámetro que mide la tasa de la mediana de la distribución de amplitudes de la subimagen con la mediana de la distribución de amplitudes del cluster.

Los parámetros usados para entrenar el modelo de RandomForestClassifier fueron:

- `criterion='entropy'` ,
- `n_estimators = 3000`,
- `min_samples_leaf=5`,
- `max_depth = 6`.

Se ha implementado el script `pca_prueba_ionog1.X.Y.py` que aplica el método de Análisis de Componentes Principales a cada cluster y a sus combinaciones de 2 en 2 clusters de las regiones E obtenidas por el FCM. Se genera el fichero `PCA-Es_serieX.txt`, que tiene el formato mostrado en la figura 2.18, la hora y fecha se encuentra en UT. **La columna *Etiqueta Es* será 1 si se ha identificado una capa *Es* o será 0 si no**, además la columna `foEs` muestra el valor de la `foEs` estimado y `h'Es` muestra la altura mínima (en km) de la capa *Es* en caso esta estuviera presente. De esta forma tenemos la primera salida que nos identifica los ionogramas con capas *Es*.

Año	Día del año	hh	mm	ss	Etiqueta Es	foEs	h'Es	Año	Día del año	hh	mm	ss	Etiqueta Es	foEs	h'Es
2008	16	3	30	0	0	0	0	2008	16	14	0	0	0	0	0
2008	16	3	45	0	0	0	0	2008	16	14	15	0	0	0	0
2008	16	4	0	0	0	0	0	2008	16	14	30	0	0	0	0
2008	16	4	15	0	0	0	0	2008	16	14	45	0	0	0	0
2008	16	4	30	0	0	0	0	2008	16	15	0	0	0	0	0
2008	16	4	45	2	0	0	0	2008	16	15	15	0	0	0	0
2008	16	5	0	0	0	0	0	2008	16	15	30	0	1	72	105
2008	16	5	15	0	0	0	0	2008	16	15	45	0	0	72	0
2008	16	5	30	2	0	0	0	2008	16	16	0	0	0	0	0
2008	16	5	45	0	0	0	0	2008	16	16	15	3	0	0	0
2008	16	6	0	0	0	0	0	2008	16	16	30	0	1	72	100
2008	16	6	15	0	0	0	0	2008	16	16	45	0	0	72	0
2008	16	6	30	0	0	0	0	2008	16	17	0	0	0	72	0
2008	16	6	45	0	0	0	0	2008	16	17	15	0	0	0	0
2008	16	7	0	0	0	0	0	2008	16	17	30	0	1	69	100
2008	16	7	15	2	0	0	0	2008	16	17	45	0	0	72	0
2008	16	7	30	0	0	0	0	2008	16	18	0	0	0	72	0
2008	16	7	45	0	0	0	0	2008	16	18	15	0	0	72	0
2008	16	8	0	0	0	0	0	2008	16	18	30	0	0	0	0
2008	16	8	15	0	0	0	0	2008	16	18	45	0	0	72	0
2008	16	8	30	0	0	0	0	2008	16	19	0	0	0	0	0
2008	16	8	45	0	0	0	0	2008	16	19	15	0	0	0	0
2008	16	9	0	0	0	0	0	2008	16	19	30	0	0	0	0
2008	16	9	15	0	0	0	0	2008	16	19	45	0	0	0	0
2008	16	9	30	0	0	0	0	2008	16	20	0	0	0	68	0
2008	16	9	45	0	0	0	0	2008	16	20	15	0	0	70	0
2008	16	10	0	0	0	0	0	2008	16	20	30	0	0	0	0
2008	16	10	15	0	0	0	0	2008	16	20	45	0	0	0	0
2008	16	10	30	0	0	0	0	2008	16	21	0	0	0	0	0
2008	16	10	45	0	0	0	0	2008	16	21	15	0	0	0	0
2008	16	11	0	0	0	0	0	2008	16	21	30	0	0	0	0
2008	16	11	15	0	0	0	0	2008	16	21	45	0	0	0	0
2008	16	11	30	0	0	0	0	2008	16	22	0	0	0	0	0
2008	16	11	45	0	0	0	0	2008	16	22	15	0	0	0	0
2008	16	12	0	0	0	0	0	2008	16	22	30	0	0	0	0
2008	16	12	15	2	0	0	0	2008	16	22	45	0	0	0	0
2008	16	12	30	0	0	0	0	2008	16	23	0	2	0	35	0
2008	16	12	45	0	0	0	0	2008	16	23	15	1	0	0	0
2008	16	13	0	3	0	0	0	2008	16	23	30	0	0	0	0
2008	16	13	15	1	0	0	0	2008	16	23	45	0	0	0	0
2008	16	13	30	0	0	0	0	2008	17	0	0	0	0	0	0
2008	16	13	45	0	0	0	0	2008	17	0	15	0	0	0	0

Figura 2.18: Fichero PCA-Es_serieX.txt donde la columna Etiqueta *Es* será 1 si se ha identificado una capa *Es* o será 0 si no, además la columna foEs muestra el valor de la foEs estimado y h'Es muestra la altura mínima (en km) de la capa *Es* en caso estuviera presente.

2.3.4. Implementación de rutina para eliminar múltiplos de las capas *Es* (*nEs*) y el primer múltiplo de la capa F (**1F**)

A partir de este punto empezamos a ver los algoritmos para el procesamiento de la región F de los ionogramas (ver figura 2.12).

Los ionogramas suelen presentar trazas repetidas de las capas de la ionósfera que aparecen a una distancia que es múltiplo de la distancia de la capa original. Estos múltiplos se producen debido a las múltiples reflexiones que existe entre la capa ionosférica y la Tierra, razón por la que se suelen presentar al doble, triple, ... de distancia (en altura virtual) de la capa ionosférica original. Es importante, y suele ser todo un reto, identificar y eliminar los múltiplos de las capas *Esb*. Es importante eliminarlas pues al aparecer en la región F suelen confundir a los software de escalado automático. Y el reto para identificarlos viene debido a que muchas veces el múltiplo se superpone con los ecos de la parte inferior de la capa F. Por lo que de eliminar un aparente múltiplo de la capa *Es* que en realidad no lo sea, estaríamos eliminando parte de la región F y esta inadecuada eliminación podría parecer que se hubiera debido a la presencia de una capa *Es* blanketing. El algoritmo que aquí implementamos debe ser mejorado, a fin de mejorar la precisión del algoritmo de identificación de los eventos *Esb* aquí propuesto.

Filtro leakage, de 45 y 135 grados por ventana

Según Galkin y cols. [30] quienes describen algunos aspectos del Artist 5, sugieren un filtro leakage que consiste en establecer un valor umbral de la máxima amplitud menos 40 dB para cada frecuencia en el ionograma crudo (para cada columna), este filtro leakage se muestra en la figura 2.19-a. Los mismos autores aplican seguidamente un filtro de 45 grados para determinar los bordes (edges) de los ionogramas.

El filtro de 45 grados aplicado aquí, consiste en mantener únicamente el eco de máximo valor en ventanas continuas inclinadas 45 grados, el ancho de cada ventana es $D = 20$ píxeles, el filtro se realiza dos veces, la segunda vez con un corrimiento $d = 10$ píxeles (figura 2.20), los valores de las casillas representan los valores de los píxeles en los ionogramas.

Debe notarse que el filtro de 45 grados, permite salvar los ecos del lado derecho de las cúspides, tal como se muestra en la figura 2.19-b. Este filtro es adecuado cuando se pone énfasis en la obtención de la frecuencia crítica de la capa F2 (f_oF2), sin embargo, si el interés es la obtención de la frecuencia

mínima de la capa F (f_{minF}) este filtro solo no es adecuado pues se pierden ecos en el lado izquierdo de la cúspide. Con el fin de salvar los ecos de la cúspide se procede a aplicar una variación del filtro de 45 grados, al que se le ha llamado filtro de 135 grados, con el mismo procedimiento pero con una inclinación de 135 grados.

La figura 2.19-c muestra la aplicación del filtro de 45 y 135 grados por ventana, se observa que ambos lados de la cúspide se mantienen en buena medida.

Función en python para eliminar el primer múltiplo de la capa F (1F) y los n-ésimos múltiplos de las capas E_s (nE_s)

Basándonos en una variación del método usado por Tang y cols. [46] para identificar los ecos de los múltiplos de las capas E_s (nE_s), procedemos a buscar los múltiplos de las capas E_s de la siguiente forma. Para cada frecuencia, es decir para cada columna, se tendrá un perfil de alturas como se muestra en la figura 2.21, distinguiendo dos regiones:

- Región E: Entre 80 y 155 km. La altura de la capa E_s ($h0E_s$) estará entre 0 y 15 píxeles.
- Región F: Entre 160 y 695 km. La altura de los n-ésimos múltiplos E_s (h_nE_s , $n \geq 1$) estarán entre 0 y 91 píxeles.

En la figura 2.21, la columna Tags, resaltada con amarillo, muestra las posibles alturas donde se podría encontrar los múltiplos de la capa E_s , asumiendo que la altura de la capa E_s se registra a una altura de 100 km (con un ancho en píxeles de $w = 1$) o en píxeles $h0E_s = 4$, por tanto el primer múltiplo se espera que aparezca en 200 o 205 km (o en píxeles en $h1E_s = 2 * h0E_s + j$, $j = 0, +1$, en este caso $h1E_s = 9$). Debido a la escala de las alturas solo algunos ecos en el rango máximo que presenta el múltiplo serán etiquetados (marcados con x en la figura), de tal forma que para mejorar la búsqueda del siguiente múltiplo, se debe partir considerando la altura (en píxeles) del múltiplo anterior, entonces $h2E_s = (3.0/2) * h1E_s + (32.0/2) + j$ con $j = 0, +1$, en este caso $h2E_s = 29$ y 30, para el siguiente múltiplo tenemos $h3E_s = (4.0/3) * h2E_s + (32.0/3) + j$ con $j = 0, +1$, para cada $h2E_s$, en este caso $h3E_s = 50$.

Generalizando:

$$h_{n+1}E_s = A_n * h_nE_s + B_n, \quad (2.3.8)$$

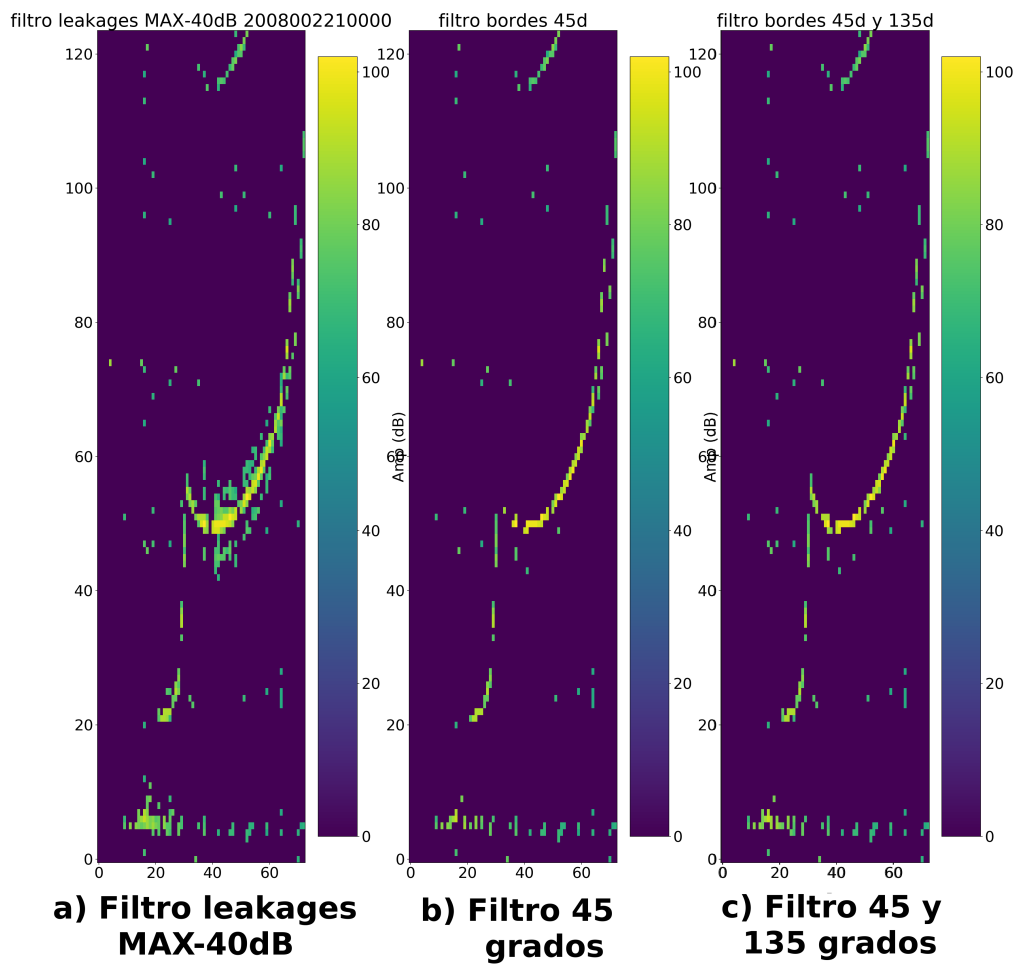


Figura 2.19: Ionograma registrado 02/01/2008 a las 21:00 horas UT. a) Umbralizado para cada frecuencia (Max-40dB), b) Filtro de 45 grados y c) Filtro de 135 grados.

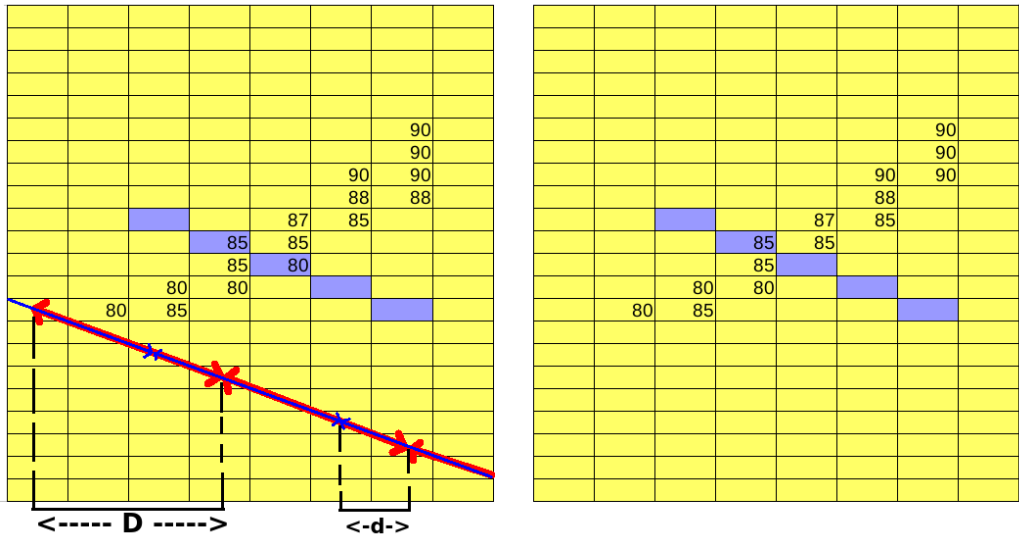


Figura 2.20: Esquema de la aplicación del filtro de 45 grados por ventanas de ancho “D” píxeles con desplazamiento “d” píxeles. Este filtro consiste en conservar el máximo valor en cada ventana.

donde

$$A_n = \frac{n + 2}{n + 1} \quad (2.3.9)$$

y

$$B_n = \frac{32}{n + 1} * \delta(n > 0) \quad (2.3.10)$$

y $\delta(n > 0)$ es cero si $n = 0$ y es 1 para n mayor a cero.

De esta forma se puede buscar los ecos pertenecientes a los múltiplos de las capas E_s en cada paso de frecuencia y para distintos tipos de E_s . La condición que se ha puesto para identificar y eliminar el siguiente múltiplo a partir del actual es que al menos se haya encontrado 5 ecos en el múltiplo buscado. De forma similar se elimina el primer múltiplo de la capa F (1F).

La figura 2.22 muestra el resultado de aplicar el algoritmo a un evento de blanketing total donde se aprecian hasta 5 múltiplos. Todos son detectados y eliminados. En 2.22-a muestra un primer filtro, llamado filtro leakages que consiste en umbralizar para cada columna teniendo como umbral el máximo de la columna menos 40. En 2.22-b se ha aplicado el filtro de 45 grados. En 2.22-c se aplica el algoritmo que elimina el primer múltiplo de la capa

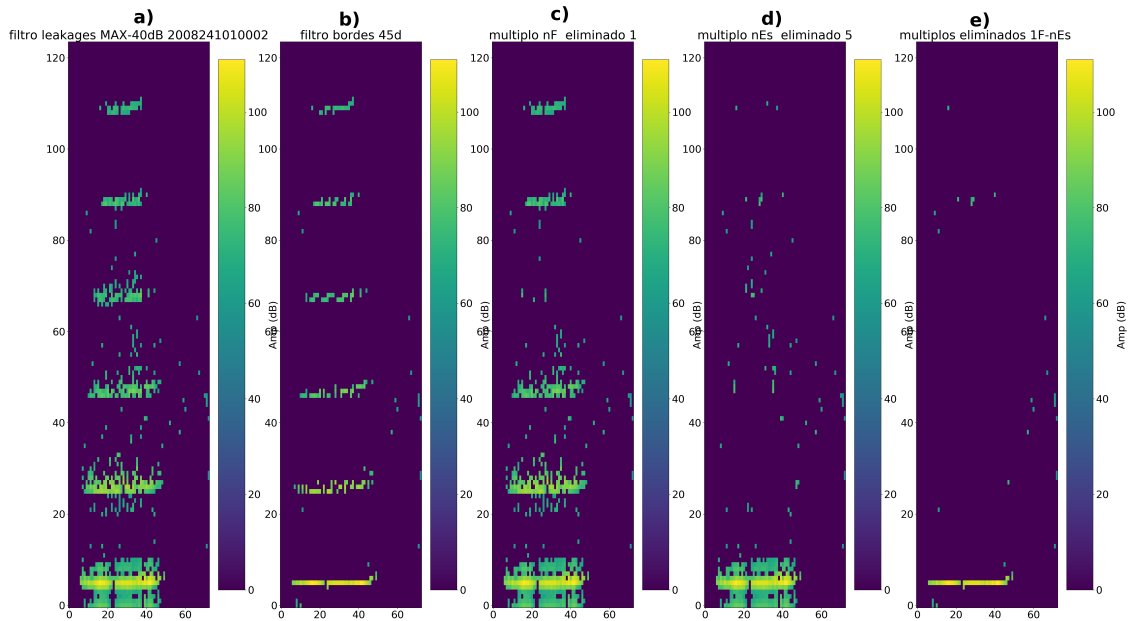


Figura 2.22: Aplicación de b) filtro de 45 grados, c) eliminación del primer múltiplo de la capa F (1F), d) Eliminación de todos los múltiplos de la capa E_s (nE_s) y e) Resultado de aplicar los filtros anteriores a un evento de blanketing total.

F, en este caso como no hay capa F, el programa toma al primer múltiplo de la capa E_s como si fuera la capa F, de tal forma que elimina el tercer múltiplo de la capa E_s como si fuera el primer múltiplo de la capa F (1F). En 2.22-d se aplica el algoritmo que elimina todos los múltiplos de la capa E_s . Finalmente en 2.22-e se tiene el resultado de aplicar todos los filtros anteriores.

La figura 2.23 muestra el resultado de aplicar el algoritmo para eliminar el primer múltiplo de la capa F. Se observa que el primer múltiplo es eliminado casi completamente. En 2.23-a muestra un primer filtro leakages que umbraliza para cada columna teniendo como umbral el máximo valor de la columna menos 40. En 2.23-b se ha aplicado el filtro de 45 grados. En 2.23-c se elimina el primer múltiplo de la capa F. En 2.23-d se aplica el filtro que elimina todos los múltiplos de la capa E_s (en este caso como no hay capa E_s , el filtro no hace nada). Finalmente en 2.23-e se tiene el resultado de aplicar todos los filtros anteriores.

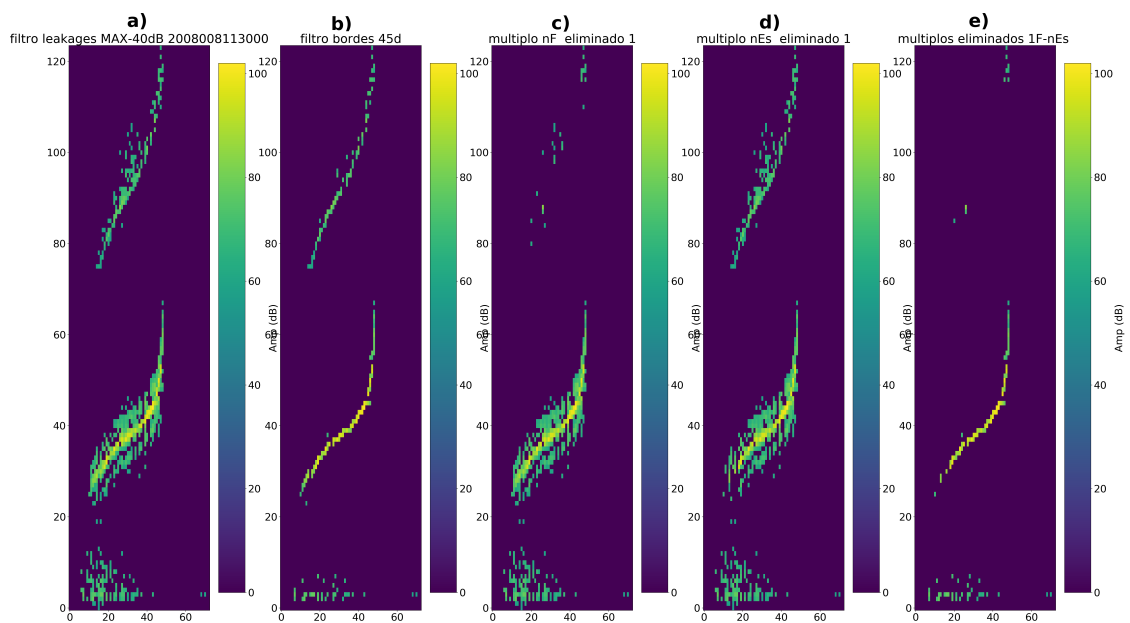


Figura 2.23: Aplicación de b) filtro de 45 grados, c) eliminación del primer múltiplo de la capa F (1F), d) Eliminación de todos los múltiplos de la capa *Es* (nEs) y e) Resultado de aplicar los filtros anteriores a un ionograma donde hay presencia de múltiplo de la capa F.

Se debe tener presente que en horas del día, en la región F suelen aparecer dos trazas debido a que están presentes la capa F1 Y F2 (como es el caso del ionograma de la figura 2.20) y en horas de la noche suele aparecer únicamente una capa F, la consideraremos que es la capa F2 (como es el caso de la figura 2.23).

Además a fin de evitar eliminar ecos de la capa F1 que podrían coincidir en la posición en la que se podría encontrar un múltiplo nEs, se han considerado los siguientes criterios morfológicos de la capa F1 a fin de no ser eliminados:

- La capa F, por lo general, tiene las siguientes características (ver figura 2.24, la secuencia de filtros es similar a los anteriores, excepto que en 2.24-b se aplica el filtro de 45 y 135 grados):
 - F1: Tiene un valor alto y positivo de su pendiente.
 - F2 (o F): Es la traza más grande.
- Si aparece el primer múltiplo de la capa F (1F) entonces deberían aparecer los ecos de la capa F en el ionograma para las mismas frecuencias (ver figura 2.25, la secuencia de filtros es similar a los anteriores, excepto que en 2.25-b se aplica el filtro de 45 y 135 grados).

Además, se ha incluido un valor umbral de la amplitud de los posibles ecos de una capa E esporádica para diferenciarla de ecos del Electrochorro, a grosso modo se ha considerado el valor de 90. Debemos notar que al considerar un valor constante para todos los ionogramas no es muy óptimo, sin embargo en este caso este valor umbral a grosso modo, se respalda por el criterio morfológico de la capa F1 para evitar eliminar ecos de la capa F1 que no son ecos de algún múltiplo nEs.

Se ha implementado la rutina DeleteMultipleEsX.py que identifica y elimina el primer múltiplo de la capa F (1F) y los múltiplos de las capas *Es* (nEs). La figura 2.26 muestra un ionograma donde se elimina el primer múltiplo 1F. En 2.26-a) se aplica el filtro leakage y se resalta el múltiplo 1F identificado, en b) se aplica el filtro de 45 y 135 grados, en c) se elimina el primer múltiplo de la capa F (1F), en d) se aplica el filtro que elimina todos los múltiplos de la capa *Es* (nEs) (en este caso no hay múltiplos nEs), y en e) se muestra el resultado de aplicar los filtros anteriores a un ionograma donde hay presencia del múltiplo de la capa F.

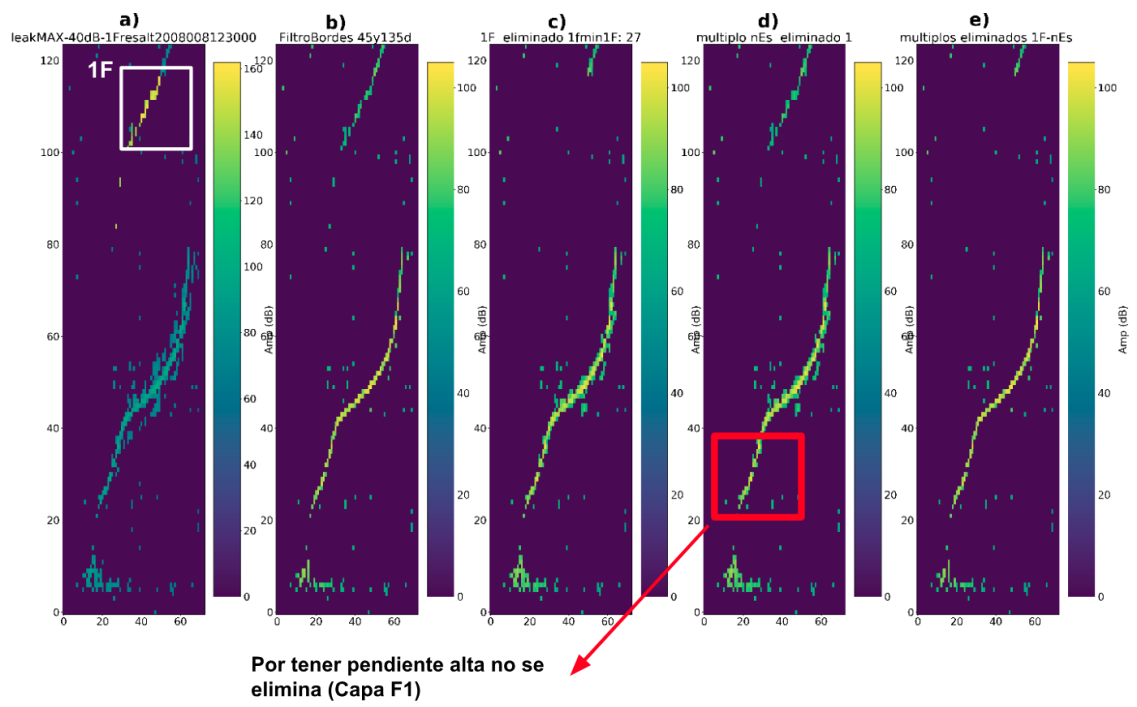
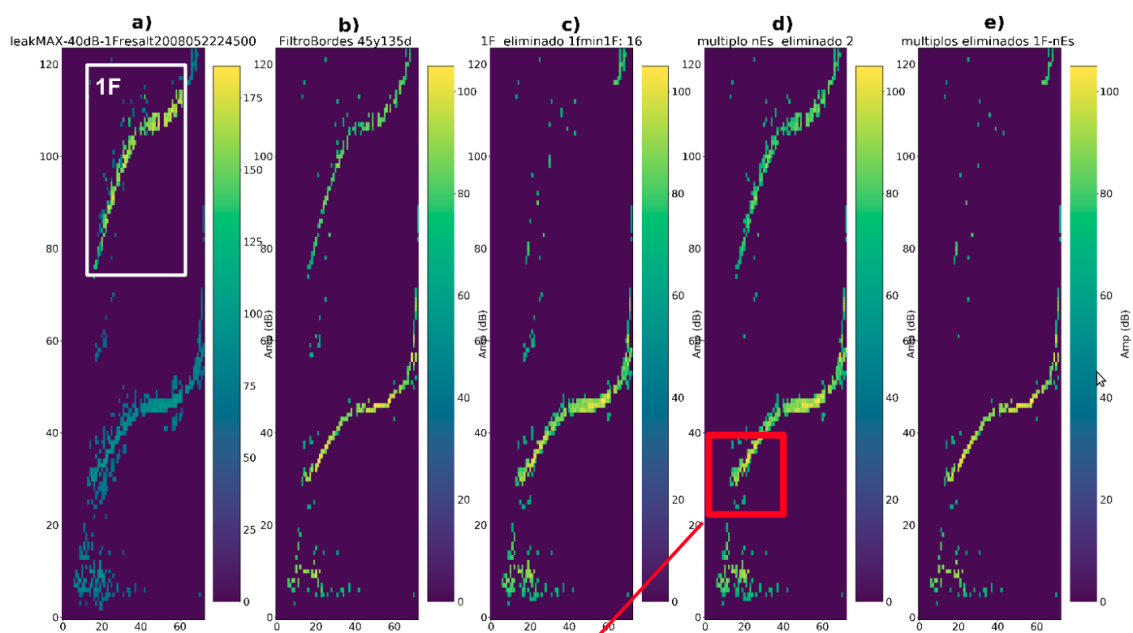


Figura 2.24: Características de la capa F: La capa F1 suele presentarse con pendiente alta.



Por estar presentes ecos del primer múltiplo de la capa F (1F) y por estar conectada a la traza más grande no se elimina

Figura 2.25: Características de la capa F: Si aparecen ecos del primer múltiplo de la capa F (1F), entonces deberían aparecer los ecos de la capa F para la misma frecuencia.

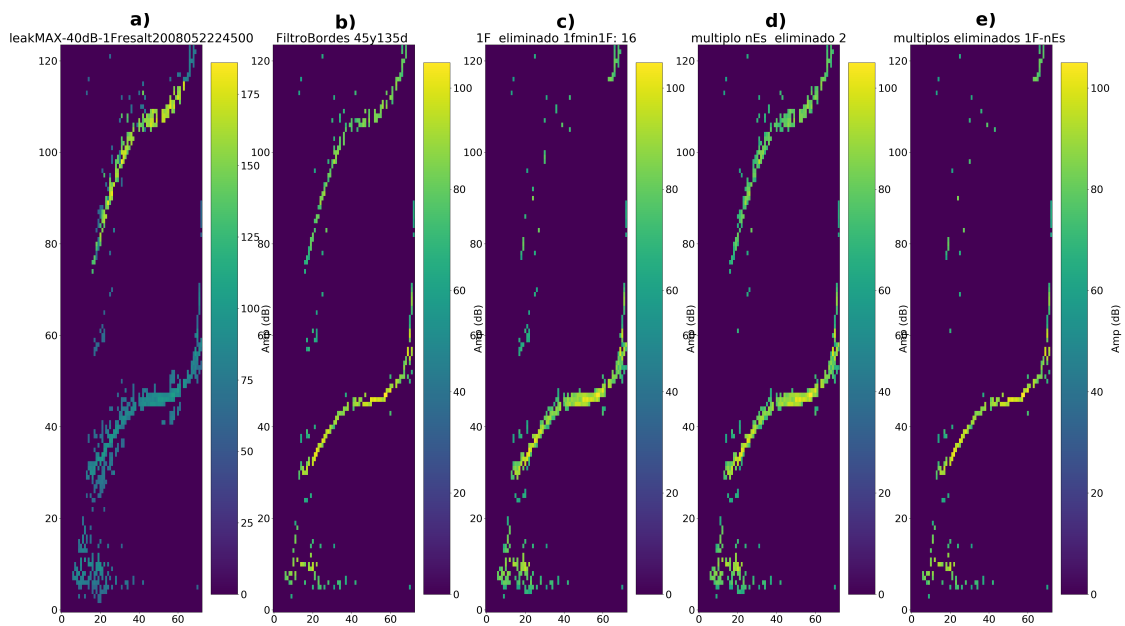


Figura 2.26: Algoritmo de eliminación nEs. a) Filtro leakage y se resalta el múltiplo 1F identificado. b) Filtro de 45 Y 135 grados. c) Eliminación del primer múltiplo de la capa F (1F). d) Eliminación de todos los múltiplos de la capa *Es* (nEs). e) Resultado de aplicar los filtros anteriores a un ionograma donde hay presencia de múltiplo de la capa F.

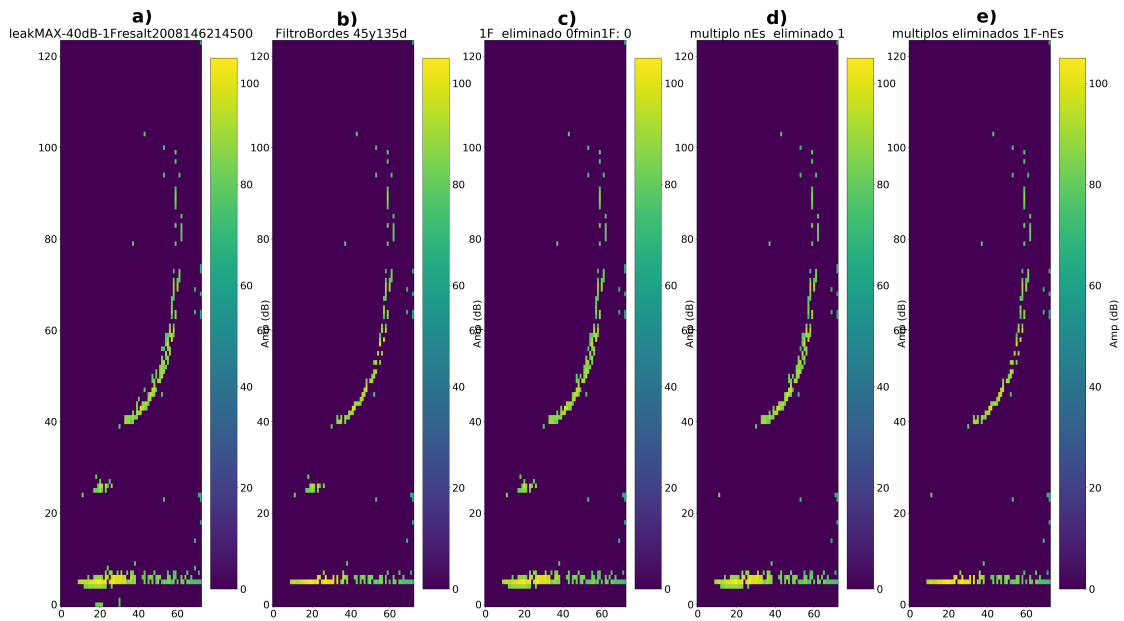


Figura 2.27: Algoritmo de eliminación nEs. a) Filtro leakage y no hay presencia del múltiplo 1F. b) Filtro de 45 y 135 grados. c) Eliminación del primer múltiplo de la capa F (1F). d) Eliminación de todos los múltiplos de la capa E_s (nEs). e) Resultado de aplicar los filtros anteriores a un ionograma donde hay presencia de múltiplo de la capa E_s .

La figura 2.27 muestra la identificación y eliminación del primer múltiplo de la capa E_s . En 2.27-a se aplica el filtro leakage y no hay presencia de múltiplo 1F, en b) se aplica el filtro de 45 y 135 grados, en c) se aplica el filtro de eliminación del primer múltiplo de la capa F (1F), en d) se aplica el filtro de eliminación de todos los múltiplos de la capa E_s (nEs), y en e) se muestra el resultado de aplicar los filtros anteriores a un ionograma donde hay presencia de múltiplo de la capa E_s .

2.3.5. Caracterización de la región F

Los algoritmos de esta sección tiene el objetivo de obtener información de la región F de los ionogramas, es decir, obtener etiquetas que indiquen si es un caso de F dispersa, si está la traza de la capa F o si no hay ecos presentes. La importancia de caracterizar la región F y principalmente de identificar los ionogramas con F dispersa (donde no hay una traza de la capa F bien

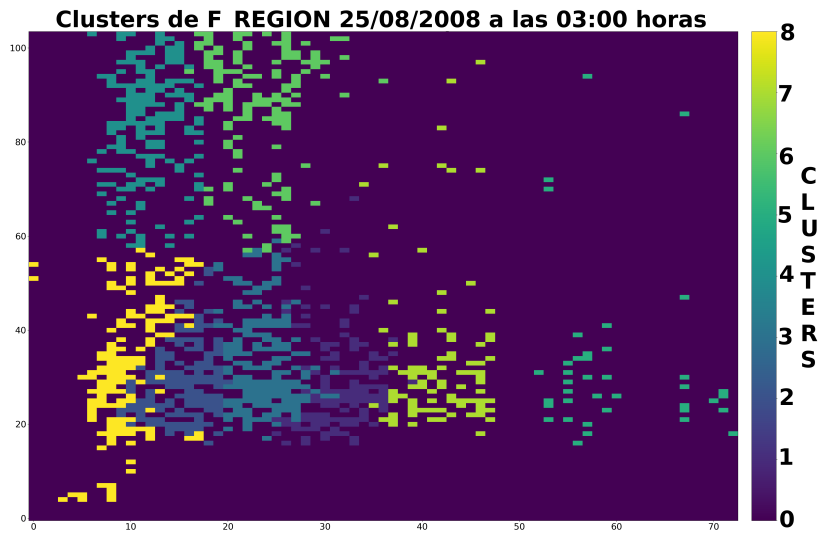


Figura 2.28: Segmentación de la región F en 8 clusters en presencia de F dispersa en los ionogramas.

definida) es debido a que en estos ionogramas no tiene sentido aplicar el algoritmo de escalado (que se explicará más adelante), pues no hay una traza de la capa F bien definida. Entonces evitando aplicar el algoritmo de escalado automático en ionogramas con F dispersa se evitaría el costo computacional de procesamiento.

Implementación de rutina para identificar F dispersa

Se implementó una rutina en python para identificar los eventos de F dispersa y en tales eventos no se aplicó el algoritmo de escalado (modelo de rotores) con el fin de ahorrar tiempo de procesamiento. El nombre de la función que identifica los posibles eventos de F dispersa es `is_spreadFX`.

Primero, se aplica el método Fuzzy C Means a la región F con el fin de segmentarla en 8 clusters (la figura 2.28 muestra la segmentación en 8 clusters en caso de F dispersa, la figura 2.29 muestra la segmentación en 8 clusters en caso se encuentre la capa F) luego se calcula un parámetro que hemos llamado PC3.

Para cada cluster se procede a calcular un parámetro que se ha llamado PC3, el cual permite decidir si hay presencia de F dispersa o no. Este parámetro PC3 se calcula a partir de la multiplicación de todos los `pc3` que se calculan para cada columna del cluster (notar que se está haciendo

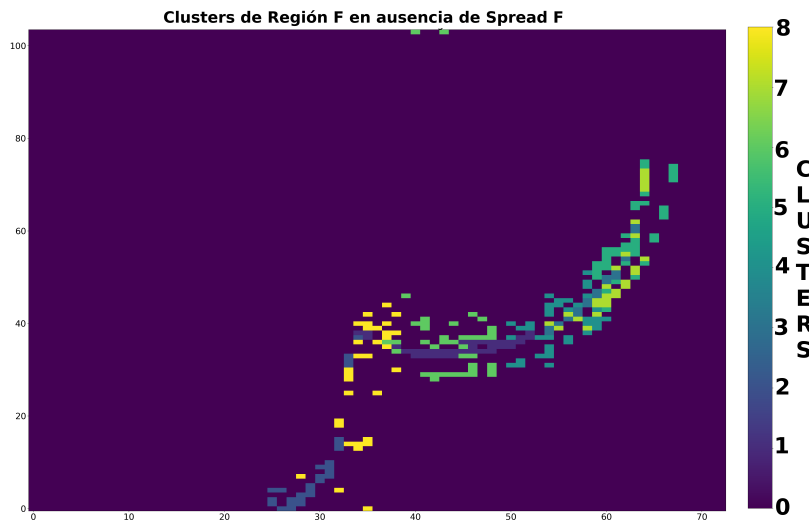


Figura 2.29: Segmentación de la región F en 8 clusters en ausencia de F dispersa en los ionogramas y donde hay una capa F bien definida.

referencia a dos parámetros distintos: PC3 Y pc3). El pc3 mide cuan juntos (o no dispersos) se encuentran los ecos del cluster en alturas virtuales (por columnas). Mientras más se acerque al valor de 1 serán ecos que están más juntos (menos dispersos) y mientras más se acerque a 0 estarán menos juntos (más dispersos). La figura 2.31 muestra la definición del parámetro pc3 para una distribución de píxeles en una fila.

La figura 2.30 muestra el algoritmo para identificar F dispersa en los ionogramas. A continuación se detalla cada paso:

- **Entradas:** Clusters obtenidos por el método Fuzzy C Means aplicado a la región F con el fin de segmentarla en 8 clusters. Además, se inicializa el parámetro $Flag_SpreadF = True$.
- **Cálculo del parámetro PC3:** Para cada cluster se procede a calcular el parámetro PC3, el cual mide cuan disperso se encuentran los ecos del cluster en alturas virtuales (por columnas). Los pasos para calcular PC3 para cada cluster son:
 - Para cada columna que contenga 3 o más píxeles se obtiene la posición de las filas donde hay ecos (ver figura 2.31 para mayor entendimiento, los cuadros de color amarillo representan los píxeles y el número en los cuadros representa la fila en la que aparecen).

- Se calculan los percentiles 5 y 95 (cuadros color lila).
- Seguidamente se forma una región cuyos elementos (las posiciones) sean mayores al percentil 5 y menor al percentil 95, finalmente si fuera posible (siempre que hayan píxeles consecutivos), se amplía la región hacia los extremos. Esta región, originalmente delimitada por los percentiles 5 y 95, luego de la ampliación se convierte en la región de verde y gris, esta región ampliada la llamaremos *región_in* (ver figura 2.31).
- Luego se calcula:
 - num_in*: Números de píxeles en dicha región *región_in* (píxeles verdes).
 - num_zeros*: Número de píxeles ceros (vacíos) en dicha región *región_in* (píxeles gris) y
 - num_tot*: Número total de píxeles (píxeles amarillos) .
- Se calculan los parámetros:

$$pc1 = \frac{num_in}{num_tot} \quad (2.3.11)$$

$$pc2 = \frac{num_in}{num_in + num_tot} \quad (2.3.12)$$

- Finalmente,

$$pc3 = pc1 * pc2. \quad (2.3.13)$$

“pc3” mide cuan juntos están los píxeles, mientras más se acerque al valor de 1 los píxeles estarán menos dispersos (más juntos) y mientras más se acerquen a 0 estarán más dispersos (menos juntos).

- Seguidamente, se calcula PC3 como la multiplicación de todos los parámetros *pc3* de cada columna del cluster y si este valor (PC3) es mayor o igual (PARAM_PC3) elevado al número de elementos considerados en la multiplicación para obtener PC3, entonces en este caso NO SE TENDRÁ F DISPERSA, y se actualiza el valor de *Flag_SpreadF* (a partir de la operación lógica $Flag_SpreadF = Flag_SpreadF \text{ and } False$) y si no se cumpliera la condición entonces se tendrá un posible caso de F dispersa, por lo que se vuelve a actualizar el valor de *Flag_SpreadF* (a partir de la operación lógica $Flag_SpreadF = Flag_SpreadF \text{ and } True$). Debe notarse que basta que algún cluster cumpla la anterior condición, entonces el ionograma no contiene F dispersa. El valor dado a PARAM_PC3 es 0.7. Notar que PARAM_PC3 se comporta como un umbral para decidir si hay F dispersa o no.

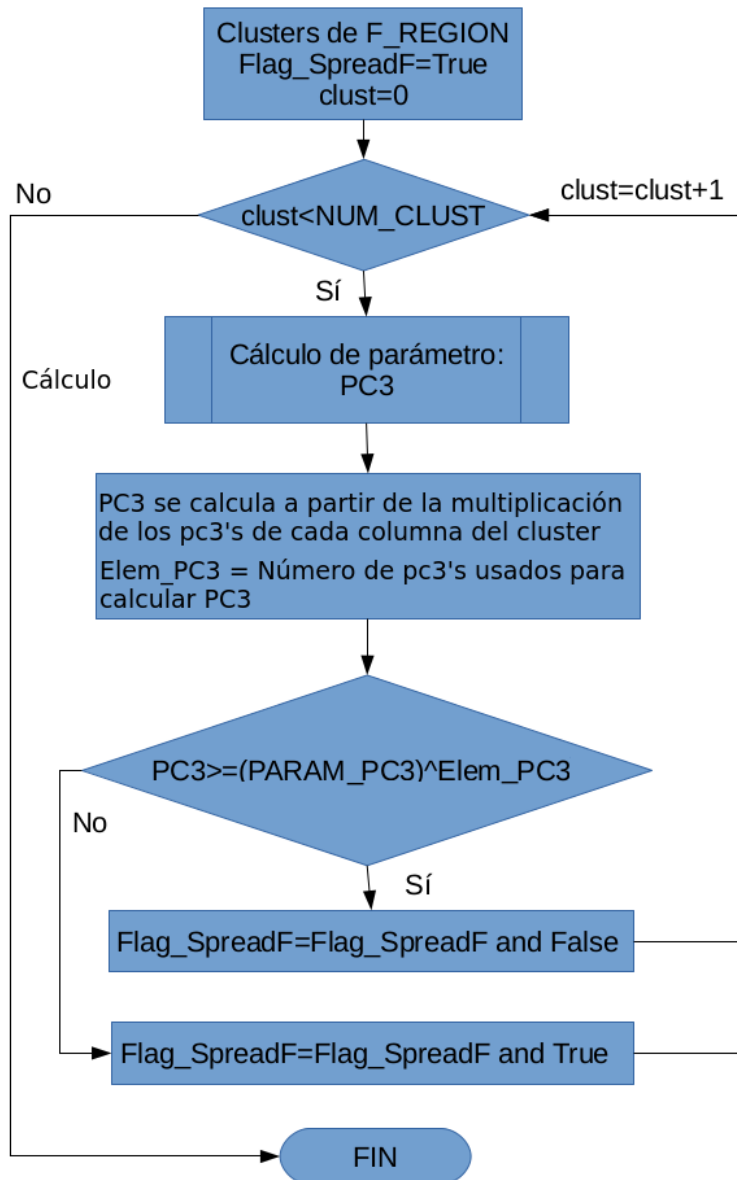


Figura 2.30: Algoritmo para identificar la presencia de F dispersa en los ionogramas.

El algoritmo se describe a continuación:

- **Entrada:** F_REGION con los múltiplos nEs eliminados y el múltiplo de la capa F eliminado, $num_multiples = 0$, $info_Fregion = 0$.
El parámetro $num_multiples = 0$ almacenará el número de múltiplos *Es* detectados en la F_region (como previamente ya se eliminaron los múltiplos, este parámetro se espera que siempre sea cero) y el parámetro $info_Fregion$, al final del algoritmo, almacenará la información de la región F, con los siguientes valores:
0: No hay ecos de la capa F o si hay ruido,
1: Si hay F dispersa y
2: Si está presente la traza de la capa F.

- **Identificar y eliminar los múltiplos Es:** Usando la función **delete_multipleEsX** antes descrita se identifican y eliminan el número de múltiplos presentes en la región F (si hubieran). El número de múltiplos se actualizan en el parámetro $num_multiples$. Se tendrá como salida el ionograma sin los múltiplos *Es*. Esta función es redundante, pues la región F del input, se espera que no contenga los múltiplos nEs, de todas formas se sigue aplicando para corroborar que no se han encontrado múltiplos nEs.

- **Búsqueda de F dispersa:** Teniendo como input los clusters de la región F cuyos múltiplos *Es* ya han sido identificados y eliminados se procede a identificar la presencia de un posible caso de F dispersa, para esto se usa la función $is_spreadFX$ anteriormente descrita, según sea el caso para la salida de esta función ($Flag_SpreadF$ ahora llamado $is_spreadF$), se tiene:
 - **is_spreadF: True:**
Aquí se identificarán dos casos, el primero es cuando exista un evento de F dispersa y el segundo cuando exista ruido, tal como se muestra en la figura 2.32, para diferenciar tales casos, se usa la función $is_there_Fregion$ que identificará si existe o no una traza, en caso sea positivo se tendrá un evento de F dispersa, de lo contrario se tendrá una región F que solo contiene ruido.

 - **is_spreadF: False:**
Aquí se identificarán dos casos, el primero es cuando exista la traza

de la capa F y el segundo cuando exista poco ruido o cuando no se tengan ecos en la región F, tal como se muestra en la figura 2.32, para diferenciar tales casos, se usa la función *is_there_Fregion* que identificará si existe o no una traza, en caso sea positivo se tendrá la traza de la capa F, de lo contrario se tendrá una región F que contiene poco ruido o ningún eco de la región F.

En el módulo *identify_SpreadF.py* se ha implementado la función *is_there_Fregion* el cual se encarga de identificar trazas en la región F, el criterio básico es enumerar y etiquetar el número de objetos presentes (cada objeto agrupa un número de píxeles conectados para esto se usa la función *ndimage.label* del módulo *scipy* de python). Una vez identificados los objetos se mide el ancho (en columnas) de cada objeto. La condición que se está evaluando es que existan al menos tres objetos cuyo ancho sea mayor o igual a 4, o 1 cuyo ancho sea mayor o igual a 5. Esta condición descarta el caso donde esté presente el ruido o interferencias, pues el ruido suele aparecer aleatorio en la imagen y las interferencias en una misma columna.

- **Asignación de parámetros y creación del file *spreadF.txt*:** Luego de almacenar el respectivo valor al parámetro *info_Fregion*, se procede a crear un archivo *spreadF.txt* con 84 filas en cada archivo (los cuales contienen información de 84 ionogramas), con el siguiente formato para cada fila:

YYYY(año) DDD(día del año) HH(hora) MM(minutos) SS(segundos)
info_Fregion num_multiples.

De esta forma más adelante se podrá buscar los eventos de *Es* blanketing total, en aquellos registros que tengan *info_Fregion=0* y que, además, presenten capa E esporádica (En la región E). Además, se podrá buscar eventos donde se tenga blanketing parcial (*info_Fregion=2*) o si hay presencia de F dispersa (*info_Fregion=1*).

Se ha implementado la rutina *test_RNA_RegionFX.Y.py* que a partir de la matriz de la región F, genera el archivo *spreadF.txt* el cual caracteriza la región F, y en su penúltima fila, nos indica 2 si hay capa F, 1 si hay F dispersa, y 0 si no hay región F, tal como se muestran en la figura 2.33.

Las figuras 2.34, 2.35 y 2.36 muestran información de las regiones F. El color azul indica la presencia de capa F, el color rojo indica presencia

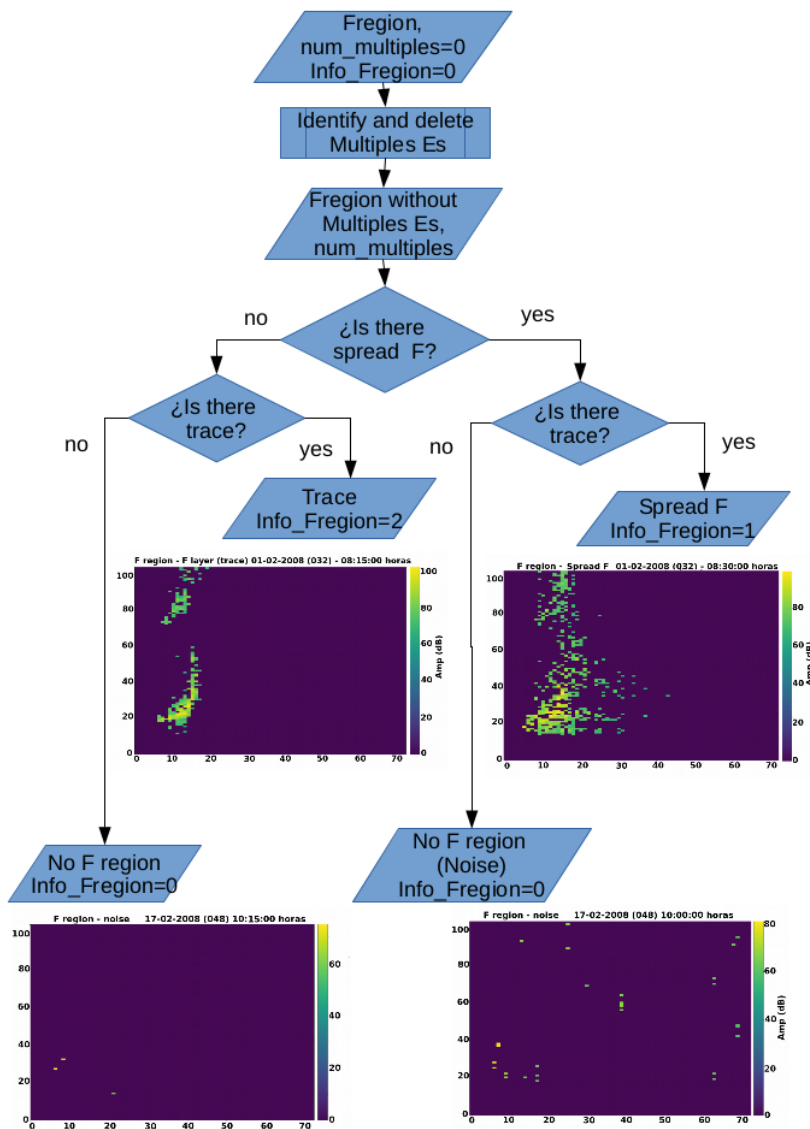


Figura 2.32: Algoritmo para identificar si los ionogramas contienen F dispersa (info_Fregion=1), trazas de la capa F (info_Fregion=2) o solo contienen ruido o ningún eco (info_Fregion=0).

Año	Día del año	hh	mm	ss	Info Freq	n	Año	Día del año	hh	mm	ss	Info Freq	n
2008	16	3	30	0	1	0	2008	16	14	0	0	2	0
2008	16	3	45	0	1	0	2008	16	14	15	0	2	0
2008	16	4	0	0	1	0	2008	16	14	30	0	2	0
2008	16	4	15	0	1	0	2008	16	14	45	0	2	0
2008	16	4	30	0	1	0	2008	16	15	0	0	2	0
2008	16	4	45	2	2	0	2008	16	15	15	0	2	0
2008	16	5	0	0	1	0	2008	16	15	30	0	2	0
2008	16	5	15	0	1	0	2008	16	15	45	0	2	0
2008	16	5	30	2	2	0	2008	16	16	0	0	2	0
2008	16	5	45	0	2	0	2008	16	16	15	3	0	0
2008	16	6	0	0	1	0	2008	16	16	30	0	2	0
2008	16	6	15	0	1	0	2008	16	16	45	0	2	0
2008	16	6	30	0	1	0	2008	16	17	0	0	2	0
2008	16	6	45	0	1	0	2008	16	17	15	0	2	0
2008	16	7	0	0	1	0	2008	16	17	30	0	2	0
2008	16	7	15	2	1	0	2008	16	17	45	0	2	0
2008	16	7	30	0	1	0	2008	16	18	0	0	2	0
2008	16	7	45	0	0	0	2008	16	18	15	0	2	0
2008	16	8	0	0	1	0	2008	16	18	30	0	2	0
2008	16	8	15	0	1	0	2008	16	18	45	0	2	0
2008	16	8	30	0	1	0	2008	16	19	0	0	2	0
2008	16	8	45	0	1	0	2008	16	19	15	0	2	0
2008	16	9	0	0	1	0	2008	16	19	30	0	2	0
2008	16	9	15	0	1	0	2008	16	19	45	0	2	0
2008	16	9	30	0	1	0	2008	16	20	0	0	2	0
2008	16	9	45	0	2	0	2008	16	20	15	0	2	0
2008	16	10	0	0	2	0	2008	16	20	30	0	2	0
2008	16	10	15	0	2	0	2008	16	20	45	0	2	0
2008	16	10	30	0	2	0	2008	16	21	0	0	2	0
2008	16	10	45	0	2	0	2008	16	21	15	0	2	0
2008	16	11	0	0	2	0	2008	16	21	30	0	2	0
2008	16	11	15	0	2	0	2008	16	21	45	0	2	0
2008	16	11	30	0	2	0	2008	16	22	0	0	2	0
2008	16	11	45	0	2	0	2008	16	22	15	0	2	0
2008	16	12	0	0	2	0	2008	16	22	30	0	2	0
2008	16	12	15	2	2	0	2008	16	22	45	0	2	0
2008	16	12	30	0	2	0	2008	16	23	0	2	2	0
2008	16	12	45	0	2	0	2008	16	23	15	1	2	0
2008	16	13	0	3	2	0	2008	16	23	30	0	2	0
2008	16	13	15	1	2	0	2008	16	23	45	0	2	0
2008	16	13	30	0	2	0	2008	17	0	0	0	2	0
2008	16	13	45	0	2	0	2008	17	0	15	0	2	0

Figura 2.33: Fichero SpreadF.txt donde se caracteriza la región F. $InfoFreq = 2$: Si existe capa F, $InfoFreq = 1$: Si hay F dispersa, y $InfoFreq = 0$: si no hay región F.

de F dispersa, el verde indica ausencia de ecos en la región F y el color celeste indica falta de datos. Los eventos de F dispersa han sido obtenidos a partir del algoritmo antes mencionado, el cual usa el parámetro PC3 descrito anteriormente. El objetivo de identificar los eventos de F dispersa fue evitar aplicar el modelo de rotores en estos ionogramas con F dispersa, pues sería innecesario y con mucho costo computacional. Además, podemos tener una visión rápida y general de como están los ionogramas en el año. Sabiendo que la ocurrencia del F dispersa es mayor en los meses de enero y diciembre, y aparecen en horas de la noche y madrugada, además, que nunca aparecen en horas del día. Por ejemplo, si observamos la predicción de F dispersa para el año 2018, notamos que supuestos eventos F dispersa en el día no tienen sentido, y más bien estos son debido a que la digisonda estuvo fallando en los primeros meses del 2018.

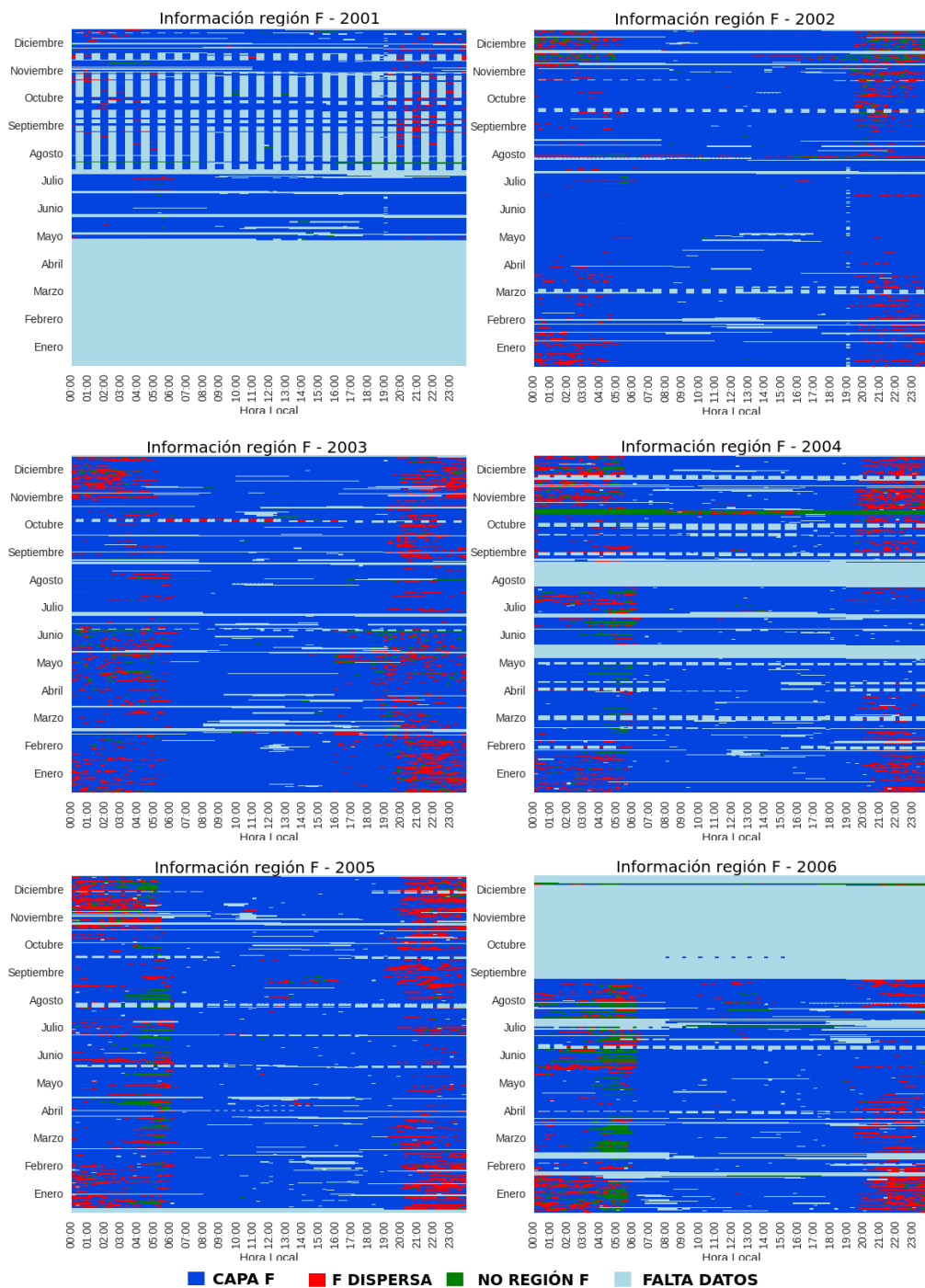


Figura 2.34: Caracterización de la región F desde el 2001 al 2006 usando el algoritmo implementado.

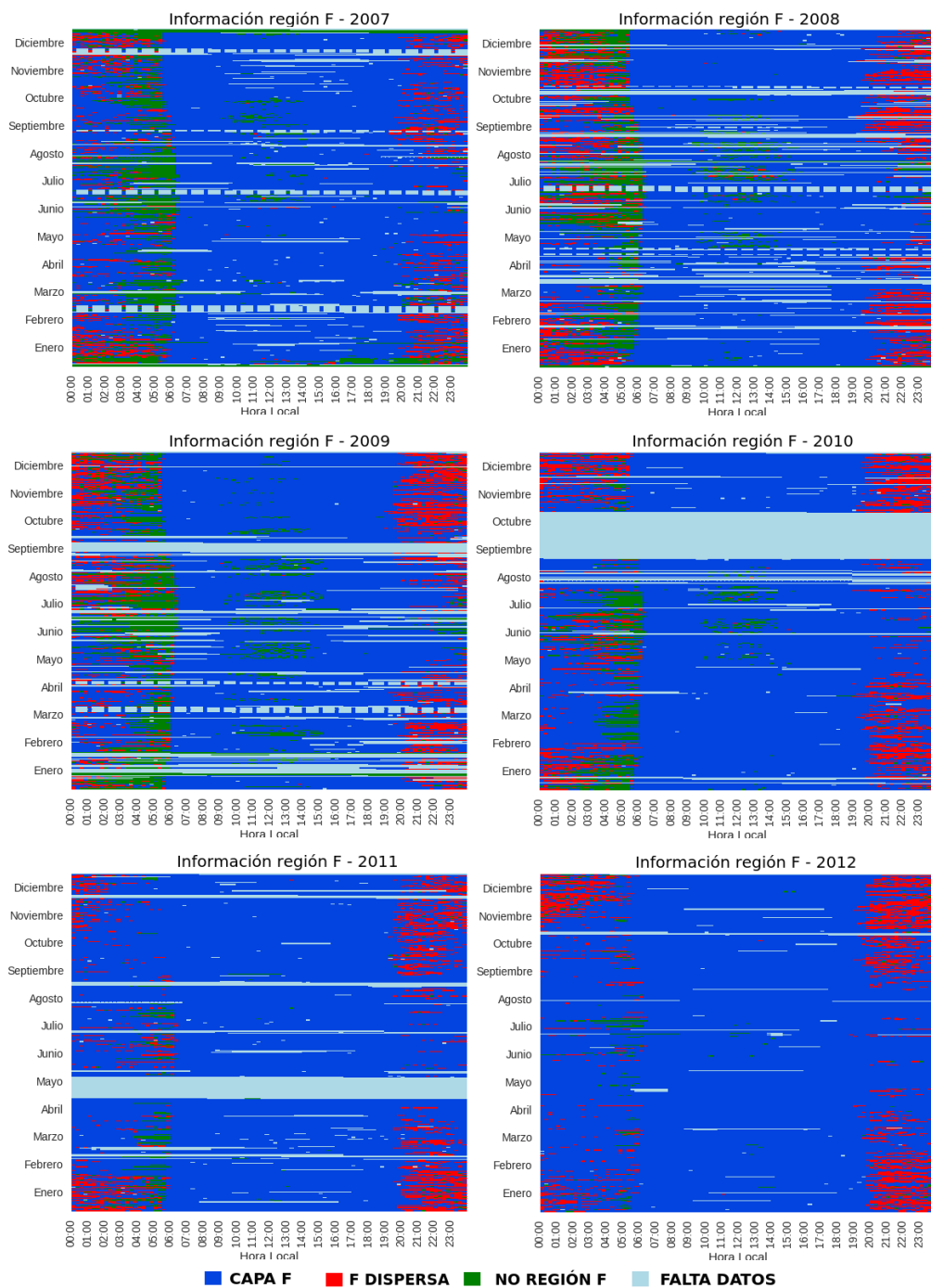


Figura 2.35: Caracterización de la región F desde el 2007 al 2012 usando el algoritmo implementado.

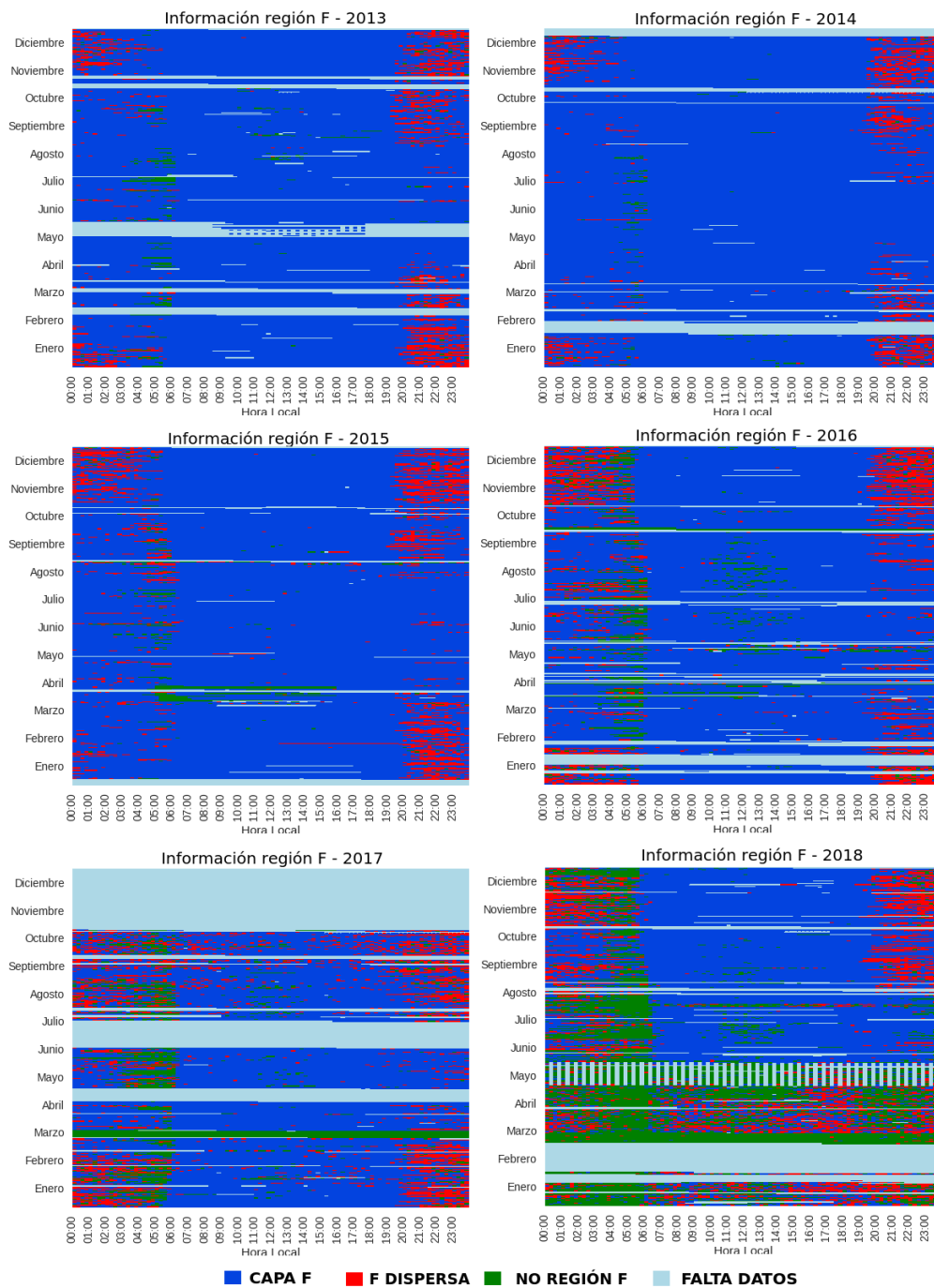


Figura 2.36: Caracterización de la región F desde el 2013 al 2018 usando el algoritmo implementado.

2.3.6. Modelo de rotores

Con el fin de medir los cambios de la frecuencia mínima de la capa F se ha implementado una variación del modelo de rotores de Galkin [47] para escalar las trazas de la región F e identificar cada capa presente. El modelo de rotores de Galkin [47] es usado en la nueva versión del Artist, Artist 5 [30], este es un software de escalado automático y es más eficiente que la versión del Artist 4 (versión actual con el que cuenta la digisonda del ROJ) en su escalado. Cabe resaltar que el modelo de rotores implementado en el Artist 5 está optimizado en el cálculo de las frecuencias críticas de la capa F y no en las frecuencias mínimas, por lo que se optó por su implementación y mejora en ese aspecto.

La figura 2.37 muestra un esquema de como funciona este algoritmo. La figura 2.38 muestra la aplicación del modelo de rotores a la región F de un ionograma para identificar la capa F1 y F2, notar que discrimina bien el ruido.

Algoritmo de modelo de rotores

El algoritmo del modelo de rotores de Galkin [47] ha sido implementado en tres rutinas principalmente:

- **Histograma angular**, teniendo como entrada los bordes (píxeles o puntos) se obtiene como salida una orientación inicial de los rotores.
- **Optimización de rotores**, teniendo como entrada los rotores ya inicializados se obtiene como salida los rotores con sus direcciones optimizadas. Esta rutina, en la tesis original de Galkin [47] usa un método de Redes Neuronales Artificiales (Feedback) en el modelo original, en este trabajo hemos modificado la regla de optimización de tal manera que se tiene una regla autoconsistente que va buscando las direcciones óptimas de los rotores.
- **Identificación de trazas**, teniendo como entrada los rotores ya optimizados se obtiene como salida las trazas presentes, capas F1, F2, E_s , etc. Los bordes pertenecientes a ruidos ya no aparecen en esta salida.

Histograma angular

El histograma angular consiste en realizar un conteo de la cantidad de bordes que aparecen en las dos secciones circulares que se generan cada Θ grados, tal como se muestra en la figura 2.39. El radio tomado para la sección

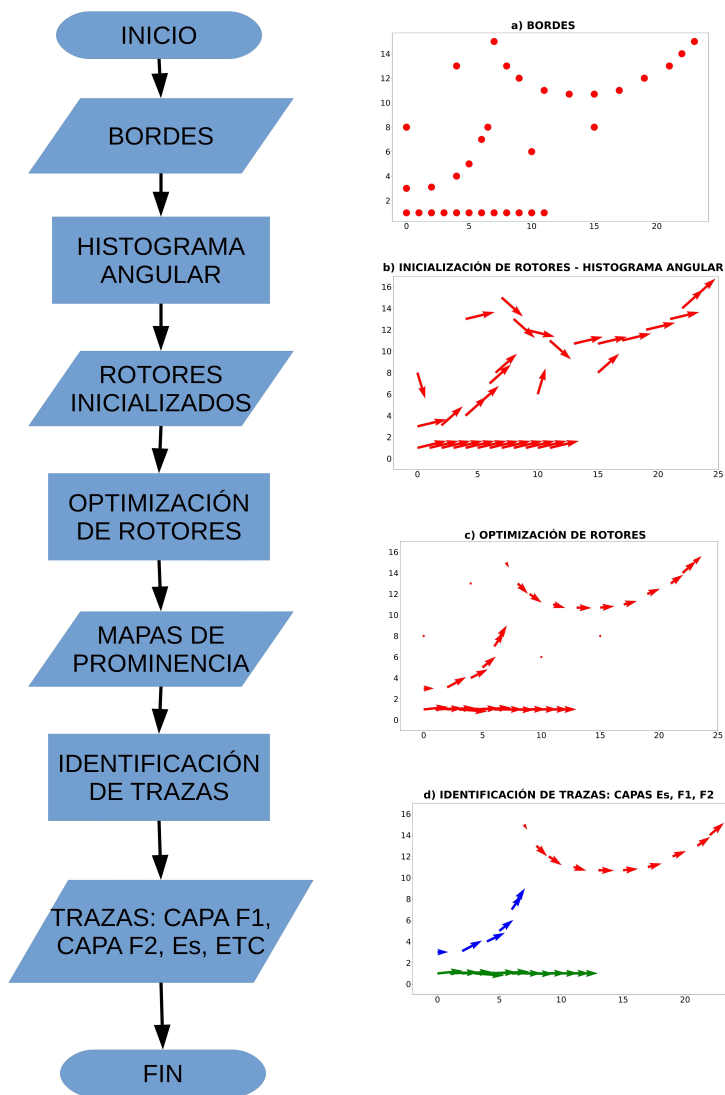


Figura 2.37: Rutinas del modelo de rotores. a) Bordes b) Histograma angular c) Optimización de rotores d) Identificación de trazas.

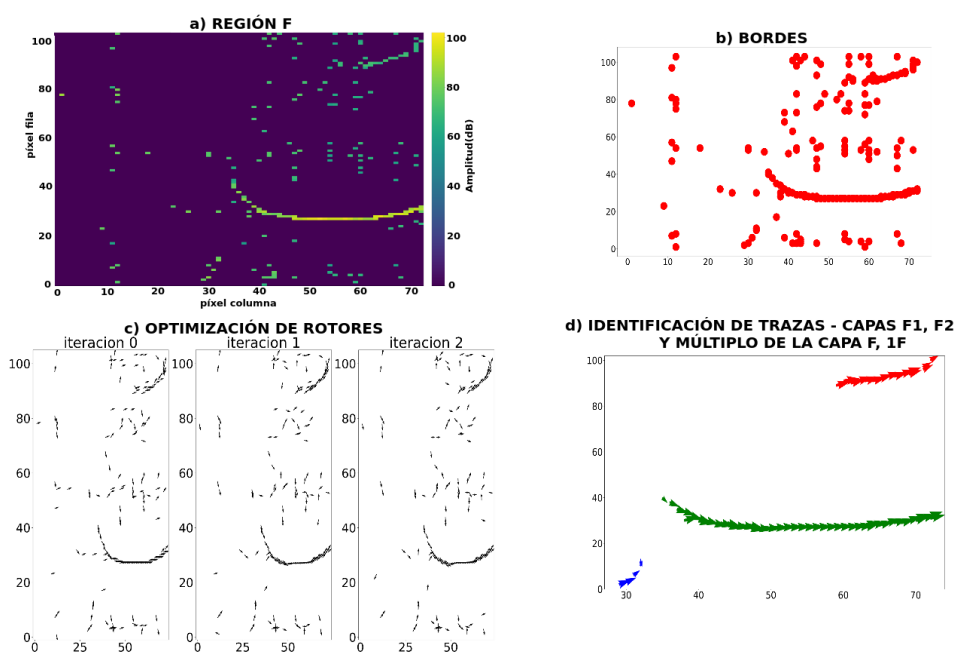


Figura 2.38: Rutinas del modelo de rotores aplicado a la región F de un ionograma para identificar las trazas de las capas F1 y F2.

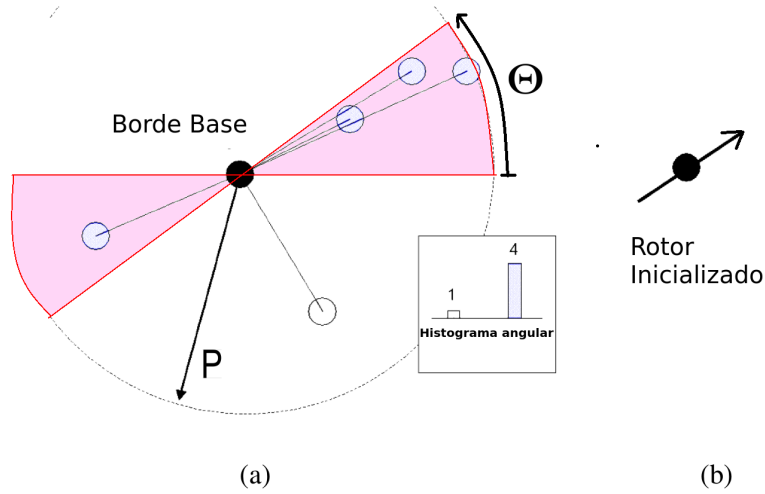


Figura 2.39: Histograma angular. Modificado de Galkin [47].

circular es P .

En la figura 2.39 se observa que para la sección sombreada se obtiene una frecuencia de 4, y para otra sección una frecuencia de 1. Por tanto la dirección del rotor será $\Theta/2$ orientado en el sector circular que contiene más bordes.

Los parámetros que usamos para dicha optimización han sido los siguientes:

- $\Theta = 45^\circ$
- $P = 2.5 * 2.5 = 6.25$

Optimización de rotores

La optimización de rotores de Galkin [47] utiliza un método de Redes Neuronales Artificiales de tipo feedback, la figura 2.40 muestra el esquema de como funciona esta optimización de la dirección de los rotores. Cada rotor i interactúa con el resto de rotores j ($j=1\dots N$) y se obtiene el nuevo rotor de salida.

$$\vec{V}_i = \tanh\left(\sum_{j=1}^N w_j * \vec{V}_j\right). \quad (2.3.14)$$

De esta forma los pesos van cambiando en cada iteración y los vectores de entrada se van actualizando (las salidas serán las nuevas entradas). Este proceso continúa hasta que las salidas se vuelvan casi constante, es decir hasta

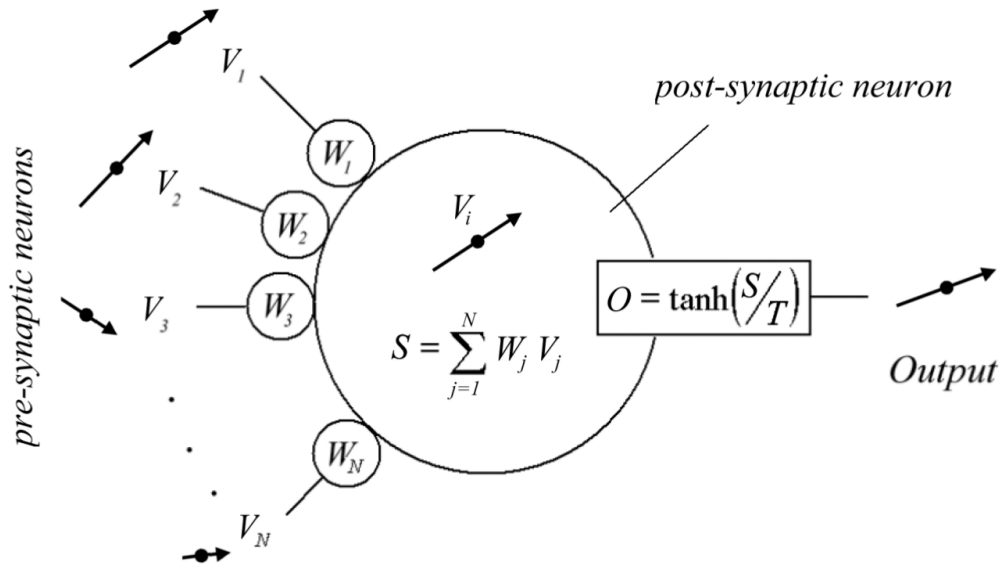


Figura 2.40: Esquema de Redes Neuronales Artificiales Feedback. Fuente Galkin [47].

que el sistema se vuelva estable.

En nuestro caso hemos optado por hacer una variación al modelo de rotores descrito por Galkin [47] y Galkin y cols. [42], el cambio viene básicamente en la definición de la regla de evolución, el cambio es el siguiente:

$$\vec{V}_i = \tanh\left(\sum_{j=1}^N w_j * \vec{U}_j\right) \quad (2.3.15)$$

En la anterior ecuación se está modificando el vector \vec{V}_j por \vec{U}_j , a continuación se describe la regla de evolución utilizada para cada iteración.

$$\vec{V}_i = \tanh\left(\sum_{j \neq i}^N w_j * \vec{U}_j\right) \begin{cases} w_j = \frac{(\text{Cos}(\gamma_{ij}))^e}{|C_{ij}|^f}, \vec{U}_j = \vec{C}_{ij} & \text{si } |C_{ij}| < \rho \\ w_j = \frac{(\text{Cos}(\beta_{ij}))^c}{|C_{ij}|^d}, \vec{U}_j = \vec{V}_j & \text{si } \rho < |C_{ij}| < P \quad |\theta_{ij} - \beta_{ij}| < \Theta/2 \\ w_j = 0 & \text{En los otros casos} \end{cases} \quad (2.3.16)$$

Los parámetros son los siguientes:

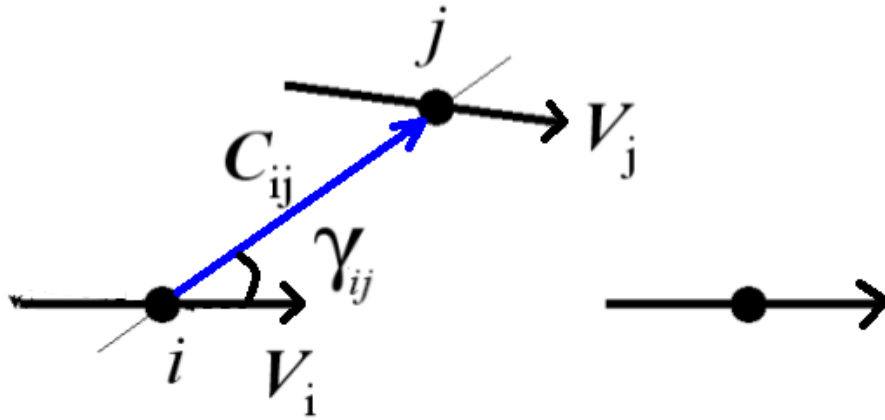


Figura 2.41: Definición de los parámetros de los rotadores 1. Modificado de Galkin y cols. [42].

- γ_{ij} : Es el ángulo formado por el rotor actual \vec{V}_i y \vec{C}_{ij}
- \vec{C}_{ij} : Es el vector que se forma teniendo como origen la posición del borde i y como fin el borde j (o al revés, con la condición que la componente horizontal sea positiva). $|C_{ij}|$ es su módulo.
- β_{ij} : Es el ángulo formado entre el rotor \vec{V}_i y el rotor \vec{V}'_j .
- \vec{V}'_j es el rotor \vec{V}_j reflejado en la cuerda $|C_{ij}|$. Se puede obtener con la siguiente transformación: $\vec{V}'_j = W_{ij}\vec{V}_j$,
donde $W_{ij} = \begin{bmatrix} \text{Cos}(2\theta_{ij}) & \text{Sen}(2\theta_{ij}) \\ -\text{Sen}(2\theta_{ij}) & \text{Cos}(2\theta_{ij}) \end{bmatrix}$, y θ_{ij} es el ángulo entre \vec{C}_{ij} y \vec{V}_j .

Ver las figuras 2.41 y 2.42 para interpretar los parámetros anteriores.

En la regla de evolución se pueden apreciar tres zonas, las cuales están delimitadas por los parámetros Θ , ρ y P. La figura 2.43 muestra estas zonas.

- Zona Transaxial: Zona en la cual $|C_{ij}| < \rho$. Debemos notar que Galkin y cols. [42] colocan sus parámetros de tal forma que el rotor base se alinee

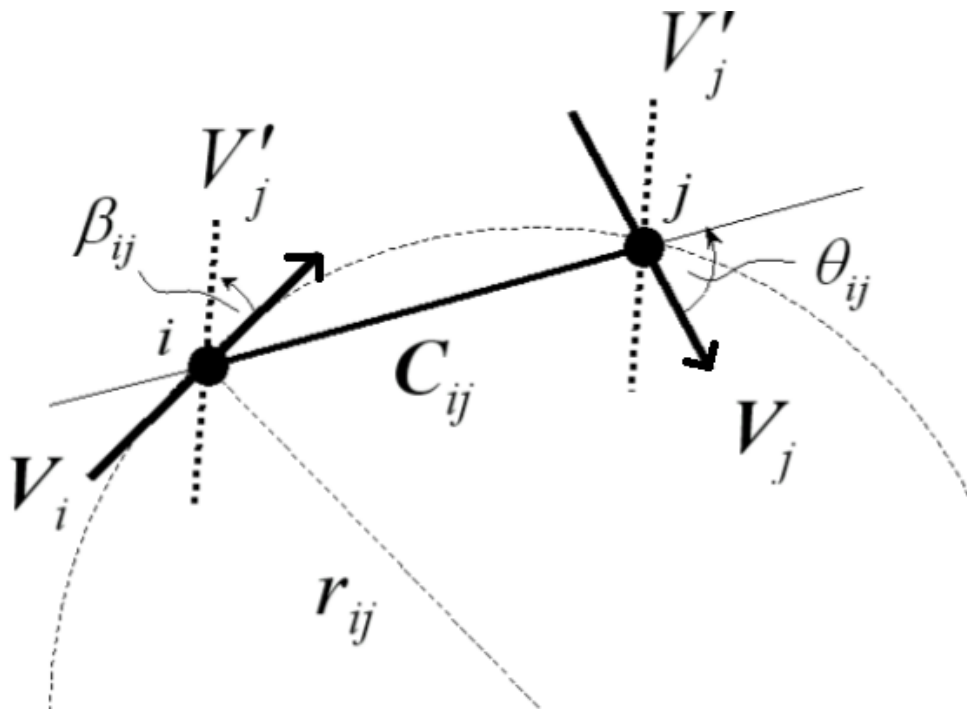


Figura 2.42: Definición de los parámetros de los rotores 2. Modificado de Galkin y cols. [42].

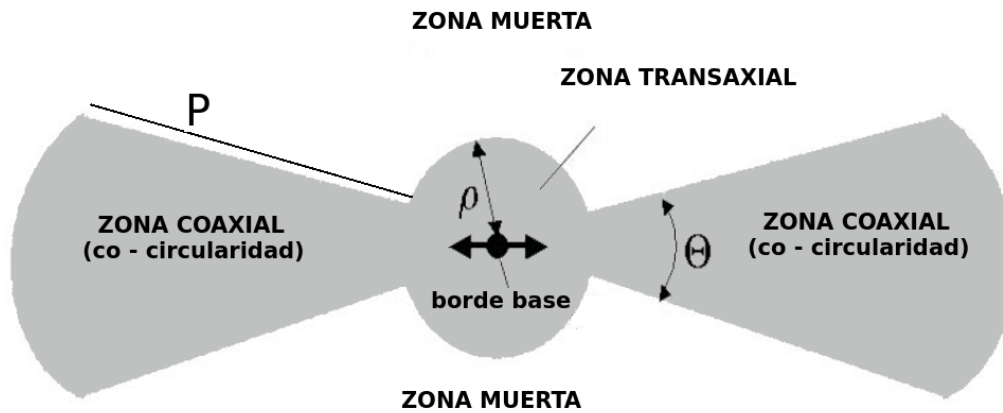


Figura 2.43: Zonas de interacción de los rotores. Modificado de Galkin y cols. [42].

con los otros rotores, sin embargo en nuestro caso estamos haciendo que el rotor base se alinee a los vectores \vec{C}_{ij} .

- Zona Coaxial: Zona en la cual $\rho < |C_{ij}| < P$ y $|\theta_{ij} - \beta_{ij}| < \Theta/2$.
- Zona Muerta: En los otros casos.

Los parámetros y constantes usados para la optimización han sido los siguientes:

- $c = d = e = f = 1.0$
- $\Theta = 15^\circ$, $\rho = 2.5$ y $P = 2.5 * \rho$

Finalmente para cada iteración, se reorientan a la derecha aquellos rotores que tienen componente horizontal negativa, es decir se multiplica por menos su componente x, y se reorientan hacia arriba aquellos rotores que apuntan hacia abajo, esto se hace con el fin de que los rotores extremos de la traza tengan siempre la dirección +x en su componente horizontal y los ángulos entre ellos sean calculados apropiadamente.

Identificación de trazas

Una vez optimizado los rotores, es decir cuando ya se tiene un mapa de prominencia (este nombre le da Galkin [47] a los rotores optimizados) viene

la parte de identificar las trazas.

Esta última rutina ha sido implementada buscando la suavidad de las curvas, haciendo un barrido de abajo hacia arriba, de izquierda a derecha, primero se ubica un grupo de rotores que sirvan como base de su traza, al menos deben ser 4 rotores, la condición es que estos sean casi paralelos, sean cercanos en distancia y a una línea. Una vez ubicado los rotores base se procede a ir uniendo los demás rotores de acuerdo a un criterio de pertenencia. El criterio de pertenencia a este grupo base es tal que haya una suavidad y continuidad en el grupo de rotores. De esta forma se procede hasta haber comprobado si todos los rotores pertenecen o no a dicho grupo. Luego, iterativamente se vuelve a buscar un grupo de rotores base y se repite el mismo proceso hasta que no se puedan encontrar algún grupo de rotores base.

Se ha implementado el script `test_RNA_RegionFX.Y.py` que implementa el método del modelo de rotores para identificar la capa F y calcular la frecuencia mínima de la capa F (`fminF` en MHz). Se genera el fichero `freq_min.txt`, que tiene el formato mostrado en la figura 2.44. La última columna muestra el valor de `fminF`, en caso no fuera posible encontrar la capa F, muestra `nan`.

Criterio para identificar eventos de blanketing

Antes de mencionar los criterios que algunos autores han usado para identificar las capas *Esb* que indirectamente tienen en cuenta la absorción de la región D, vamos a describir brevemente este proceso.

Absorción de la región D

La región D es la parte más baja de la ionósfera, entre 50 y 80 km (algunos la consideran entre 60 y 90 km), con densidad de número de electrones variando desde 10^8 a las $10^{10} m^{-3}$. En esta región hay iones negativos y positivos. En las regiones E y F no hay iones negativos, debido a que los electrones libres se recombinan con los iones positivos más rápidamente de lo que pueden encontrar una molécula neutra para unirse. Sin embargo, en la región D, hay una densidad mucho mayor de moléculas neutras, de modo que el electrón libre puede colisionar con una molécula neutra y unirse a ella antes que tenga tiempo de recombinarse con un ion positivo [48]

Cuando una onda de radio viaja a través del plasma, las colisiones entre electrones y otras partículas, principalmente átomos neutros y moléculas causa la reducción de su amplitud. Esto es el resultado de la conversión

Año	Día del año	hh	mm	ss	fminF	Año	Día del año	hh	mm	ss	fminF
2008	16	3	30	0	nan	2008	16	14	0	0	22.0
2008	16	3	45	0	nan	2008	16	14	15	0	25.0
2008	16	4	0	0	nan	2008	16	14	30	0	23.0
2008	16	4	15	0	nan	2008	16	14	45	0	25.0
2008	16	4	30	0	nan	2008	16	15	0	0	25.0
2008	16	4	45	2	9.0	2008	16	15	15	0	24.0
2008	16	5	0	0	nan	2008	16	15	30	0	25.0
2008	16	5	15	0	nan	2008	16	15	45	0	25.0
2008	16	5	30	2	25.0	2008	16	16	0	0	26.0
2008	16	5	45	0	6.0	2008	16	16	15	3	nan
2008	16	6	0	0	nan	2008	16	16	30	0	25.0
2008	16	6	15	0	nan	2008	16	16	45	0	25.0
2008	16	6	30	0	nan	2008	16	17	0	0	26.0
2008	16	6	45	0	nan	2008	16	17	15	0	27.0
2008	16	7	0	0	nan	2008	16	17	30	0	26.0
2008	16	7	15	2	nan	2008	16	17	45	0	28.0
2008	16	7	30	0	nan	2008	16	18	0	0	27.0
2008	16	7	45	0	9.0	2008	16	18	15	0	25.0
2008	16	8	0	0	nan	2008	16	18	30	0	24.0
2008	16	8	15	0	nan	2008	16	18	45	0	25.0
2008	16	8	30	0	nan	2008	16	19	0	0	23.0
2008	16	8	45	0	nan	2008	16	19	15	0	23.0
2008	16	9	0	0	nan	2008	16	19	30	0	23.0
2008	16	9	15	0	nan	2008	16	19	45	0	24.0
2008	16	9	30	0	nan	2008	16	20	0	0	22.0
2008	16	9	45	0	5.0	2008	16	20	15	0	24.0
2008	16	10	0	0	6.0	2008	16	20	30	0	24.0
2008	16	10	15	0	6.0	2008	16	20	45	0	22.0
2008	16	10	30	0	6.0	2008	16	21	0	0	24.0
2008	16	10	45	0	6.0	2008	16	21	15	0	19.0
2008	16	11	0	0	6.0	2008	16	21	30	0	21.0
2008	16	11	15	0	8.0	2008	16	21	45	0	17.0
2008	16	11	30	0	12.0	2008	16	22	0	0	15.0
2008	16	11	45	0	14.0	2008	16	22	15	0	15.0
2008	16	12	0	0	15.0	2008	16	22	30	0	22.0
2008	16	12	15	2	18.0	2008	16	22	45	0	13.0
2008	16	12	30	0	16.0	2008	16	23	0	2	11.0
2008	16	12	45	0	18.0	2008	16	23	15	1	10.0
2008	16	13	0	3	20.0	2008	16	23	30	0	6.0
2008	16	13	15	1	22.0	2008	16	23	45	0	8.0
2008	16	13	30	0	21.0	2008	17	0	0	0	6.0
2008	16	13	45	0	24.0	2008	17	0	15	0	6.0

Figura 2.44: Fichero freq_min.txt. La última columna muestra el valor de fminF, en caso no fuera posible encontrar la capa F, muestra nan

del momento ordenado en movimiento térmico o aleatorio. Si no hubieran colisiones, los electrones o iones oscilantes reirradiarían toda su energía que podría ser devuelta a la onda [1]

A partir de la señal reflejada por la ionosonda se puede deducir la atenuación a lo largo del camino entre el transmisor y receptor, obteniendo una atenuación total que puede dividirse en la atenuación geométrica (debido a la longitud del camino) y la atenuación ionosférica (debido a la absorción de la región D) descrita en los párrafos anteriores [49].

A continuación, se resume los criterios que han usado algunos autores para la identificación de las capas Esb y la región en las que han sido aplicadas.:

- Oyinloye [28]: $fbE_s - foE \geq 0.5$ MHz
Este criterio asegura que la frecuencia crítica de la capa E normal esté bien definida, es decir que exista la traza de la capa E y que pueda ser diferenciada de la capa E esporádica blanketing. Además, que la porción inferior de la capa F no haya sido afectada por la absorción. Estación ecuatorial.
- Yadav y cols. [19, 29]: $fbEs \geq 4.0$ MHz Estos autores solo exigen que la frecuencia de blanketing sea mayor o igual a 4.0 MHz. Estación ecuatorial.
- Baggaley [50]:
 - $foEs \geq 5.0$ MHz y $fbEs \geq 4.0$ MHz para el día (10:00-14:00 LMT)
 - $foEs \geq 4.0$ MHz y $fbEs \geq 2.0$ MHz para la noche (19:00-04:00 LMT)

Estación de latitudes medias del hemisferio sur.

Notamos que el criterio de Oyinloye [28] tiene en cuenta la absorción debido a la región D y E que sufren los ecos de mínima frecuencia de la capa F; y el criterio de Baggaley [50] considera umbrales constantes para las $fbEs$, para el día y la noche, lo cual indirectamente refleja la diferente absorción que existe en el día y la noche. La frecuencia mínima (f_{min}) es considerada un indicador de la absorción ionosférica [51]. Por tal razón, en este estudio hemos planteado un nuevo criterio para la identificación de las capas Esb que tenga en cuenta la absorción de la capa D durante el día a partir de la tendencia que sigue la frecuencia mínima de la capa F todos los días.

El criterio propuesto en este trabajo para identificar los eventos de blanketing, teniendo en cuenta el efecto de la absorción de la región D, es el siguiente:

- *Esb* parcial: A partir de la tendencia normal de la f_{minF} durante el día, observamos un incremento y posterior descenso alcanzando el pico máximo alrededor del medio día. Esta tendencia se debe a que la absorción de la capa D es mínima hasta las 6 am, hora en la que empieza a aumentar con una tendencia de parábola invertida, alcanzando el pico máximo al medio día, y disminuyendo al segundo mínimo a las 6 pm aproximadamente. La curva ajustada es una parábola invertida, la figura 2.45 muestra la tendencia normal de la f_{minF} durante el día y la curva ajustada. Un criterio para identificar los eventos de *Esb* serán aquellos eventos cuyo valor de f_{minF} se aleje un cierto valor umbral de la curva (tomado 0.5MHz) y que además su f_{minF} sea mayor a 3.7MHz. Este criterio combinado con el modelo de bosques aleatorios para identificar capas E esporádicas nos da los casos de eventos *Esb* parcial.
- *Esb* total: Serán *Esb* total aquellos cuya f_{minF} sea mayor a 7.7 MHz o que NO haya capa F (esto se obtiene a partir del parámetro antes mencionado donde $info_Fregion = 0$), y en ambos casos debe haberse identificado una capa E esporádica con el modelo de bosques aleatorios.

Se ha escogido realizar el ajuste a la curva de parábola invertida debido a que se ha observado esta tendencia diaria en todos los años, por otro lado mostramos a continuación los resultados de algunos autores que respaldan nuestra elección.

En el Instituto Nacional Italiano para Geofísica y Vulcanología (INGV) se ha ideado un método de calibración de la ionosonda AIS-INGV para atenuación ionosférica, proporcionando datos empíricos de la pérdida por absorción [49]. La figura 2.46 incluye dos gráficos, los puntos negros representan la principal información sobre las atenuaciones (eje vertical izquierdo), los puntos azules representan la altura de cada eco (eje vertical derecho) medidos simultáneamente (eje X en UT, en este observatorio, $UniversalTime = LocalTime - 1$). Una barra de dispersión es agregada para cada punto negro, deducido de las incertidumbres de calibración. Este sondeo fue presentado empezando el 2 de septiembre del 2016 a las 08:49 UT, hasta el 4 de septiembre del 2016 a las 5:49 UT, repitiendo el sondeo cada 5 minutos, usando una frecuencia de 2.3MHz y un intervalo de altura seleccionada de 95 a 140 km.

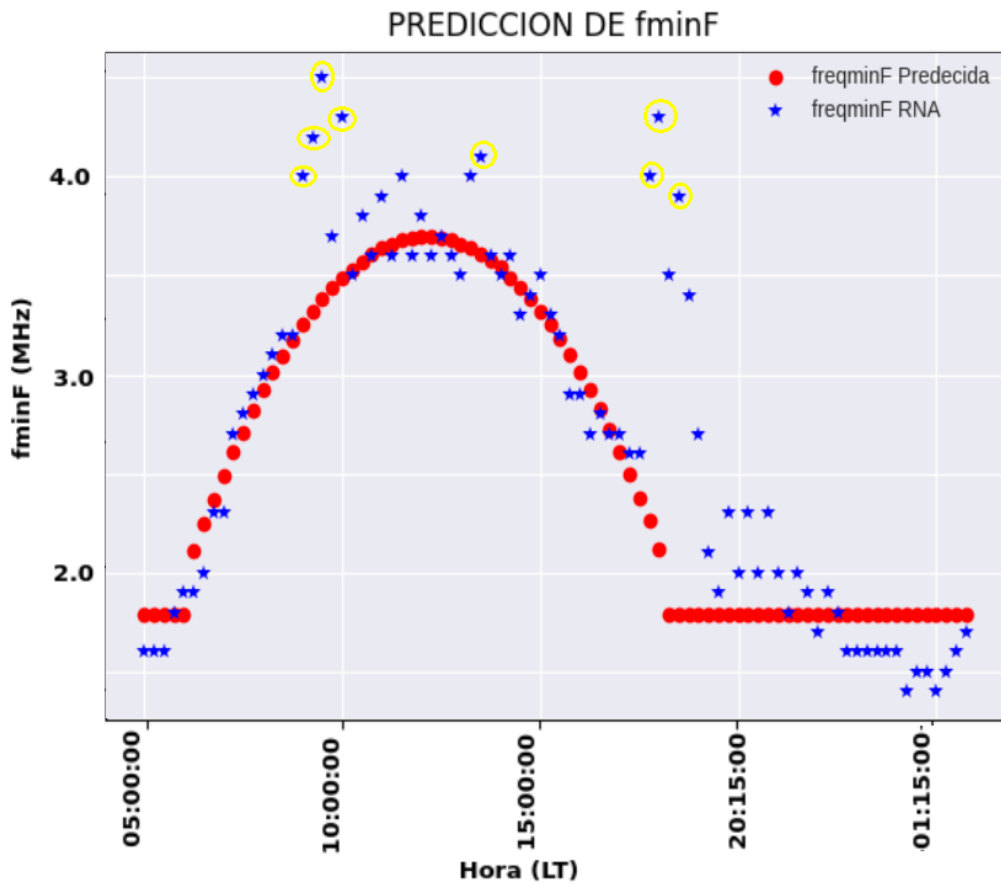


Figura 2.45: Serie de tiempo de la frecuencia mínima de la capa F para 84 ionogramas consecutivos. Tendencia típica durante el día, para el 29 de marzo del 2008. Los eventos cuyo f_{minF} se aleje un valor 0.5 MHz de la curva roja ajustada (círculo amarillo) son los posibles eventos *Esb*

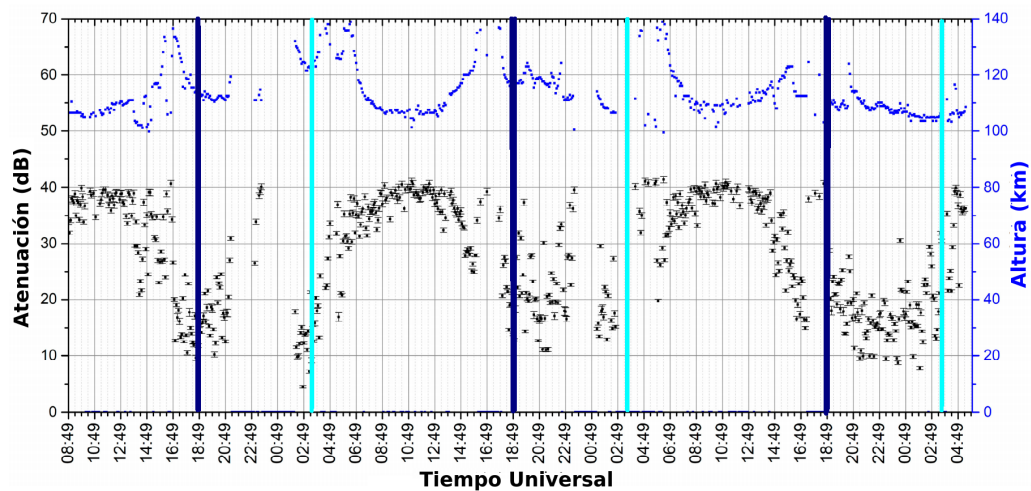


Figura 2.46: Ejemplo de un estudio de una sola capa para una frecuencia en un período de tres días. Los puntos azules representan las alturas de los ecos seleccionados (eje vertical derecho); los puntos negros representan la atenuación ionosférica, calculada después de restar la atenuación geométrica (eje vertical izquierdo). Fuente: Gilli y cols. [49].

Las líneas verticales turquesas/azules representan los momentos de la salida del Sol (sunrise) y la puesta de Sol (sunset), estimado para una altura de 75 km, esto es debido a que la principal contribución de la atenuación es debido a la absorción de la capa D, mientras la contribución de la capa E (donde ocurre la reflexión) se espera que sea despreciable. Se observa el incremento de la atenuación durante el día y la disminución durante la noche. Este tipo de gráficos es útil para monitorear la tendencia temporal para una capa particular. Las atenuaciones son absolutas pero, incluso pensando que sus valores son afectados por errores, las diferencias no lo son, tal que la evaluación de la tendencia de la atenuación es confiable [49].

Gilli y cols. [49] obtuvieron la atenuación para varios meses para la frecuencia 2-3 MHz para las horas diurnas. Los valores de atenuación medidos en las distintas horas se promediaron (valor de mediana) para todos los días de cada mes, de agosto a noviembre del 2017. El resultado se muestra en la figura 2.47, en la que cada curva se refiere a un mes diferente, en el eje horizontal se tiene la hora UT, y en el eje vertical la atenuación ionosférica (después de restar la atenuación geométrica). Las curvas se extienden solo desde aproximadamente las 5:30 a las 16:30 UT debido al interés solo en las

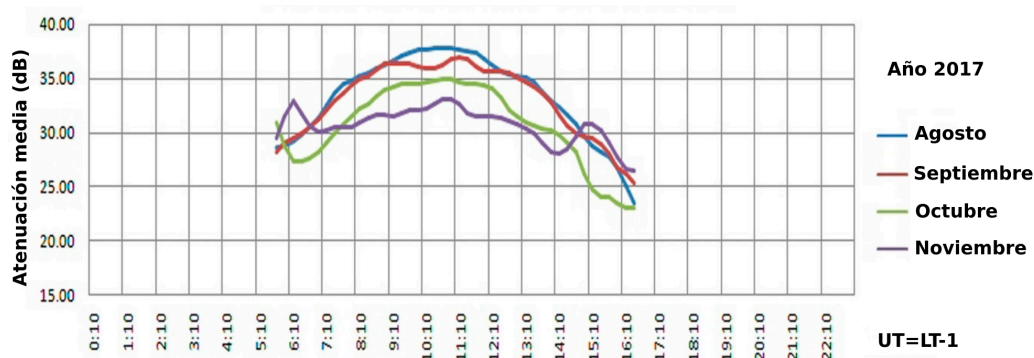


Figura 2.47: Ejemplo de la absorción media mensual en 2.3 MHz. Cada línea representa las atenuaciones como en la figura 2.46 promediadas a lo largo de un mes (solo para ecos entre 95 y 140 km). Fuente: Gilli y cols. [49].

horas del día. Incluso después de este simple estudio es posible notar que en todos los meses el máximo de atenuación ocurre al medio día (local time), mayormente debido a la capa D, además, al pasar de agosto a los meses de otoño la insolación decrece, al igual que la absorción de la capa D. Las curvas de la figura 2.47 pueden ser tomadas como representativas de una ionosfera calmada, y usarse como referencia para resaltar las desviaciones en condiciones particulares, por ejemplo tormentas solares y otros [49].

Fontell [52] han comparado un método para la pérdida por absorción que tiene en cuenta la absorción para cada onda ordinaria y extraordinaria con el método anteriormente descrito (el método de Gilli y cols. [49]). La comparación de ambos métodos se muestra en la figura 2.48, la medición de la atenuación ionosférica de 2.3 MHz por la ionosonda AIS-INGV versus la atenuación predecida que tiene en cuenta la absorción de la onda ordinaria y extraordinaria (aparecen como x de color rojo, etiquetadas como Ray Tracer). Los datos fueron registrados el 03/09/2016 desde las 00:00 horas a las 17:00 horas UTC. Los efectos de la atenuación geométrica han sido sustraídos de la data empírica.

En los resultados anteriores de otros autores se aprecia la tendencia de parábola para la absorción con máxima absorción al medio día y mínima absorción a la salida y puesta del sol, lo cual respalda nuestro criterio propuesto para la identificación de los eventos *Esb*.

Los resultados de la identificación automática del algoritmo propuesto

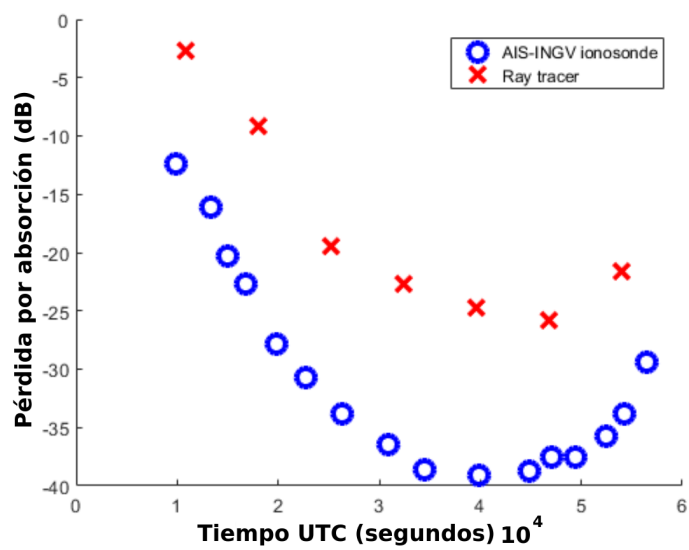


Figura 2.48: Comparación de la medición de la atenuación ionosférica de 2.3 MHz por la ionosonda AIS-INGV (de Gilli y cols. [49]) versus la atenuación predicha que tiene en cuenta la absorción de la onda ordinaria y extraordinaria. Los datos fueron registrados el 03/09/2016 desde las 00:00 horas a las 17:00 horas UTC. Los efectos de la atenuación geométrica han sido sustraídos de la data empírica. Fuente: Fontell [52].

	Clase predicha = 1	Clase predicha = 0
Clase real = 1	Verdaderos positivos (VP)	Falsos negativos (FN)
Clase real = 0	Falsos positivos (FP)	Verdaderos negativos (VN)

Cuadro 2.1: Matriz de Confusión

e implementado se muestran en el anexo 1, incluido los falsos positivos. Se muestra también los parámetros anteriormente descritos.

2.4. Evaluación y eficiencia del software

Para la evaluación de la eficiencia se ha comparado con los eventos de *Esb* identificados visualmente de los años 2007, 2008 y 2009 por Percy Córdor, investigador del Instituto Geofísico del Perú y del estudiante de Física Luis D. Cárdenas Andrade de la Universidad Nacional de Ingeniería, quien identificó y escaló manualmente los eventos *Esb* de los años 2010, 2011, 2013, 2014, 2015 y 2016. Las capas E esporádicas blanketing observadas con los ionogramas de la DPS-4 del Radio Observatorio de Jicamarca podrían considerarse como **eventos raros** pues pueden llegar a presentarse cerca a 60 eventos en un año de mínima actividad solar (teniendo en cuenta el criterio para identificarlos considerados en esta tesis) y 10 eventos en un año de máxima actividad solar. Para este tipo de eventos raros, las métricas usadas para medir la eficiencia de los métodos de identificación suelen ser la Sensibilidad (S), la Presición (P) y el F1-Score [53]. Estos son calculados a partir de la matriz de confusión mostradas en la tabla 2.1.

Se consideran la siguiente definición de las métricas:

$$PRESICION = P = \frac{VP}{VP + FP}, \quad (2.4.1)$$

$$SENSIBILIDAD = S = \frac{VP}{VP + FN}, \quad (2.4.2)$$

$$F1 - SCORE = \frac{2 * VP}{2 * VP + FP + FN}, \quad (2.4.3)$$

Debido a que se utilizó los años 2008, 2009, 2013, 2014 y 2015 para entrenar el modelo de bosques aleatorios visto en 2.3.3, entonces para evaluar las métricas anteriores usaremos eventos *Esb* de otros años. Usando para el test, los años 2007, 2010, 2011 y 2016 (la tabla de identificación visual se

	<i>Esb</i> identificado	<i>Esb</i> no identificado
<i>Esb</i> real	161	18
No <i>Esb</i> real	55	–

Cuadro 2.2: Matriz de Confusión por evento de *Esb* identificado por el software de identificación desarrollado.

encuentra en el anexo 2), tenemos la siguiente matriz de confusión mostrada en la tabla 2.2

A partir de la cual se obtuvo:

- $S = 89\%$,
- $P = 72\%$,
- $F_1 = 80\%$.

Notamos que tenemos una sensibilidad de 89% lo cual asegura que no se perderá información relevante y podremos estudiar las tendencias. Sin embargo, se tiene una precisión de 72% debido principalmente a la baja sensibilidad de la DPS-4 al detectar las capas F1 y esto introduce muchos falsos positivos en el algoritmo que ajusta la f_{minF} y corrige la absorción de la capa D, esto se discutirá más adelante. Para salvar el bajo porcentaje de precisión, común en eventos raros, se descartarán manual/visualmente estos eventos de la predicción dada por la DPS-4.

Además haciendo una comparación de los valores obtenidos por el programa de identificación para los *Esb* de los años de validación (2007, 2010, 2011 y 2016) con los obtenidos visualmente, se obtiene un error raíz cuadrático medio (RMSE) para los parámetros f_bEs y hEs para los eventos *Esb* parciales.

Se obtuvo:

$$RMSE_{f_bEs} = 0.4 \text{ MHz y}$$

$$RMSE_{hEs} = 4.6 \text{ km .}$$

Capítulo 3

Estadística de la ocurrencia de las capas E esporádicas Blanketing

3.1. Datos entre 2001 y 2018 de la digisonda DPS-4

Los eventos identificados por el programa y algoritmo desarrollado en esta tesis, presentados en matrices de ocurrencia para registros entre el 2001 y 2018, se muestran en las figuras 3.1 (2001 - 2006), 3.2(2007 - 2012) y 3.3(2013 - 2018). Las matrices de ocurrencia muestran la ocurrencia de capas *Esb* en función de la hora local en sus filas y el día del año en sus columnas (para fines prácticos se ha etiquetado los meses). Los últimos meses del 2017 y los primeros meses del 2018 la digisonda estuvo fallando por eso faltan datos.

3.1.1. Variabilidad respecto a días y horas del día

La figura 3.4 muestra un histograma de las horas del día en la que se presentaban los *Esb* entre el 2001 y 2018. Tener en cuenta que en algunos años falta datos. Notamos que principalmente se presentan entre las 7 am y las 8 pm, con un pico máximo a las 4 pm y otro segundo pico menor a las 8-9 am. Si en una misma hora aparecen más de 1 ionograma, solo se está considerando un conteo por hora.

La figura 3.5 muestra un histograma de los días del año en los que se presentaban los *Esb* entre el 2001 y 2018. Tener en cuenta que en algunos años falta datos. En general, ocurre con mayor frecuencia en los meses del solsticio de diciembre, es decir, en noviembre, diciembre y enero. Si en un mismo día aparecen más de 1 ionograma, solo se está considerando un conteo



Figura 3.1: Ocurrencia *Esb* identificado entre 2001 y 2006.



Figura 3.2: Ocurrencia *Esb* identificado entre 2007 y 2012.

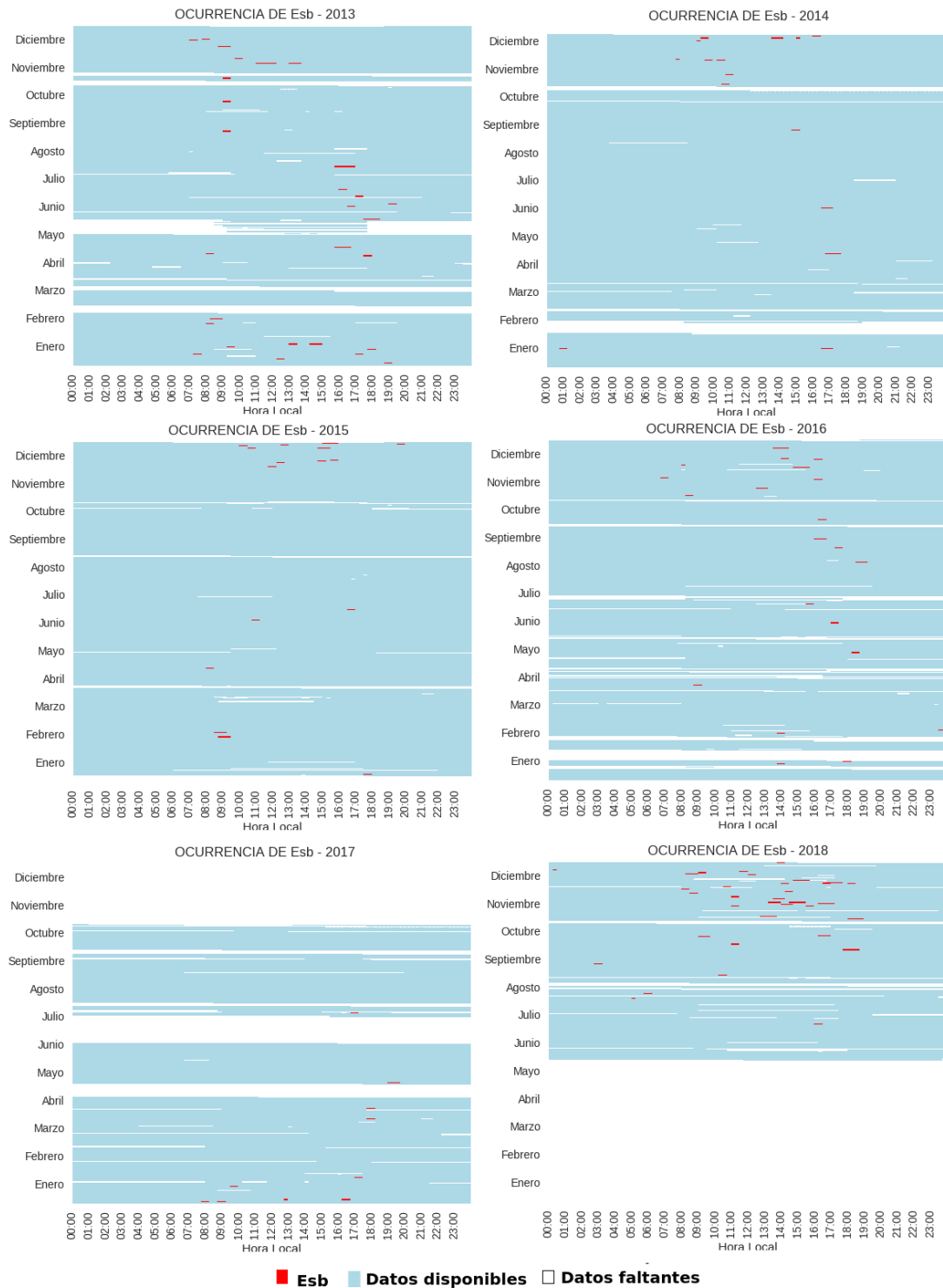


Figura 3.3: Ocurrencia *Esb* identificado entre 2013 y 2018.

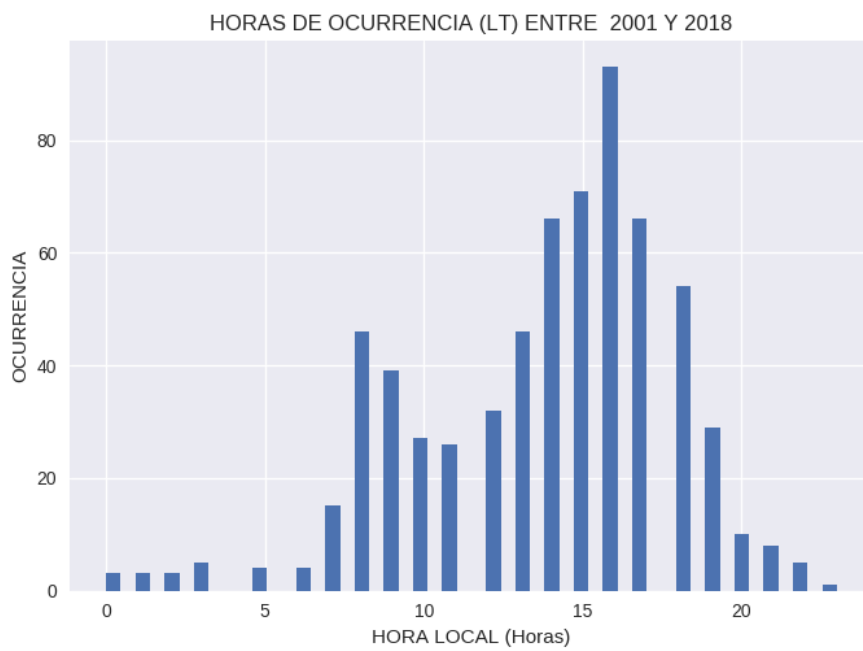


Figura 3.4: Distribución de ocurrencia de eventos *Esb* identificados en función de la hora local entre 2001 y 2018.

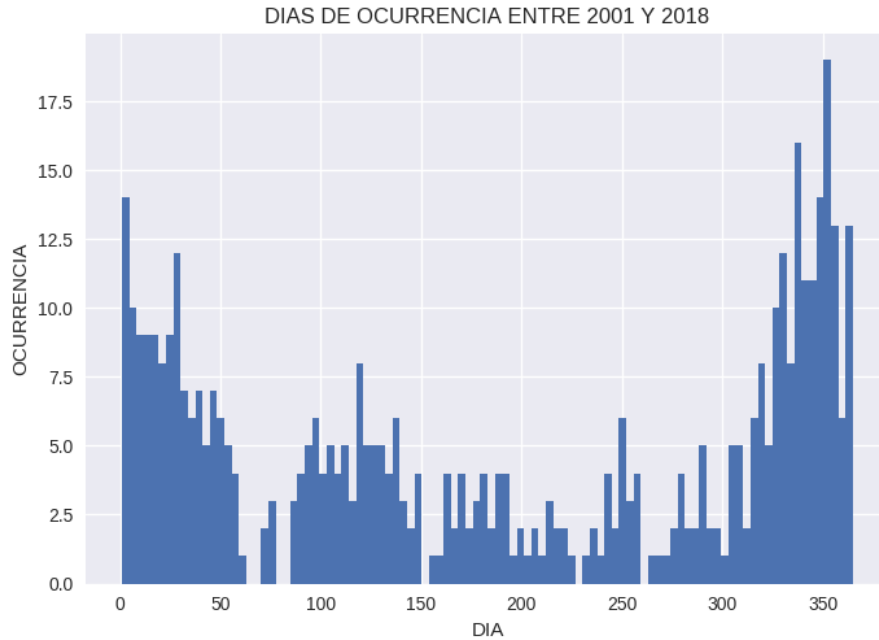


Figura 3.5: Distribución de ocurrencia de eventos *EsB* identificados en función de días del año entre 2001 y 2018.

por día.

La figura 3.6 muestra un histograma de las alturas de las *EsB* entre el 2001 y 2018. Tener en cuenta que en algunos años falta datos. En general, se observa que aparecen entre 90 y 135 km, con un pico entre 95 y 100 km. Aquí se están considerando todos los ionogramas identificados.

3.1.2. Variabilidad respecto a estaciones del año

La figura 3.7 muestra los días de ocurrencia de las *EsB* por días cercanos a los solsticios y equinoccios en los que se presentaban los *EsB* entre el 2001 y 2018. La curva roja cuyo eje se encuentra en el lado derecho indica el porcentaje de días en los que no hay datos para cada año. El rango de días exactos para hacer referencia a los días más próximos a los solsticios y equinoccios han sido tomados similares a los considerados en Chau y Kudeki [3].

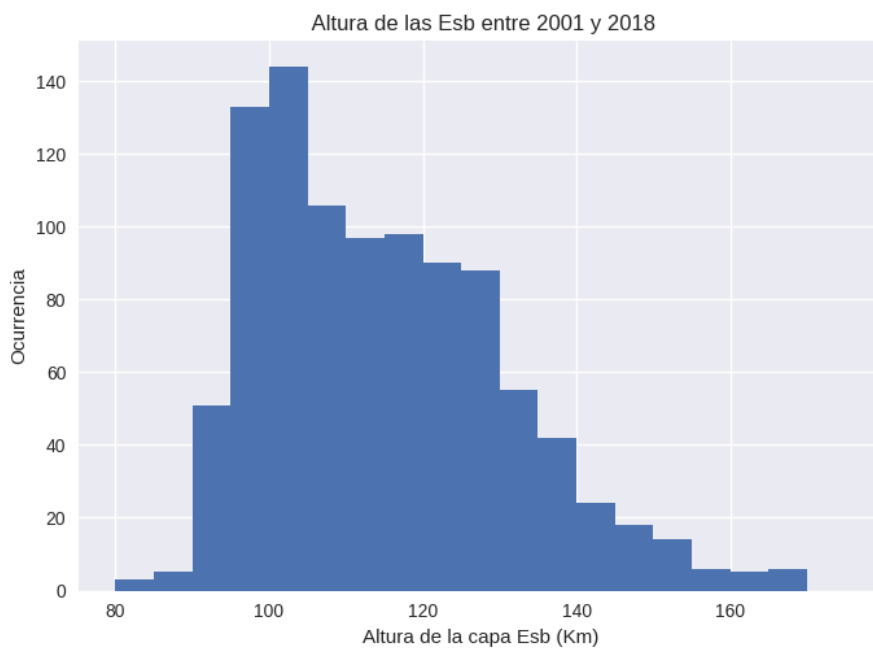


Figura 3.6: Distribución de ocurrencia de ionogramas con *Esb* identificados en función de alturas de las *Esb* identificado entre 2001 y 2018 en km.

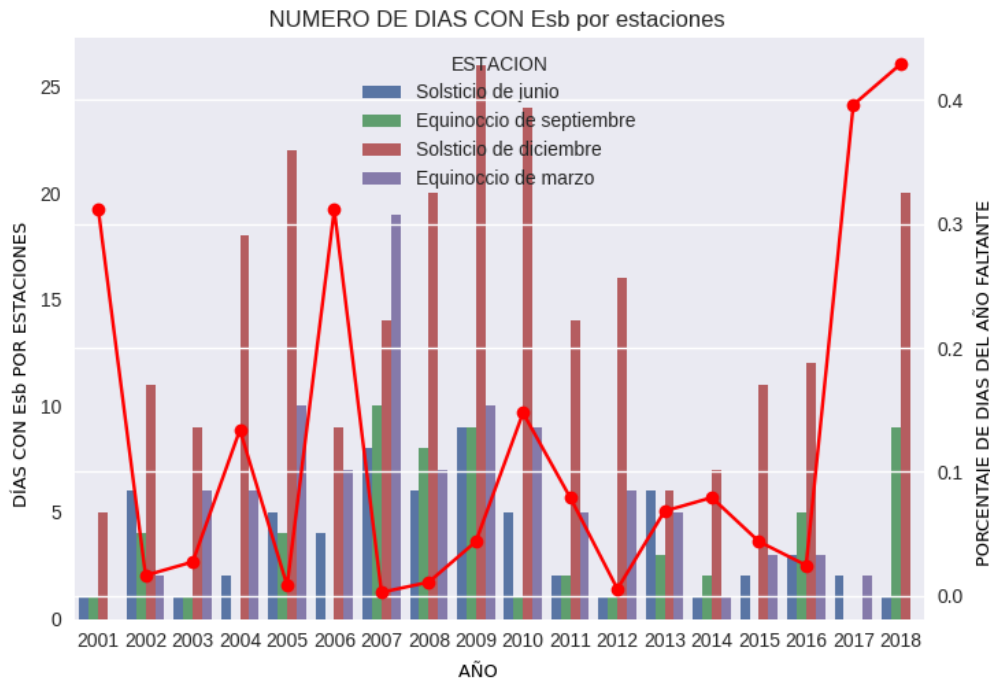


Figura 3.7: Días de ocurrencia de *Esb* por estaciones entre 2001 y 2018.

- Equinoccio de septiembre: 220 - 314 días del año
- Solsticio de diciembre: 315 - 33 días del año
- Equinoccio de marzo: 34 - 128 días del año
- Solsticio de junio: 129 - 219 días del año

Con el fin de no ser redundante, cada vez que se mencione equinoccio o solsticio (o los meses cercanos a los equinoccios o solsticios), se estará haciendo referencia a los días del año en el rango de días presentado líneas arriba. Por ejemplo, para el caso del solsticio de diciembre, se están considerando días del mes de noviembre, diciembre del respectivo año y días del mes de enero (y los dos primeros días de febrero) del siguiente año.

La figura 3.8 muestra histogramas de las horas de ocurrencia de las *Esb* por solsticios y equinoccios en los que se presentaban los *Esb* entre el 2001 y 2018. Notamos que los picos de ocurrencia aún se conservan en el solsticio de diciembre y equinoccio de marzo. Para el solsticio de junio se tiene la mayor

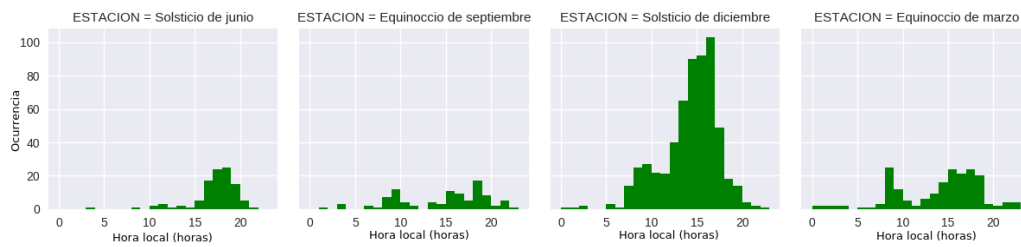


Figura 3.8: Histograma de horas de ocurrencia de *Esb* por estaciones entre 2001 y 2018.

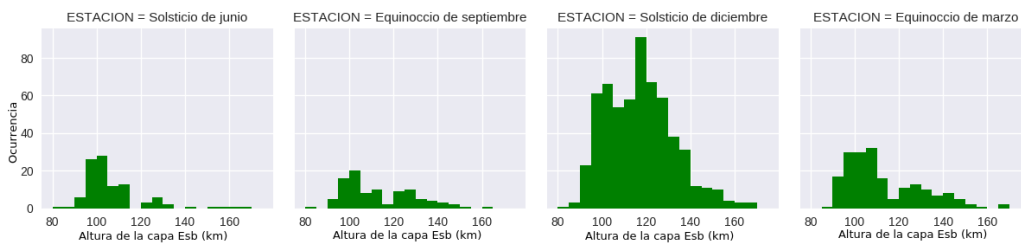


Figura 3.9: Histograma de alturas de km de *Esb* por estaciones entre 2001 y 2018.

ocurrencia entre las 4 y las 7 pm.

La figura 3.9 muestra histogramas de las alturas de las capas *Esb* por solsticios y equinoccios en los que se presentaban los *Esb* entre el 2001 y 2018. Notamos que en los meses del solsticio de junio y los equinoccios, los eventos *Esb* se presentan mayormente en un rango de 95 y 110 km. En los meses del solsticio de diciembre se presentan mayormente entre 90 y 135 km.

3.1.3. Variabilidad con el ciclo solar

La figura 3.10 muestra un conteo de los días donde ocurrió *Esb* para los años entre 2001 y 2018 y en el eje de la derecha (curva roja) se muestra el porcentaje de la data faltante.

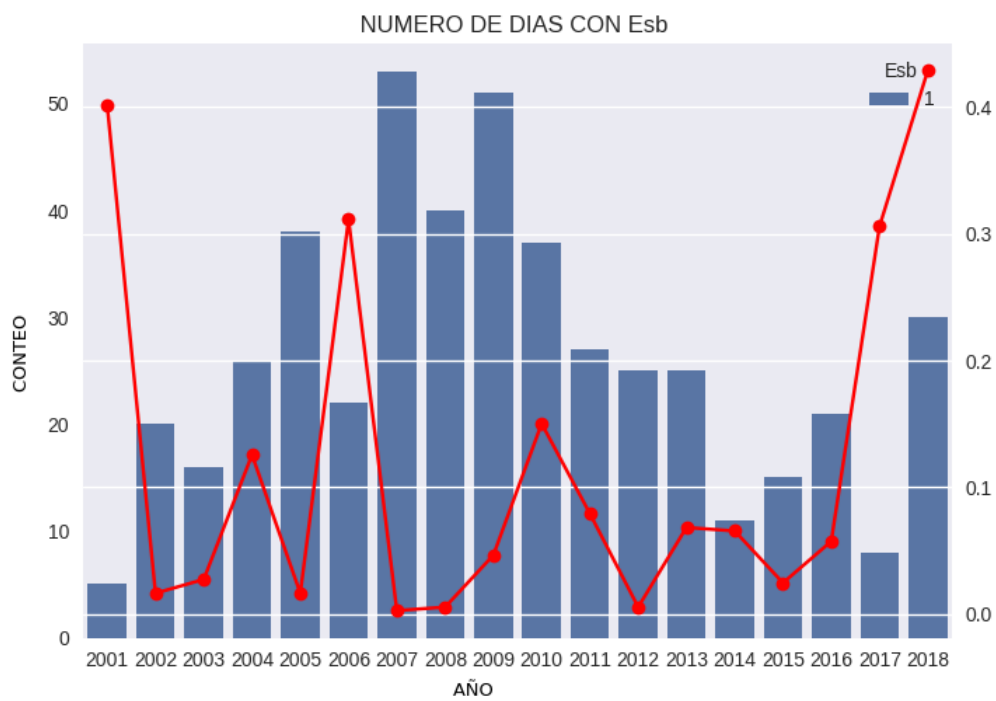


Figura 3.10: Días de ocurrencia de *Esb* por año.

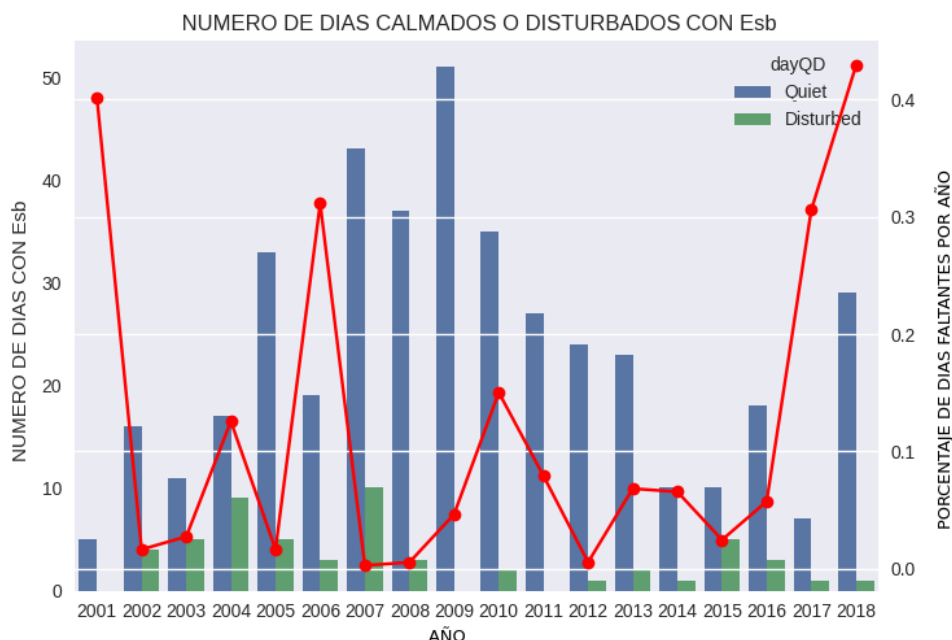


Figura 3.11: Días calmados o disturbados con *Esb* por año, el eje de la derecha muestra el porcentaje de data faltante.

3.1.4. Variabilidad en días calmados y disturbados

La figura 3.11 muestra un conteo de los días calmados y disturbados donde ocurrió *Esb* para los años entre 2001 y 2018.

En las figuras 3.12 y 3.13 se muestra el porcentaje de ocurrencia de días con *Esb* y el porcentaje de días donde faltan datos para los días calmados y disturbados del respectivo año.

3.1.5. Parámetros $h'Es$, $fbEs$ y $foEs$

La figura 3.14 muestra un diagrama de cajas de las frecuencias de blanketing. Aquellos blanketing total en los que no aparece la traza de la capa F han sido considerados con $fbEs$ igual a 8.0 MHz. Los extremos de la caja están limitadas por sus cuartiles, es decir el extremo inferior es el percentil 25, la línea interior es el percentil 50 y el extremo superior es el percentil 75. Este diagrama de cajas ha sido generado con el método boxplot del módulo seaborn de python. Además, se está considerando los días del solsticio de

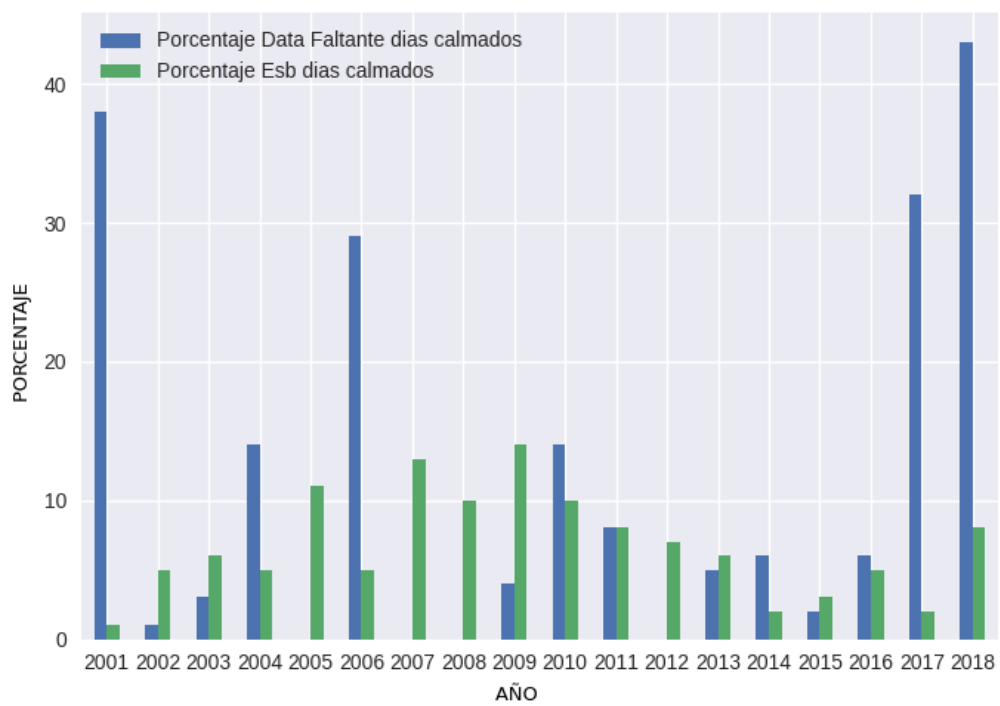


Figura 3.12: Porcentaje de días con *Esb* respecto a los días calmados.

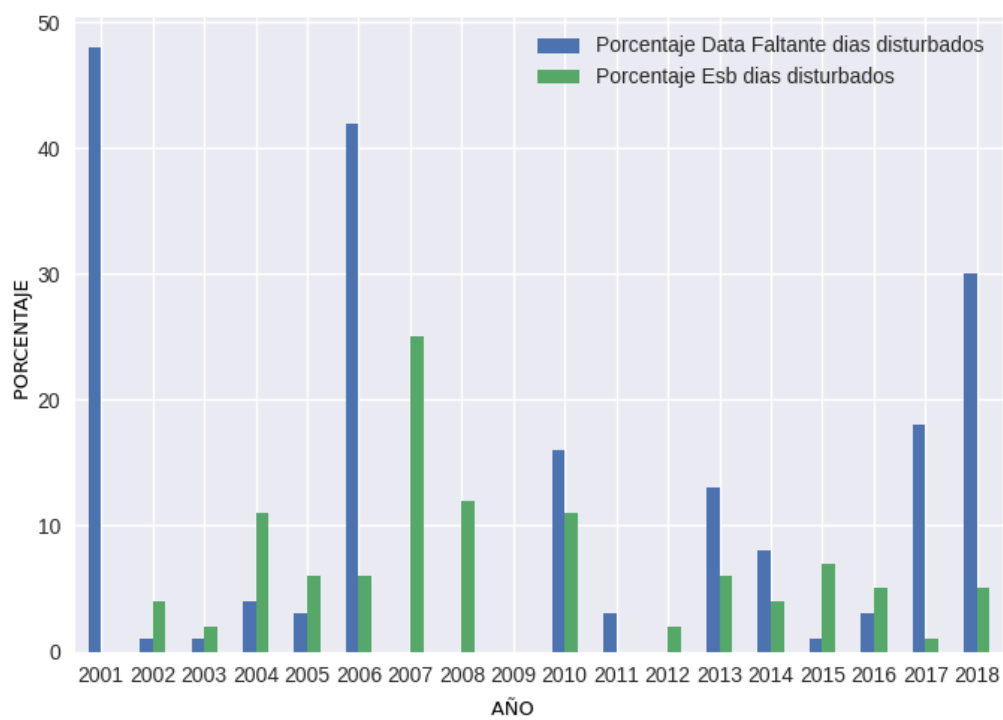


Figura 3.13: Porcentaje de días con *Esb* respecto a los días disturbados.

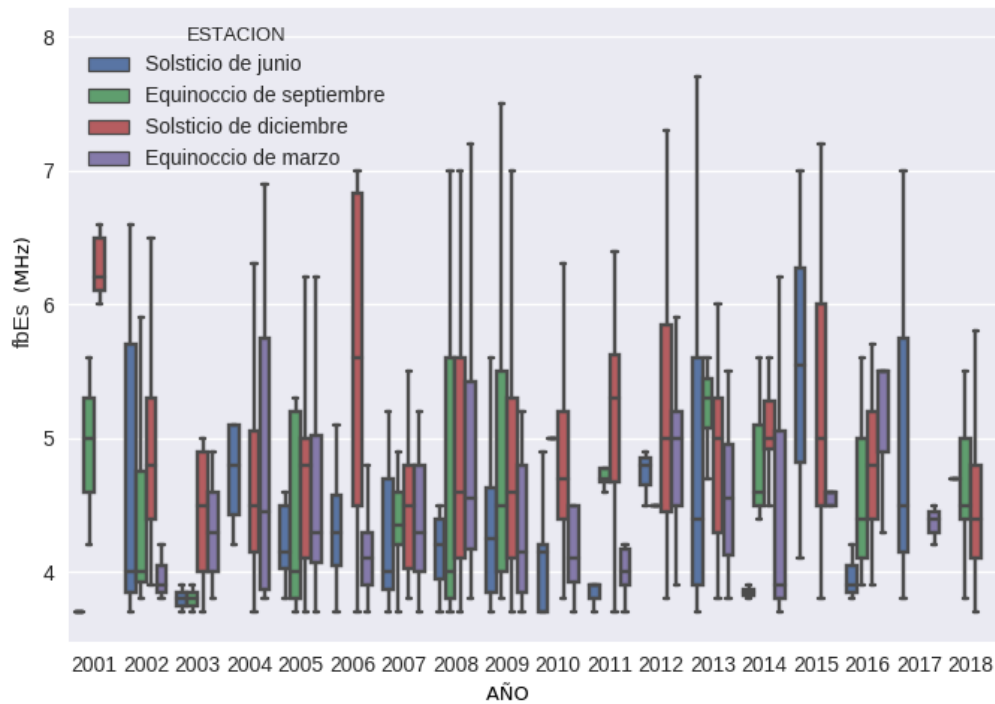


Figura 3.14: Diagrama de cajas de las frecuencias de blanketing por año.

diciembre como aquellos que abarcan los respectivos días de los meses de noviembre y diciembre del año que figura, así como los pertenecientes al mes de enero del siguiente año.

3.2. Comparación con ionogramas de la ionosonda VIPIR

Se ha realizado la comparación de los *Esb* encontrados en los ionogramas de la DPS4 con los ionogramas disponibles de la ionosonda VIPIR y se ha obtenido que en algunos casos coincide que en ambos ionogramas las capas E esporádicas son blanketing (ver figura 3.15) y en otros casos, solo son blanketing en la DPS-4 mas no en VIPIR (ver figura 3.16).

Se realizó una comparación de los ionogramas que en la digisonda presentaban eventos de blanketing con los ionogramas de VIPIR, luego de comparar la data disponible de VIPIR para el año 2009 y cuyos ionogramas son adecua-

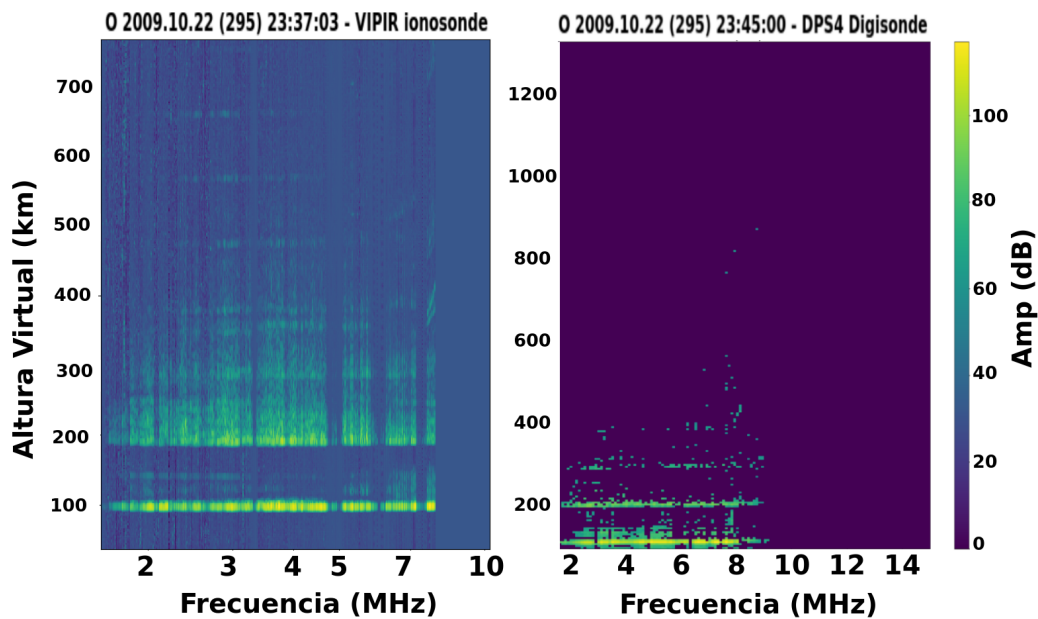


Figura 3.15: E esporádica blanketing en los ionogramas de VIPIR y la DPS-4.

	DPS-4	VIPIR
Potencia de transmisores	2 x 250 W	4 x 1 kW
Rango de frecuencias de operación	1.0 - 12.0 MHz	0.3 - 20 MHz
Pasos de frecuencia	0.1 MHz	logarítmica
Ganancia	0 dB	10 dB

Cuadro 3.1: Comparación características ionosonda VIPIR y DPS-4 del ROJ

dos y no polémicos, se hizo una comparación para 27 eventos de blanketing identificados con la digisonda y se encontró que 7 de dichos eventos no eran blanketing en VIPIR (ver anexo 3), la mayoría asociados al ocultamiento de la capa F1. Esto podría deberse a la mayor potencia que posee la ionosonda VIPIR (VIPIR tiene 4kW vs los 500 W de la digisonda), lo que le permite detectar mejor la capa F1. La tabla 3.1 muestra una comparación de algunas características de la ionosonda VIPIR y la DPS-4 del ROJ. Las características de la digisonda han sido obtenidas de su manual y de conversaciones con el operador local, y de VIPIR han sido obtenidas de Reyes [1] y conversaciones con el operador local.

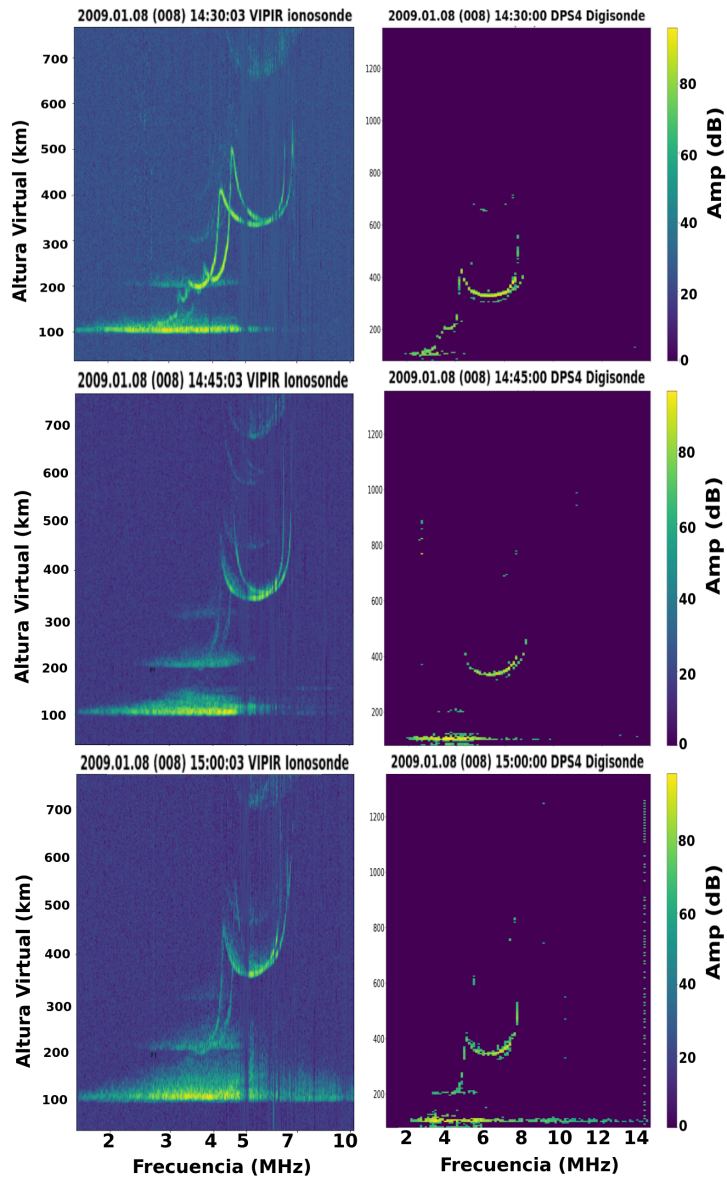


Figura 3.16: E esporádica blanketing en los ionogramas de la DPS-4 mas no en VIPIR.

3.3. Magnetogramas

3.3.1. En la ocurrencia de los eventos *Esb*

Con el fin de observar la variación y comportamiento de la intensidad del electrochorro ecuatorial (o contraelectrochorro) en el tiempo de ocurrencia de las capas *Esb* obtenidas a partir de la data de la digisonda, usualmente se observa la variación de la componente horizontal del campo magnético terrestre registrado por los magnetómetros de dos estaciones terrenas, una ubicada en la región del electrochorro ecuatorial y otra fuera de esta región. En este estudio se usará el ΔH de la estación de Piura (PIU), fuera del ecuador magnético y de Jicamarca (ROJ), en el ecuador magnético. Ambos pertenecientes a la red IGP. Tenemos $\Delta H = H_{ROJ} - H_{PIU}$. Este parámetro ΔH es proporcional a la intensidad del electrochorro ecuatorial (contraelectrochorro ecuatorial) cuando ΔH es positivo (negativo).

La serie de tiempo ΔH por minuto ha sido descargado de la página de LISN (<http://lisn.igp.gob.pe/data/>) para los días calmados de los años entre 2001 y 2018. Para cada serie de tiempo de ΔH de los magnetogramas se han obtenido los siguientes parámetros para los ΔH en las ocurrencias de los *Esb*, en un rango desde 6 minutos antes hasta 6 minutos después del registro de la capas *Esb* (ver figura 3.17):

- El promedio de los ΔH (figura 3.18).
- La pendiente obtenida al ajustar los valores de ΔH a una recta (figura 3.19).
- El error cuadrático medio obtenido a partir de los valores reales y la recta ajustada para los valores de ΔH (figura 3.20).
- La razón entre el valor promedio de los ΔH , en un rango desde 6 minutos antes hasta 6 minutos después del registro de la capas *Esb*, y el valor máximo (mínimo) de los valores de ΔH si el promedio de los ΔH es positivo (negativo), este máximo (mínimo) es tomado en un rango de 5 horas antes y después del registro de la capas *Esb*. (figura 3.21).

La figura 3.18 muestra el histograma de los valores promedio de los ΔH por minuto en un rango desde 6 minutos antes hasta 6 minutos después de las ocurrencias de los *Esb*. Se observa una distribución cuyos percentiles 10, 50 y 90 son -24.2, 2.4 y 26.8 nT respectivamente, lo cual puede indicar que las condiciones en las que se producen las *Esb* son en condiciones de contraelectrochorro ecuatorial (para ΔH negativos) y condiciones de electrochorro

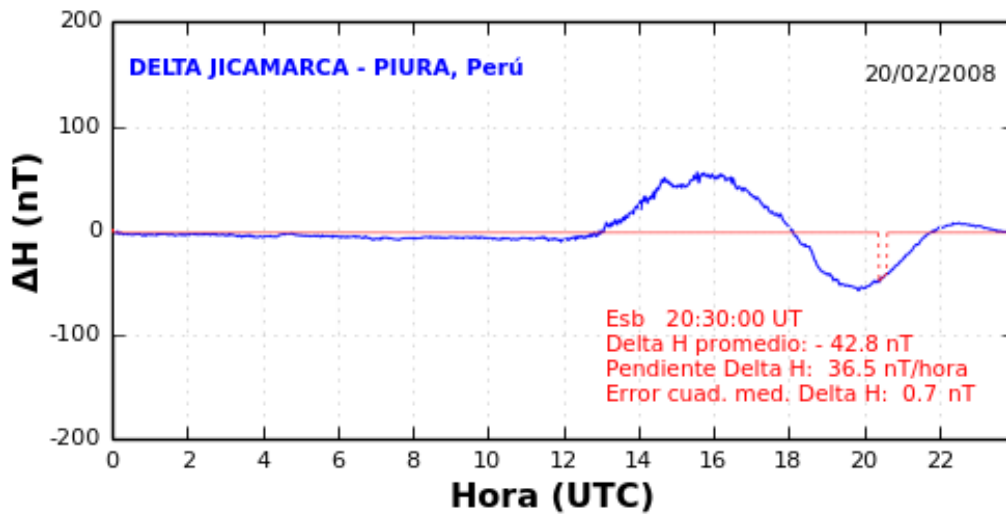


Figura 3.17: Magnetograma muestra el ΔH y los parámetros calculados alrededor de 6 minutos antes y 6 minutos después de la ocurrencia del *Esb* a las 20:30 horas UT el día 20/02/2008.

ecuatorial no muy intensas (valores de ΔH positivos).

La figura 3.19 muestra el histograma de las pendientes de los ΔH obtenida al ajustar los valores de ΔH a una recta en un rango desde 6 minutos antes hasta 6 minutos después de las ocurrencias de los *Esb*. Se observa una distribución cuyos percentiles 10, 50 y 90 son -18.4, 4.4 y 35.7 nT/hora respectivamente, lo cual puede indicar que las condiciones en las que se producen las capas *Esb* son en condiciones donde la corriente del contraelectrochorro o electrochorro está variando lentamente.

La figura 3.20 muestra el error cuadrático medio obtenido a partir de los valores reales y la recta ajustada para los valores de ΔH en un rango desde 6 minutos antes hasta 6 minutos después de las ocurrencias de los *Esb*. Se observa una distribución cuyos percentiles 10, 50 y 90 son 0.3, 0.7 y 1.6 nT/hora respectivamente, lo cual muestra que en el rango tomado estos valores se ajustan muy bien a una recta.

La figura 3.21 muestra un histograma de la razón entre el valor promedio de los ΔH (en un rango de 6 minutos antes y después del registro de las capas *Esb*) y el valor máximo (mínimo) de los valores de ΔH si el promedio de los

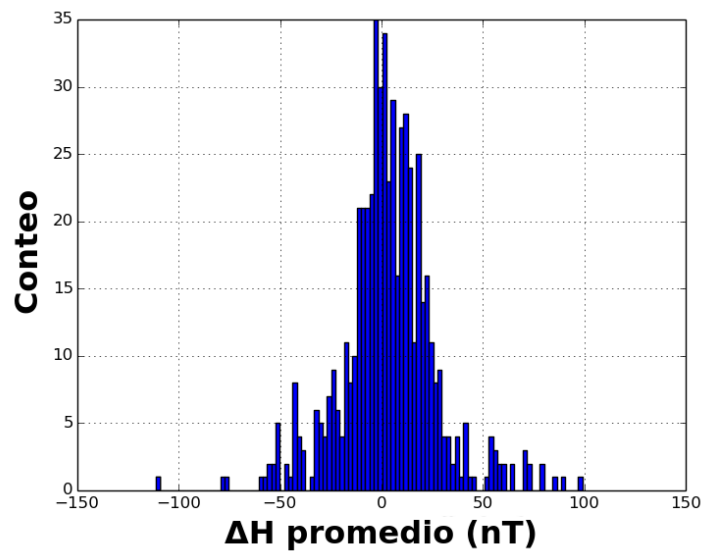


Figura 3.18: Histograma de los valores promedio de los ΔH por minuto en un rango desde 6 minutos antes hasta 6 minutos después de las ocurrencias de los *Esb*.

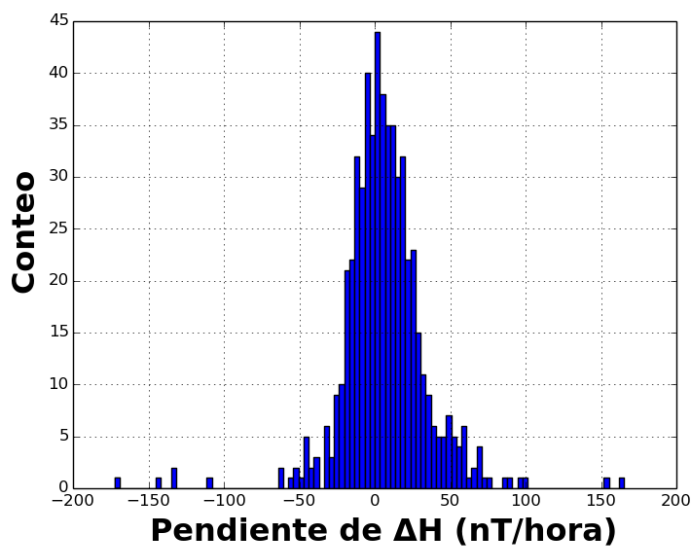


Figura 3.19: Histograma de las pendientes de los ΔH obtenida al ajustar los valores de ΔH a una recta en un rango desde 6 minutos antes hasta 6 minutos después de las ocurrencias de los *Esb*.

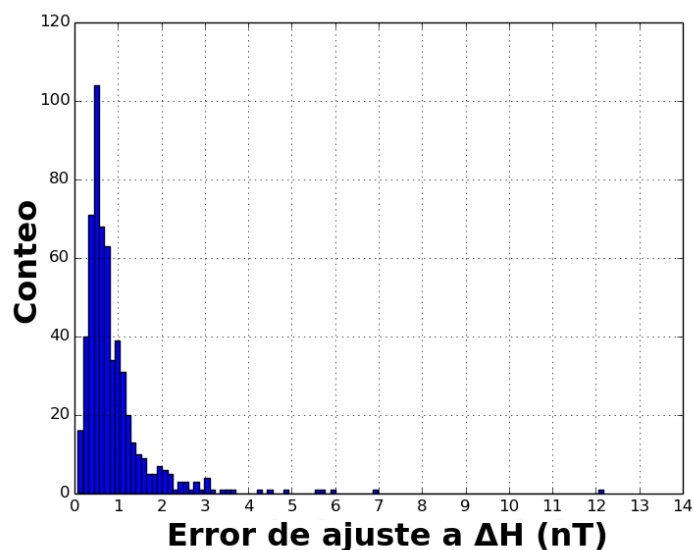


Figura 3.20: Histograma de los errores cuadrático medio obtenidos a partir de los valores reales y la recta ajustada para los valores de ΔH en un rango desde 6 minutos antes hasta 6 minutos después de las ocurrencias de los *Esb*.

ΔH es positivo (negativo), este máximo (mínimo) es tomado en un rango de 5 horas antes y después del registro de la capas *Esb*. Se observa una distribución cuyos percentiles 10, 50 y 90 son -0.77, 0.05 y 0.63 respectivamente, lo cual muestra que ocurren en condiciones de contra electrochorro (incluso alrededor de su pico mínimo) y electrochorro débil (al inicio o final del EEJ).

La figura 3.22 muestra un gráfico de los ΔH promedio (en un rango de 6 minutos antes y después del registro de la capas *Esb*) y la razón definida en el párrafo anterior, es decir la razón entre ΔH promedio y el valor máximo (mínimo) de los valores de ΔH si el promedio de los ΔH es positivo (negativo) de los registros de las capas *Esb*, se observa que los eventos ocurren en igual medida en electrochorro (ΔH positivo) y contraelectrochorro (ΔH negativo) y que en el caso de electrochorro estos ocurren mayormente cuando el electrochorro es débil (considerando valores menores a 25 nT) y mayormente cuando está iniciando o terminando (valores en el eje Y menores a 0.5); en el caso de contraelectrochorro se tiene que estos pueden ocurrir de forma significativa cuando el electrochorro está iniciando así como cuando está llegando a su valor mínimo.

La figura 3.23 muestra un gráfico de ΔH promedio vs pendiente de ΔH

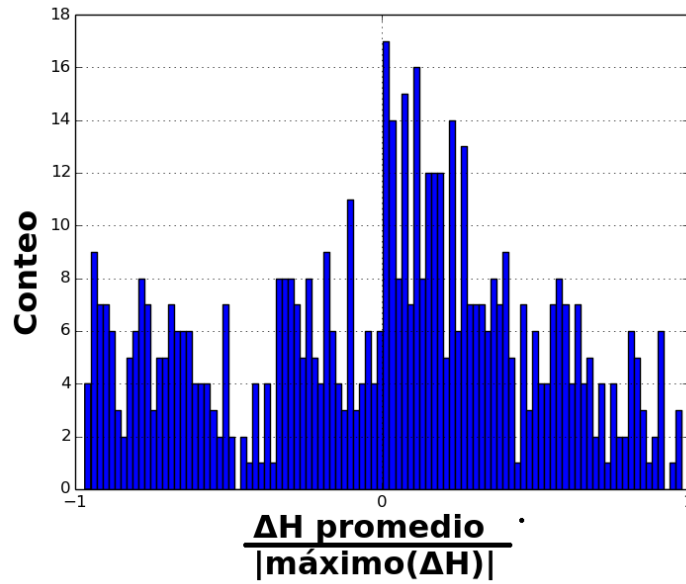


Figura 3.21: Histograma de la razón entre el valor promedio de los ΔH (en un rango de 6 minutos antes y después del registro de las capas *Esb*) y el valor máximo (mínimo) de los valores de ΔH si el promedio de los ΔH es positivo (negativo), este máximo (mínimo) es tomado en un rango de 5 horas antes y después del registro de la capas *Esb*.

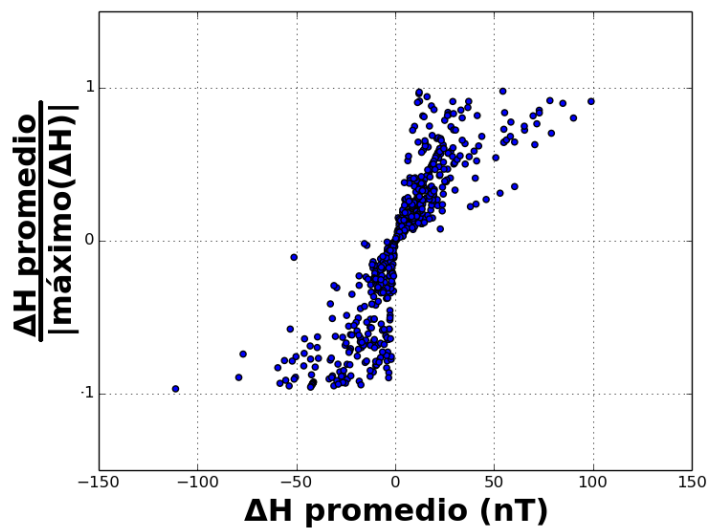


Figura 3.22: Tasa $\Delta H / \Delta H_{maximo}$ vs $\Delta H_{promedio}$.

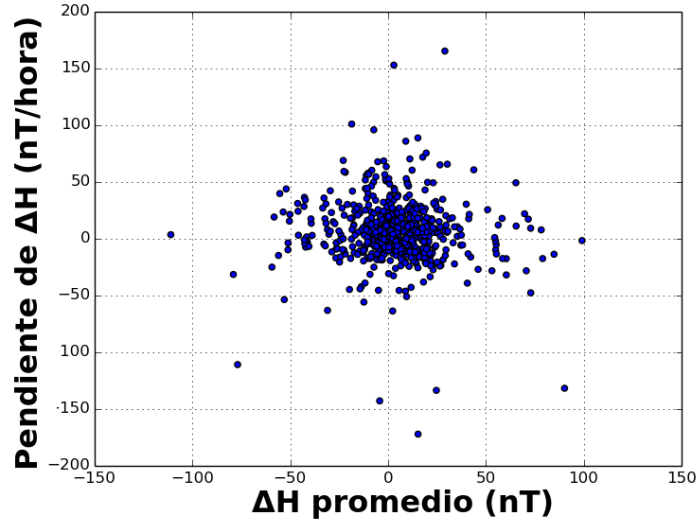
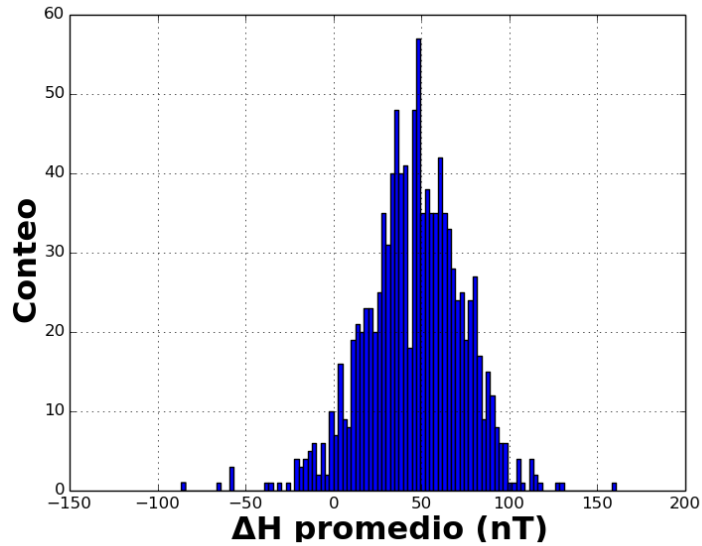


Figura 3.23: ΔH promedio vs pendiente de ΔH en un rango desde 6 minutos antes hasta 6 minutos después de las ocurrencias de los *Esb*.

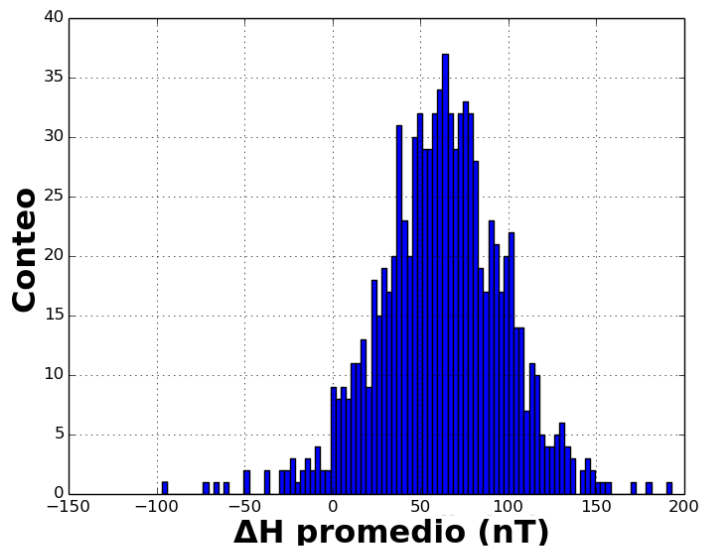
en un rango desde 6 minutos antes hasta 6 minutos después de las ocurrencias de los *Esb*. Se observa que las capas *Esb* se presentan en cantidades similares tanto para cuando el electrochorro débil o contraelectrochorro están iniciando (pendiente positiva) o terminando (pendiente negativa).

3.3.2. En los días de no ocurrencia de los eventos *Esb*

Con el fin de observar la intensidad del electrochorro para días calmados en años de mínima y baja actividad solar en días en los que no se identificó eventos *Esb*, a fin de no considerar la posible influencia de las capas *Esb* en los ΔH , se ha calculado el ΔH promedio (promedio desde 6 minutos antes hasta minutos después) para tiempos aleatorios entre las 11 y las 13 horas (hora local). Se han considerado los años 2007, 2008, 2009, 2016, 2017 y 2018 como años de mínima actividad solar y 2001, 2002, 2003, 2013 y 2014 como máximo solar. La figura 3.24 muestra los histogramas de estos ΔH , se observa que los percentiles 10, 50 y 90 para el histograma de ΔH promedio en años de mínima actividad solar son 12.0, 47.0 y 79.5 respectivamente, y para máximo solar son 17.0, 62.6 y 104.9 respectivamente. Esto nos muestra que en años de máxima actividad solar se tiene una mayor corriente del electrochorro ecuatorial para días calmados.



a) Histograma ΔH promedio para años de mínima actividad solar: 2007, 2008, 2009, 2016, 2017 y 2018.



b) Histograma ΔH promedio para años de máxima actividad solar: 2001, 2002, 2003, 2016, 2017 y 2018

Figura 3.24: ΔH promedio entre las 11 y las 13 horas (hora local) para días calmados en los que no hubo ocurrencia de *Esb* para años de a) Mínima actividad solar (2007, 2008, 2009, 2016, 2017 y 2018) y b) Máxima actividad solar (2001, 2002, 2003, 2013 y 2014).

Capítulo 4

Análisis de los resultados estadísticos

4.1. Comparación de resultados

A continuación, mostramos una comparación de los resultados obtenidos en esta tesis con los resultados de otros autores.

- En general, ocurre con mayor frecuencia en los meses próximos al solsticio de diciembre (solsticio de verano en el hemisferio sur), es decir en noviembre, diciembre y enero. Sobre todo en los años de mínima actividad solar (ver figuras 3.5 y 3.7). Lo cual coincide con los estudios recientes de Yadav y cols. [19] para ionogramas registrados cada quince minutos para los años entre 1996 y 2006 en el observatorio ecuatorial de Trivandrum (dip latitude 0.5° N) en la India. Además, Prasad y cols. [54] realizaron una comparación de la ocurrencia de *Esb* en tres observatorios de distintas latitudes, Trivandrum (India, latitud ecuatorial, 0.3° N), Waltair (India, latitud baja, 20° N) y Kokubunji (Japón, latitud media, 49.1° N) para el año 2001 (año de máxima actividad solar) para los meses de octubre, diciembre y julio representando un mes próximo al equinoccio (equinoccio de septiembre en el hemisferio norte), invierno y verano (en el hemisferio norte) respectivamente, registrados cada hora. Prasad y cols. [54] encontraron que la ocurrencia de *Esb* es mayor en la estación Kokubunji de latitud media para los tres meses considerados, y para baja latitud (estación de Waltair) la ocurrencia es mayor en el mes de julio del verano local. Reddy y Matsushita [55] usaron ionogramas obtenidos cada hora en el periodo desde 1958 a 1965 registrados entre las 04 y 20 horas para diez observatorios de distintas latitudes (bajas y medias) con dip latitude variando entre -27 y 56 grados y encontraron

que la ocurrencia de *Esb* en los meses del verano local es mayor que en los equinoccios e invierno.

- En años de mínima actividad solar aparecen más eventos *Esb* que en años de máxima actividad solar (figura 3.10) lo cual coincide con los estudios recientes de Yadav y cols. [19]. Los estudios de Reddy y Matsushita [55] para latitudes medias y bajas también está de acuerdo con este resultado.
- Respecto a los días calmados y disturbados, se observa que la tendencia de mayor ocurrencia en años de mínima actividad se mantiene para días calmados y no se observa esta tendencia para días disturbados (ver figuras 3.12 y 3.13).
- Respecto a la hora de ocurrencia, notamos que se presentan entre las 7 am y las 8 pm, con un pico máximo a las 4 pm (ver figura 3.4), y otro segundo pico menor a las 8-9 am. Estos picos aún se conservan en el solsticio de diciembre y equinoccio de marzo (figura 3.8). Para el solsticio de junio se tiene la mayor ocurrencia entre las 4 y las 7 pm. Picos similares de ocurrencia han sido anteriormente identificados en el año 1958 por Bandyopadhyay y Montes [56, 57] en una cadena de estaciones transecuatoriales del Perú. Bandyopadhyay y Montes [56, 57] encontraron que la ocurrencia diaria de capas E esporádicas tipo c y h (que a menudo son blanketing) para el año 1958 (año de máxima actividad solar) para siete estaciones sudamericanas (Talara, Chiclayo, Chimbote, Huancayo, Juliaca, La Paz e Ilo) alrededor del ecuador magnético, en los meses del solsticio de diciembre se caracterizan por la ocurrencia de dos picos, uno en la mañana alrededor de las 08 horas y otro en la tarde alrededor de las 16 horas. Reddy y Matsushita [55] encontraron la presencia de dos máximos de ocurrencia para distintas latitudes, siendo prominentes para latitudes medias altas, menos notorios para latitudes medias y en latitudes bajas apenas son perceptibles en su verano local.
- Las frecuencias de blanketing se presentan en su mayoría, entre 4.0 y 5.5 MHz (figura 3.14). Se debe tener en cuenta que el criterio propuesto para la identificación de *Esb* en este trabajo tiene la restricción de $f_b E_s \geq 3.7$ MHz.
- Respecto a las alturas de las *Esb*, en los meses del solsticio de junio y los equinoccios se presentan mayormente en un rango de 95 y 110 km, mientras que en los meses del solsticio de diciembre se presentan en un

rango más amplio mayormente entre 90 y 135 km (ver figuras 3.6 y 3.9). Se han encontrado algunos casos donde la capa se presenta en 160 km y en varios de estos casos aparentemente inician de la parte inferior de la capa F1, por ejemplo el evento *Esb* mostrado en la figura 4.1. Eventos con las mismas características ya han sido reportados anteriormente por Khan y cols. [58].

4.2. Posibles condiciones que favorecen la aparición de las capas *Esb*

- El modelo propuesto por Muralikrishna y Kulkarni [11] muestra la influencia de las partículas de polvo meteórico en el electrochorro ecuatorial para la generación del contraelectrochorro ecuatorial lo cual, además, nos puede permitir explicar la ocurrencia de las capas *Esb*. En principio, el modelo de Muralikrishna y Kulkarni [11] muestra que la presencia de polvo meteórico considerable puede generar una reducción en la corriente del electrochorro ecuatorial (electrochorro débil) o incluso su reversión (contraelectrochorro ecuatorial), lo cual está de acuerdo con lo obtenido en la figura 3.22. Este muestra que la mayoría de eventos *Esb* se presentan en condiciones de electrochorro débil (considerando $0 \leq \Delta H < 25nT$) o contraelectrochorro (considerando $\Delta H < 0nT$). A partir del modelo de Muralikrishna y Kulkarni [11] y de nuestras observaciones podemos considerar tres condiciones físicas que pueden influir en la formación del CEJ y en las capas *Esb* (ver figura 4.2), estas son:
 - Presencia de partículas de polvo meteórico
 - Nivel adecuado de ionización
 - Corriente de EEJ normal no muy intensa

Mayor presencia de partículas de polvo meteórico podría tener como consecuencia que estas partículas consigan capturar más electrones del ambiente y así formar unas capas *Esb* más densas. En el mismo sentido, un nivel adecuado de ionización facilitaría que mayor cantidad de electrones puedan ser capturados por los iones positivos del polvo meteórico. Intuitivamente se puede pensar que una corriente de EEJ intensa impulsaría los electrones del medio de tal forma que no se favorecería su captura por los iones metálicos.

Además, Fang y cols. [59] y Fang y cols. [60] han mostrado que para bajos niveles de flujo solar disminuye la tasa de ionización de la atmósfera y se tiene una menor conductividad ionosférica, causando corrientes del electrochorro ecuatorial (normal) menos intensas, esta afirmación se puede reforzar a partir de los resultados obtenidos en la figura 3.24, lo cual muestra que en general para años de máxima actividad solar se tienen corrientes del EEJ más intensas respecto a los años de mínima actividad solar. Entonces, esto podría explicar porque las capas *Esb* presentan mayor ocurrencia en los años de mínima actividad solar.

La mayor ocurrencia en los meses del solsticio de verano puede ser explicada debido a que en estos meses se tiene mayor ionización con respecto a las otras estaciones del año, pudiéndose alcanzar el nivel adecuado de ionización en estos meses del solsticio de verano. Considerando que en la tarde podría tenerse mayor ionización que durante la mañana (pues en horas de la mañana recién se empieza a ionizar la ionósfera y en la tarde ya se tiene una ionósfera ionizada) y como la corriente del EEJ es débil en la mañana (cuando empieza a aumentar) y durante la tarde (cuando empieza a disminuir), entonces esto puede explicar el porqué se tienen dos picos de ocurrencia y el mayor pico es en horas de la tarde.

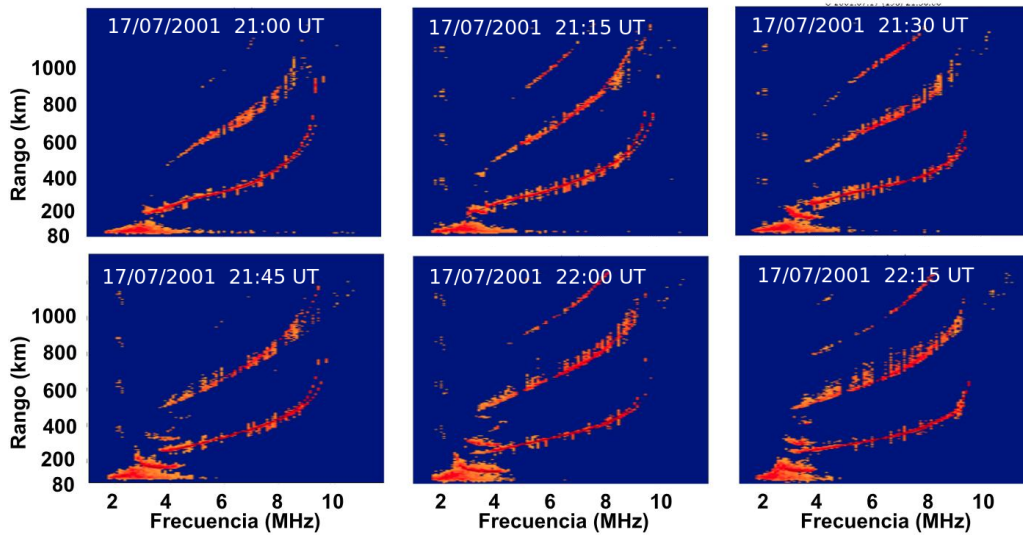


Figura 4.1: Evento Esb de altura 160 km aparentemente generado a partir de la parte baja de la capa F1 registrado el día 17/07/2007 que inicia a las 21:00 horas UT.

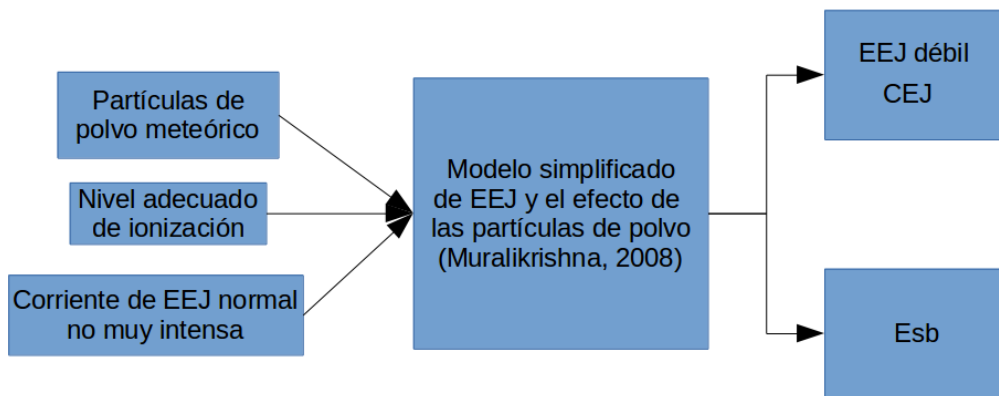


Figura 4.2: Posibles condiciones que favorecen la formación de las capas Esb.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones

Se ha obtenido la primera estadística de ocurrencia de las capas E esporádicas de tipo blanketing sobre el Radio Observatorio de Jicamarca, usando ionogramas de la digisonda DPS-4 registrados entre el 2001 y 2018.

Los resultados, en general, coinciden con los obtenidos por Yadav y cols. [19], es decir ocurren con mayor frecuencia en los meses próximos al solsticio de verano y en los años de mínima actividad solar.

En el ROJ, para los meses de noviembre, diciembre y enero, en los años de mínima actividad solar, aparecen más eventos *Esb* que en años de máxima actividad solar. Se presentan estos eventos entre las 7 am y las 8 pm, con un pico máximo a las 4 pm y otro segundo pico entre las 8 y las 9 am. Además las frecuencias de blanketing se presentan en su mayoría entre 4.0 y 5.5 MHz. Se debe tener en cuenta que solo se han considerado eventos *Esb* con $fbEs \geq 3.7$ MHz. A partir del modelo de Muralikrishna y Kulkarni [11] se ha discutido tres posibles condiciones físicas que pueden influir en la formación de las capas *Esb*, estas son: Presencia de partículas de polvo meteórico, un nivel adecuado de ionización y una corriente del EEJ normal no muy intensa.

Se ha propuesto un criterio para identificar las capas E esporádicas blanketing teniendo en cuenta el cambio normal de la frecuencia mínima de la capa F debido a la absorción de la capa D de la ionósfera durante el día. Este método permite evitar ambigüedades de si el ocultamiento ocurrió debido a la capa *Esb* o a la absorción de la capa D.

Se ha desarrollado e implementado un algoritmo para identificar las capas E esporádicas tipo blanketing en estaciones ecuatoriales como el Radio Observatorio de Jicamarca, en base a la bibliografía revisada este sería el primer algoritmo orientado a identificar las capas E esporádicas blanketing y sus parámetros de interés en estaciones ecuatoriales, en cuyos ionogramas se presentan ecos del electrochorro ecuatorial que se superponen a las capas E esporádicas blanketing. Por lo que se ha desarrollado una herramienta que permitirá el estudio estadístico de eventos *Esb* en varios años de forma automática y con una sensibilidad de 89 %, y reduciendo de manera significativa el tiempo empleado para la identificación de *Esb* y sus parámetros ionosféricos realizados tradicionalmente de forma visual. Para el desarrollo de este algoritmo de identificación se han usado métodos de procesamiento de imágenes y machine learning y han sido implementados en los lenguajes python y CUDA. Este último es un lenguaje de programación paralela orientada a GPUs, con el fin de optimizar el tiempo de procesamiento. Se ha obtenido una precisión del 72 % (por mejorar) en el programa lo cual se debe a la baja calidad de los ionogramas de los días cuando hay interferencias de la digisonda con el radar principal del ROJ y cuando no hubo una correcta sincronización, o aquellos días donde las trazas de las capas de los ionogramas aparecían muy débiles que incluso para el ojo humano es complicado la detección de *Esb* en estas condiciones.

Se ha realizado la comparación de eventos *Esb* de la digisonda DPS-4 con la ionosonda VIPIR y se ha encontrado que un grupo de eventos que son blanketing en la digisonda no lo son en VIPIR. Por lo que se puede concluir que la identificación de las capas E esporádicas blanketing puede depender de las características de la ionosonda como su potencia de transmisión y sensibilidad. En ambos casos el criterio de considerar la tendencia de la absorción de la frecuencia mínima de la capa F debería funcionar bien.

5.2. Trabajos futuros

Mejorar el algoritmo encargado de identificar y eliminar los múltiplos de las capas E esporádicas, lo cual permitirá aumentar la sensibilidad y reducir el número de falsos positivos del programa de identificación. Las mejoras vienen en el criterio para diferenciar la capa F1 de los múltiplos nEs, con el fin de no eliminar ecos de la capa F1, debido a que su incorrecta eliminación está generando falsos *Esb*. Otra mejora viene por establecer el valor umbral adecuado de la amplitud de los posibles ecos de una capa *Esb* para diferenciarlos de ecos del EEJ. Aquí se ha considerado un valor umbral constante de 90 dB, pero podría hacerse dinámico, y obtenerlo a partir de las amplitudes de los ecos de la región E en el ionograma actual y ionogramas anteriores y posteriores.

Completar el procesamiento del resto de años cuyos ionogramas estén disponibles y no presenten mucho ruido entre 1993 y 2000 del Radio Observatorio de Jicamarca.

Realizar un mapa de la ocurrencia de *Esb* en las estaciones ecuatoriales de las digisondas diseñadas por el UMass Lowell Center for Atmospheric Research (UMLCAR) (ver figura 5.1).

Existen varios estudios donde correlacionan los eventos de *Esb* en diferentes latitudes (incluidas latitudes ecuatoriales) con otros fenómenos, como tormentas solares [32], el ciclo solar [31], spread-F [33], ionización de meteoros [34], por lo que estos resultados permitirían buscar si estas correlaciones se siguen cumpliendo en el ROJ o en otras estaciones ecuatoriales. La búsqueda de estas correlaciones en varios años de datos permitirá plantear una teoría que pueda explicar la formación de las capas E esporádicas blanketing en latitudes ecuatoriales. El ROJ cuenta con distintos instrumentos para el monitoreo y estudio ionosférico que pueden servir para observar y explicar la formación de este fenómeno junto con la observación de los ionogramas. Por ejemplo, la figura 5.2 es una imagen RTI (rango-tiempo-intensidad) del radar principal del ROJ en modo JULIA - 150 km del día 24 de noviembre del 2018, los dos eventos *Esb* registrados por la digisonda a las 11:15 y a las 13:00 horas LT se observan como capas delgadas que duran alrededor de 15 minutos.

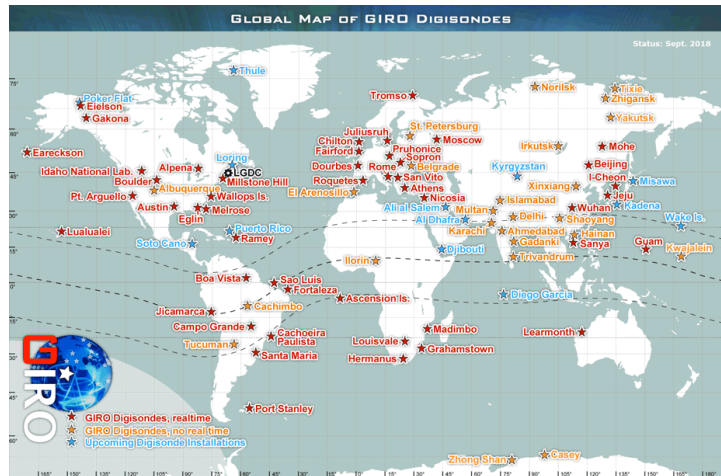


Figura 5.1: Distribución global de las estaciones de las digisondas diseñadas por el UMLCAR. Fuente: <http://ulcar.uml.edu/stationmap.html>

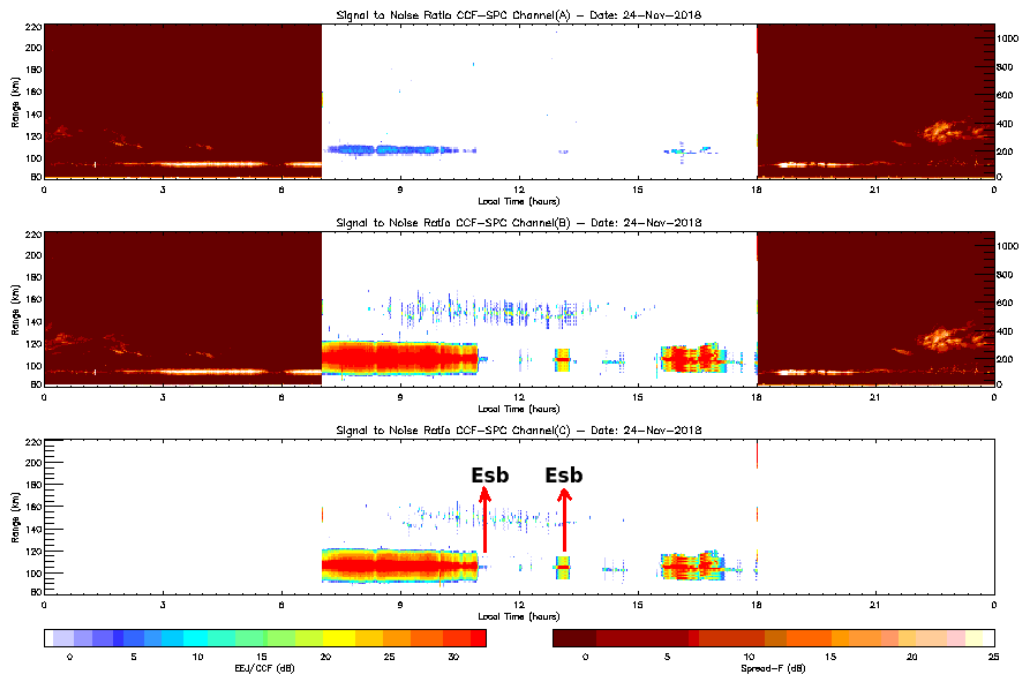


Figura 5.2: Imágen RTI (rango-tiempo-intensidad) del radar principal del ROJ en modo JULIA - 150 km del día 24 de noviembre del 2018, los dos eventos *Esb* registrados por la digisonda a las 11:15 y a las 13:00 horas LT se observan como capas delgadas que duran alrededor de 15 minutos. Imagen proporcionada por Iván Manay del Radio Observatorio de Jicamarca.

Anexos

Anexo 1: Tabla de identificación de ionogramas con *Esb* y sus parámetros obtenidos con el programa de identificación de *Esb*, entre el 2001 y 2018

Ionogramas con *Esb* y sus parámetros obtenidos con el programa de identificación de *Esb*, entre el 2001 y 2018. Para los registros donde infoFregion es cero (blanketing total), el valor de fbEs no debe ser considerado.

N	Año	Día	hora	mm	ss	fbEs (MHz)	hEs	foEs (MHz)	infoFregion
1	2001	198	16	45	0	3.7	160	5.3	2
2	2001	221	15	15	1	5	125	5.3	2
3	2001	221	15	30	1	5.6	120	5.9	2
4	2001	221	16	45	1	4.2	125	4.8	2
5	2001	337	12	0	1	7.2	125	7.7	2
6	2001	337	13	0	0	6.4	115	8.2	2
7	2001	342	11	30	0	6.6	125	7.8	2
8	2001	353	7	45	0	4.8	95	5.9	2
9	2001	353	8	15	1	6.2	100	8.2	2
10	2002	11	15	0	0	6.2	120	7.4	2
11	2002	29	15	44	59	6	120	7	2
12	2002	116	16	15	0	4.2	115	5.6	2
13	2002	118	17	0	0	3.8	145	5.1	2
14	2002	118	17	15	0	3.9	140	4.7	2
15	2002	144	17	59	59	4	130	4.3	2
16	2002	148	17	14	59	3.7	105	7.8	2
17	2002	179	19	29	59	6.2	100	8.2	2
18	2002	197	17	15	0	3.8	140	5.2	2
19	2002	204	19	14	59	3.9	100	8.2	2
20	2002	204	19	44	59	6.6	100	8.2	2
21	2002	215	12	30	0	5.2	130	7.8	2
22	2002	251	21	45	0	4	105	4	2

23	2002	251	22	45	0	3.8	100	4.2	2
24	2002	282	8	15	0	5.9	125	6.4	2
25	2002	282	8	30	0	5	140	4.7	2
26	2002	308	6	30	0	3.9	90	3.7	2
27	2002	311	7	0	0	4	120	3.7	2
28	2002	334	12	52	3	5	105	7.9	2
29	2002	334	13	0	0	5.1	145	7.9	2
30	2002	339	14	0	0	5.1	120	5.7	2
31	2002	339	14	15	0	5.5	120	5.8	2
32	2002	339	14	30	0	5.6	115	6.1	2
33	2002	339	14	45	0	6.4	110	7.1	2
34	2002	339	15	0	0	5.9	115	7.8	2
35	2002	339	15	30	0	4.1	120	8	2
36	2002	339	15	45	0	4.3	120	8.2	2
37	2002	350	16	15	0	5.3	125	5.4	2
38	2002	350	16	20	3	5.3	125	6.8	2
39	2002	350	16	30	0	3.9	110	5.6	2
40	2002	355	7	15	0	4.2	95	8.2	2
41	2002	355	7	22	3	4.9	95	8.2	2
42	2002	355	7	45	0	4.4	100	6.9	2
43	2002	355	8	0	0	4.1	100	8.2	2
44	2002	364	16	0	0	4.1	125	8	2
45	2002	364	16	5	0	4.4	115	7.1	2
46	2002	365	13	45	0	6.5	115	8.2	2
47	2002	365	14	0	0	5.2	115	8.2	2
48	2002	365	14	30	0	7.7	115	8.2	2
49	2002	365	14	45	0	5.5	115	8.2	2
50	2003	3	13	45	0	4.8	95	8.2	2
51	2003	3	14	0	0	5.1	90	8.2	2
52	2003	4	15	0	0	4.8	105	8.2	2
53	2003	4	15	15	0	5.7	100	8.2	2
54	2003	4	15	22	3	5.1	95	8.2	2
55	2003	4	15	30	0	4.8	95	8.2	2
56	2003	4	15	45	0	4.6	90	7.6	2
57	2003	4	16	5	0	4.7	90	6.4	2
58	2003	4	16	10	0	4.5	90	6.7	2
59	2003	4	16	15	0	4.4	90	6.5	2
60	2003	4	16	20	0	4.3	90	4	2

61	2003	4	16	25	0	4.2	95	5	2
62	2003	4	16	30	0	4.4	90	4.6	2
63	2003	13	8	15	0	4.3	105	5.2	2
64	2003	13	9	15	0	5.3	105	8.2	2
65	2003	13	10	30	0	5	105	8.1	2
66	2003	15	10	30	0	4.9	95	8.2	2
67	2003	20	8	15	0	6.5	115	8.2	2
68	2003	20	17	5	0	4.4	115	4.7	2
69	2003	20	17	10	0	4.6	115	5.2	2
70	2003	20	17	15	0	3.9	120	5.2	2
71	2003	38	8	0	0	3.9	105	7.8	2
72	2003	38	8	15	0	4	105	8.2	2
73	2003	38	8	45	0	4.6	100	5.4	2
74	2003	41	8	0	0	3.8	105	7.6	2
75	2003	41	8	15	2	4.5	105	7.9	2
76	2003	41	8	30	0	4.8	105	5.5	2
77	2003	41	8	52	3	4.3	110	6.5	2
78	2003	52	14	30	0	4.6	140	7.3	2
79	2003	62	14	15	0	4.9	105	8.2	2
80	2003	95	8	15	0	4.1	140	8	2
81	2003	127	17	30	0	4	95	8.2	2
82	2003	163	16	30	0	3.7	110	4.3	2
83	2003	163	16	45	0	3.9	110	7.9	2
84	2003	243	21	0	1	3.7	95	8.1	2
85	2003	243	21	30	0	3.9	100	7	2
86	2003	243	21	45	0	3.8	95	4.2	2
87	2003	330	8	30	0	4.5	135	6.8	2
88	2003	338	8	0	0	3.8	120	6	2
89	2003	338	8	15	0	3.7	120	4.8	2
90	2003	345	15	30	0	4.1	100	5.9	2
91	2004	10	15	30	0	4.2	90	8.2	2
92	2004	17	12	45	0	7	115	8.2	2
93	2004	21	13	0	0	4.9	150	4.9	2
94	2004	21	16	30	0	4.2	130	4.9	2
95	2004	24	15	45	0	4.5	110	4.8	2
96	2004	24	16	0	0	4.9	110	6.3	2
97	2004	24	16	15	0	4.8	105	7.6	2
98	2004	24	16	30	0	4	115	6.1	2

99	2004	27	17	45	0	3.9	120	4.3	2
100	2004	27	18	15	0	4	90	4.4	2
101	2004	27	18	30	0	5	90	5.2	2
102	2004	27	18	45	0	5	90	4.6	2
103	2004	32	14	0	0	4.6	140	4.9	2
104	2004	34	12	45	0	5.9	135	6.2	2
105	2004	34	13	15	0	5.7	130	6.3	2
106	2004	34	13	30	0	6.9	125	6.8	2
107	2004	38	8	30	0	3.8	95	7.8	2
108	2004	42	9	0	0	5	120	5.3	2
109	2004	45	8	0	0	3.9	100	7.3	2
110	2004	95	7	30	0	3.9	90	8.2	2
111	2004	103	16	0	1	3.8	105	5.5	2
112	2004	137	19	0	0	5.1	100	8.2	2
113	2004	137	19	15	0	5.1	95	7.8	2
114	2004	198	15	15	1	4.5	105	7.9	2
115	2004	198	15	30	0	4.2	105	7.8	2
116	2004	320	7	15	0	4.1	105	7.5	2
117	2004	320	7	30	0	4.4	105	8.2	2
118	2004	323	10	45	0	5	105	5.7	2
119	2004	329	13	15	0	7.9	120	8.2	0
120	2004	329	13	30	0	6.5	120	8.2	2
121	2004	329	13	45	0	6.4	120	8.2	2
122	2004	329	14	45	0	7.3	100	8.2	2
123	2004	329	15	0	0	6.3	100	8.2	2
124	2004	329	15	15	0	5	130	7.6	2
125	2004	329	15	30	0	4.5	165	7.8	2
126	2004	332	14	45	0	4.6	95	7.3	2
127	2004	339	9	50	0	5.1	110	5.8	2
128	2004	339	9	55	0	4.9	115	5.4	2
129	2004	341	11	0	0	4.5	115	8.2	2
130	2004	345	7	45	0	3.7	110	6.1	2
131	2004	348	14	30	0	5.8	90	8.2	2
132	2004	348	14	45	0	6	90	8.2	2
133	2004	348	15	0	0	4.6	95	8.2	2
134	2004	348	15	15	0	4.3	95	7.8	2
135	2004	348	15	30	0	4.1	95	8.2	2
136	2004	349	16	0	0	4.3	110	6.5	2

137	2004	349	16	15	0	3.9	110	5.4	2
138	2004	354	9	30	0	4.1	110	4.5	2
139	2004	354	9	45	0	4.5	105	7.6	2
140	2004	362	16	0	0	4.5	110	7.5	2
141	2004	362	16	15	0	4.2	115	4.8	2
142	2004	362	16	30	0	3.8	110	4.8	2
143	2004	364	13	0	0	4.3	115	7.7	2
144	2004	364	13	30	0	6.7	115	8.2	2
145	2004	364	14	45	0	5	120	8.2	2
146	2005	9	14	0	0	4.3	100	8.2	2
147	2005	9	14	15	0	4.9	100	8.2	2
148	2005	10	16	15	0	4.4	95	7.6	2
149	2005	10	16	30	0	4.4	90	7.7	2
150	2005	10	16	45	0	3.8	95	5.1	2
151	2005	14	16	45	0	4	115	4.1	2
152	2005	26	16	30	0	3.8	105	8.2	2
153	2005	31	5	0	0	1.8	90	8.2	0
154	2005	33	8	15	1	3.8	100	8.2	2
155	2005	37	15	15	0	8	105	8.2	2
156	2005	37	15	30	0	8	105	8.2	2
157	2005	37	16	0	0	4.1	105	5.8	2
158	2005	37	16	15	0	5	105	8.2	2
159	2005	37	16	30	0	4.5	115	6.2	2
160	2005	38	10	45	0	5.7	105	8.2	2
161	2005	44	9	0	0	3.8	100	7.9	2
162	2005	44	9	45	0	4.6	100	8.1	2
163	2005	44	10	0	1	4.2	100	8.2	2
164	2005	49	11	15	0	4.3	100	8.2	2
165	2005	50	17	15	0	4	105	6.3	2
166	2005	52	14	15	0	4.3	90	8.2	2
167	2005	52	14	30	0	4.4	90	8.2	2
168	2005	52	14	45	0	4.5	90	8.2	2
169	2005	52	15	0	0	4.3	90	8.2	2
170	2005	88	8	30	0	3.7	125	6.8	2
171	2005	88	8	40	0	4.2	125	7.8	2
172	2005	88	16	55	0	4.1	105	6	2
173	2005	88	17	0	0	5.9	105	7.1	2
174	2005	88	17	5	0	6.2	105	8.2	2

175	2005	88	17	15	0	5.2	105	7.6	2
176	2005	88	17	20	0	4.1	105	8	2
177	2005	100	18	15	0	5.1	120	4.7	2
178	2005	108	0	45	0	4	100	7.8	2
179	2005	108	1	30	0	4	95	8.2	2
180	2005	108	1	45	0	4	95	8.2	2
181	2005	108	22	45	0	3.9	110	8.2	2
182	2005	116	17	36	32	4.3	100	8.2	2
183	2005	136	18	0	2	4.6	100	7.8	2
184	2005	136	18	10	0	4.2	100	8	2
185	2005	138	8	50	0	4	110	4	2
186	2005	170	17	45	0	3.8	100	7.8	2
187	2005	176	17	15	0	4.1	105	8.2	2
188	2005	178	3	15	0	2	100	8.2	0
189	2005	222	8	45	0	3.8	110	4.1	2
190	2005	235	19	30	0	3.7	120	4.4	2
191	2005	244	9	45	0	4	135	3.9	2
192	2005	279	17	3	2	5.3	100	8.2	2
193	2005	279	17	15	0	5.3	100	8.2	2
194	2005	279	17	45	0	5.1	100	8.2	2
195	2005	279	18	0	0	3.8	100	6.8	2
196	2005	316	9	15	0	5	105	7.9	2
197	2005	316	10	15	0	5	145	5.1	2
198	2005	317	12	0	0	5	105	7.8	2
199	2005	328	12	45	0	5	105	6	2
200	2005	328	14	15	0	5.6	95	7.6	2
201	2005	334	14	30	0	4.4	115	4.2	2
202	2005	334	15	30	0	4.5	115	5.9	2
203	2005	335	12	0	0	4.8	125	5.9	2
204	2005	335	12	15	0	4.8	125	4.8	2
205	2005	341	10	45	0	4.9	120	8.2	2
206	2005	343	12	15	0	5.3	130	4.9	2
207	2005	343	12	30	0	4.9	130	6.3	2
208	2005	343	12	45	0	4.9	135	4.9	2
209	2005	343	19	45	0	4	105	4.3	2
210	2005	343	20	0	0	3.8	105	5.3	2
211	2005	349	13	0	0	4.8	140	8.1	2
212	2005	349	13	15	0	5	130	5.7	2

213	2005	349	13	30	0	4.6	130	4.8	2
214	2005	349	17	0	0	4.4	110	4.9	2
215	2005	352	11	30	0	4.8	140	7.3	2
216	2005	352	15	15	0	4.7	110	8	2
217	2005	352	15	30	0	4	115	7.9	2
218	2005	352	15	45	0	4	110	8.2	2
219	2005	353	18	15	0	4.5	85	4.4	2
220	2005	353	18	45	2	3.9	85	5.3	2
221	2005	355	16	50	0	3.9	120	3.9	2
222	2005	355	16	55	0	3.7	115	4.4	2
223	2005	355	17	0	0	4.3	115	4.1	2
224	2005	355	17	5	0	4.8	115	4.8	2
225	2005	355	17	10	0	4.5	115	4.6	2
226	2005	355	17	15	0	4	115	4.2	2
227	2005	355	17	20	0	3.8	110	4.9	2
228	2005	355	17	25	0	3.9	110	4.7	2
229	2005	356	16	10	0	4.4	100	8.2	2
230	2005	356	16	15	0	4.5	100	8.2	2
231	2005	356	16	20	0	5.6	100	8.2	2
232	2005	356	16	25	0	4.6	100	7.9	2
233	2005	356	16	30	0	5.8	95	8.2	2
234	2005	356	16	35	0	6.2	100	8.2	2
235	2005	356	16	40	0	6.7	100	8.2	2
236	2005	356	16	45	0	5.1	100	8.2	2
237	2005	356	16	50	0	4.1	100	4.9	2
238	2005	362	16	15	0	3.9	115	6.7	2
239	2005	362	16	30	0	3.8	125	5.3	2
240	2006	9	8	30	0	3.7	95	8.2	2
241	2006	9	13	15	0	4.9	115	5.2	2
242	2006	9	13	30	0	4.4	115	5.6	2
243	2006	9	14	30	0	4.8	145	8.2	2
244	2006	11	11	15	2	4.8	95	8.2	2
245	2006	12	14	15	0	4.7	95	8.2	2
246	2006	12	14	30	0	5.9	95	8.2	2
247	2006	12	14	45	0	4.8	95	8.2	2
248	2006	12	15	15	0	4	95	8.2	2
249	2006	14	14	15	0	6	95	8.2	2
250	2006	14	14	30	0	5.4	95	8.2	2

251	2006	19	17	15	0	3.7	100	7.8	2
252	2006	20	17	0	0	5.4	100	8.2	2
253	2006	20	17	15	0	5.4	100	8.2	2
254	2006	20	17	30	0	3.7	100	5.2	2
255	2006	27	13	0	0	4.7	140	8.2	2
256	2006	27	13	30	0	5.1	135	8.2	2
257	2006	27	14	0	0	5.2	130	8.2	2
258	2006	28	10	45	0	4.9	145	8.2	2
259	2006	28	13	30	0	4.9	105	8.2	2
260	2006	28	14	0	0	5.3	100	8.2	2
261	2006	28	14	15	0	5.1	100	8.2	2
262	2006	28	15	45	0	4	100	3.9	2
263	2006	28	16	45	0	4.8	130	7.9	2
264	2006	30	16	30	0	4.4	100	8.2	2
265	2006	39	14	15	0	4.1	140	4.1	2
266	2006	39	14	30	0	4.3	135	4.7	2
267	2006	39	14	45	0	4.2	130	4.6	2
268	2006	39	15	0	0	4.3	120	4.7	2
269	2006	39	15	45	0	4.8	105	5.9	2
270	2006	39	16	0	0	4.7	95	7.4	2
271	2006	39	16	30	0	4.1	120	4.8	2
272	2006	58	15	45	0	4.9	90	8.2	2
273	2006	90	17	40	0	3.9	95	4.7	2
274	2006	90	17	45	0	3.8	90	7.4	2
275	2006	104	2	45	0	3.9	105	7.9	2
276	2006	104	3	0	0	4.1	95	7.9	2
277	2006	104	3	15	0	3.8	95	8.2	2
278	2006	104	17	0	0	3.7	90	7.7	2
279	2006	109	10	0	0	4.4	150	4.3	2
280	2006	115	16	0	0	3.8	110	3.8	2
281	2006	124	18	30	0	4	100	8.2	2
282	2006	124	18	45	0	4.2	100	7.7	2
283	2006	128	8	45	0	5.6	120	7.5	2
284	2006	132	17	45	0	4	100	8.2	2
285	2006	132	18	0	0	4.5	100	8.2	2
286	2006	140	18	15	0	4.2	95	8.2	2
287	2006	140	19	0	0	4.2	95	8.2	2
288	2006	140	19	15	0	3.7	95	5.2	2

289	2006	142	18	15	0	4.4	95	7.9	2
290	2006	142	18	30	0	5.1	95	8.2	2
291	2006	142	18	45	0	1	95	8.2	0
292	2006	191	17	0	0	4.6	80	6.6	2
293	2006	191	17	15	0	4	90	4.7	2
294	2006	356	15	5	3	5	110	8.2	2
295	2006	356	15	10	0	7	105	8.2	2
296	2006	356	15	15	1	6.8	105	8.2	2
297	2006	356	15	20	0	6.5	100	8.2	2
298	2006	356	15	25	0	5.3	100	8.2	2
299	2006	356	15	30	0	5.1	100	8.2	2
300	2006	356	15	35	0	4.3	105	8.2	2
301	2006	356	16	15	0	4.5	100	4.8	2
302	2006	356	16	20	0	4.1	100	4.6	2
303	2007	11	16	45	0	8	110	8.2	0
304	2007	11	17	0	1	1	110	8.2	0
305	2007	16	11	15	0	6.9	125	6.9	2
306	2007	16	13	30	0	5.6	130	6	2
307	2007	16	13	45	2	4.5	135	5.4	2
308	2007	18	16	45	0	6.7	115	6.6	2
309	2007	22	5	15	0	1	95	8.2	0
310	2007	27	7	45	3	3.7	115	3.7	2
311	2007	30	16	30	0	5.9	105	6.8	2
312	2007	33	18	30	0	4	115	5.7	2
313	2007	35	18	0	0	3.8	100	7.2	2
314	2007	41	15	15	0	4.4	130	4.7	2
315	2007	41	15	45	0	4.3	125	4.6	2
316	2007	41	16	0	0	4.6	125	4.6	2
317	2007	42	16	0	0	5.1	125	5.3	2
318	2007	50	16	30	0	5.2	110	4.9	2
319	2007	92	22	0	2	4	115	4.6	2
320	2007	95	15	45	0	4.1	125	4.8	2
321	2007	96	7	45	0	3.9	90	7.7	2
322	2007	99	18	0	0	4.1	100	8.2	2
323	2007	99	18	15	0	4.4	85	5.1	2
324	2007	99	18	30	0	4.3	90	7.6	2
325	2007	99	18	45	0	4.9	90	7.7	2
326	2007	99	19	0	0	3.7	95	3.7	2

327	2007	100	2	15	0	4	105	5.1	2
328	2007	105	21	15	0	4.6	110	4.7	2
329	2007	107	15	30	0	4.3	95	8.2	2
330	2007	107	15	45	0	5.1	95	7.8	2
331	2007	111	10	30	0	4.8	135	4.6	2
332	2007	113	18	15	0	4.1	100	4.6	2
333	2007	113	18	45	0	4.9	105	7.8	2
334	2007	113	19	30	0	4.5	105	8.2	2
335	2007	113	19	45	0	5	95	8	2
336	2007	118	20	45	0	5	100	5.7	2
337	2007	118	21	0	0	4.4	100	8.2	2
338	2007	118	21	15	0	4.3	100	8.2	2
339	2007	118	22	0	0	3.9	95	8.2	2
340	2007	119	18	45	0	3.8	100	4.3	2
341	2007	121	8	30	0	3.9	135	4.1	2
342	2007	122	18	15	0	3.7	90	3.9	2
343	2007	123	8	15	0	4.1	120	4.1	2
344	2007	127	18	30	0	3.9	100	8.2	2
345	2007	127	18	45	0	1	90	8.2	0
346	2007	129	18	45	0	5	100	5.4	2
347	2007	129	20	30	0	4	110	8.2	2
348	2007	131	18	45	2	3.9	95	4.2	2
349	2007	133	19	30	0	4	95	8.2	2
350	2007	134	19	0	0	3.8	95	8.2	2
351	2007	135	18	15	0	4.6	90	8.2	2
352	2007	135	18	30	0	5.2	95	8.2	2
353	2007	135	18	45	0	4	95	4.7	2
354	2007	139	18	30	0	4.2	95	8.2	2
355	2007	139	19	0	0	3.8	95	8.2	2
356	2007	189	13	0	0	6.3	110	6.3	0
357	2007	191	15	45	0	3.7	90	7.7	2
358	2007	246	8	45	0	4.2	105	4.7	2
359	2007	250	18	30	0	3.7	100	4.2	2
360	2007	250	18	45	0	4.3	100	5.6	2
361	2007	254	17	0	0	4.2	125	4	2
362	2007	255	1	0	0	3.5	100	8.1	0
363	2007	256	15	0	0	4.4	100	4.6	2
364	2007	270	13	45	0	4.6	120	4.6	2

365	2007	270	15	15	0	4.6	110	4.8	2
366	2007	270	15	30	0	4.9	110	6.2	2
367	2007	270	15	45	0	4.7	110	5.4	2
368	2007	289	8	30	0	4.1	145	3.8	2
369	2007	292	19	15	0	4.1	105	8.2	2
370	2007	297	15	15	1	4.2	95	8	2
371	2007	306	14	51	12	4.6	130	5.6	2
372	2007	322	14	30	0	4.6	130	8.2	2
373	2007	326	16	30	0	4	115	4.5	2
374	2007	335	11	45	0	4.8	135	4.6	2
375	2007	335	12	0	0	4.7	130	4.6	2
376	2007	335	12	15	0	4.5	130	4.4	2
377	2007	335	19	30	0	3.8	95	5.7	2
378	2007	338	13	0	1	5.4	135	8.2	2
379	2007	338	13	15	0	7.1	120	8.2	2
380	2007	338	16	15	0	4	130	3.9	2
381	2007	345	15	45	0	4.1	95	5.7	2
382	2007	347	9	30	0	4.9	165	4.7	2
383	2007	351	13	15	0	4.5	130	4.4	2
384	2007	351	15	0	0	4.3	115	4.1	2
385	2007	351	15	30	0	4.4	115	4.4	2
386	2007	357	13	0	0	5.5	85	7.8	2
387	2007	360	16	15	0	4.1	100	6	2
388	2008	3	10	45	0	4.8	130	4.6	2
389	2008	3	11	0	0	4.9	130	4.7	2
390	2008	7	16	45	2	4	110	4.8	2
391	2008	8	16	45	0	3.9	115	4.2	2
392	2008	8	17	0	0	3.9	120	5.9	2
393	2008	8	17	30	0	4.6	145	5.5	2
394	2008	8	17	45	0	6.1	140	6.3	2
395	2008	8	18	0	2	4.2	150	5	2
396	2008	25	13	0	0	4.6	110	8.2	2
397	2008	32	8	45	0	3.9	95	8.2	2
398	2008	45	11	30	0	4.8	145	8.2	2
399	2008	45	12	0	0	4.7	145	7.9	2
400	2008	45	12	15	0	4.8	135	7.6	2
401	2008	45	12	30	0	5.7	130	8	2
402	2008	45	12	45	0	5.5	130	8.1	2

403	2008	45	13	0	0	6.1	125	7.2	2
404	2008	45	13	15	0	7.2	120	8.2	2
405	2008	45	13	30	0	5.7	120	6.2	2
406	2008	45	13	45	0	4.6	130	7.5	2
407	2008	45	17	45	0	5.5	110	8.2	2
408	2008	47	13	15	0	4.5	125	7.6	2
409	2008	47	14	15	0	4.4	110	5.3	2
410	2008	47	14	30	0	4.3	110	5.8	2
411	2008	47	15	0	0	5.4	105	6.1	2
412	2008	47	15	15	0	4.5	110	6.9	2
413	2008	47	15	30	0	4.1	110	4.4	2
414	2008	51	15	30	0	4.2	90	7.8	2
415	2008	74	21	0	0	3.8	100	8.2	2
416	2008	85	9	0	0	4	140	8.2	2
417	2008	85	9	15	0	4.1	100	8.2	2
418	2008	89	9	15	0	4	150	8.2	2
419	2008	89	18	0	0	4	105	8.2	2
420	2008	89	18	15	0	4.3	90	8.2	2
421	2008	96	16	15	2	4.6	105	7.7	2
422	2008	135	17	45	0	1	95	8.2	0
423	2008	142	16	0	0	4.5	100	4.4	2
424	2008	146	16	45	0	4.3	105	8.2	2
425	2008	146	17	15	0	4.2	105	8.2	2
426	2008	164	18	15	0	4.1	95	7.8	2
427	2008	181	18	15	0	3.7	100	8.2	2
428	2008	215	16	0	0	3.8	110	4.2	2
429	2008	240	19	15	0	4	100	7.9	2
430	2008	240	19	30	0	4.1	100	5.9	2
431	2008	240	19	45	0	3.9	95	8.2	2
432	2008	251	18	45	0	3.9	100	8.2	2
433	2008	251	19	0	0	3.7	105	8.2	2
434	2008	252	18	30	0	4.6	100	8.2	2
435	2008	258	16	45	0	3.8	130	4.2	2
436	2008	279	18	30	0	3.8	95	4.2	2
437	2008	291	3	0	0	2	95	8.2	0
438	2008	291	20	45	0	3.7	100	8.2	2
439	2008	305	9	30	0	5.8	125	8.2	2
440	2008	305	9	45	0	5.6	125	8.1	2

441	2008	310	20	0	0	6.1	100	8.2	0
442	2008	317	7	15	0	3.8	130	3.8	2
443	2008	317	14	15	0	7.1	115	8.2	0
444	2008	317	14	30	0	6.1	120	8	2
445	2008	320	15	45	0	4.2	120	6	2
446	2008	328	13	15	0	7	125	7.2	2
447	2008	328	13	30	0	6.7	125	7	2
448	2008	328	13	45	0	5.1	125	6.7	2
449	2008	328	14	0	0	5.6	125	7.4	2
450	2008	328	14	15	0	6.4	125	8.2	2
451	2008	328	14	30	0	5.5	125	8.1	2
452	2008	329	14	15	0	4.4	130	8.2	2
453	2008	330	13	50	0	4.6	110	4.8	2
454	2008	332	12	5	0	4.4	160	7.8	2
455	2008	332	12	25	0	4.5	155	4.6	2
456	2008	332	12	40	0	4.5	145	4.4	2
457	2008	332	14	50	0	4.2	125	4.1	2
458	2008	332	15	0	0	4.5	120	7	2
459	2008	332	15	10	0	4.1	115	8.2	2
460	2008	332	15	25	0	4.3	120	6.2	2
461	2008	332	15	40	0	4.1	120	7	2
462	2008	332	15	45	0	4	120	3.9	2
463	2008	332	15	50	0	3.9	120	4.3	2
464	2008	332	15	55	0	3.8	130	5.7	2
465	2008	332	16	5	0	5.5	125	6	2
466	2008	332	16	10	0	4.1	125	6.9	2
467	2008	332	16	15	0	3.8	130	6.2	2
468	2008	332	16	20	0	4.1	125	6.9	2
469	2008	334	12	45	0	4.9	125	7.8	2
470	2008	334	13	5	0	4.8	125	8.2	2
471	2008	334	13	20	0	5.6	120	7.9	2
472	2008	334	13	25	0	5.6	120	7.7	2
473	2008	334	13	30	0	5.6	120	7.8	2
474	2008	334	13	40	0	4.8	125	7.9	2
475	2008	334	13	55	0	6.9	120	8.2	2
476	2008	334	14	0	0	6.5	120	7.9	2
477	2008	334	14	5	0	5.7	120	8.2	2
478	2008	334	14	10	0	6.7	115	8.2	2

479	2008	334	14	15	0	6.8	120	8.2	2
480	2008	334	14	20	0	6.3	115	8.2	2
481	2008	334	14	25	0	5.7	115	7.7	2
482	2008	334	14	30	0	5.2	115	7.8	2
483	2008	334	14	35	0	5.5	115	7.2	2
484	2008	334	14	40	0	5.6	115	8.2	2
485	2008	334	14	50	0	4.7	115	7	2
486	2008	334	14	55	0	4.5	105	6.1	2
487	2008	334	15	0	0	4.9	115	7.1	2
488	2008	334	15	5	0	5.6	110	7.8	2
489	2008	334	15	25	0	4.5	110	7.8	2
490	2008	334	15	30	0	4.3	110	8	2
491	2008	334	16	5	0	3.9	110	8.2	2
492	2008	334	16	25	0	4	105	8.2	2
493	2008	334	21	10	0	3.8	100	8.2	2
494	2008	334	21	20	0	4.2	95	8.2	2
495	2008	336	14	15	0	4.3	125	4.7	2
496	2008	336	14	30	0	4.7	115	7.2	2
497	2008	336	14	45	0	4.7	115	8.2	2
498	2008	336	15	0	0	4.6	105	7.7	2
499	2008	346	16	45	0	3.9	110	4.1	2
500	2008	347	8	30	0	4.1	150	7.8	2
501	2008	347	8	45	0	4.5	140	8.2	2
502	2008	347	12	15	0	4.7	135	4.6	2
503	2008	347	12	30	0	5.1	125	4.9	2
504	2008	347	12	45	0	5.3	125	5.1	2
505	2008	347	13	0	0	4.6	125	4.9	2
506	2008	347	13	15	0	4.7	125	4.4	2
507	2008	352	13	15	0	6.1	125	5.8	2
508	2008	355	8	45	0	4.4	115	5.3	2
509	2008	355	9	45	0	4.5	145	4.2	2
510	2008	362	22	30	0	2.2	110	8.2	0
511	2008	363	17	15	0	3.7	95	4.4	2
512	2008	363	17	45	0	4	90	4.1	2
513	2009	1	16	30	0	4.1	110	4.3	2
514	2009	1	17	45	0	3.8	105	5.3	2
515	2009	1	18	0	0	4.1	105	8.2	2
516	2009	2	16	30	0	5.3	110	7.3	2

517	2009	2	16	45	0	7	115	8.2	2
518	2009	2	17	0	0	4.2	120	4.7	2
519	2009	2	17	15	0	5.2	115	7.9	2
520	2009	2	17	30	0	4.7	115	6.8	2
521	2009	2	18	0	0	4	115	8.2	2
522	2009	5	16	30	0	4	135	3.9	2
523	2009	6	12	45	0	6.8	120	8.2	2
524	2009	8	9	45	0	4.4	100	7.3	2
525	2009	32	17	0	0	3.9	105	4.4	2

N	Año	Día	hora	mm	ss	fbEs (MHz)	hEs	foEs (MHz)	infoFregion
526	2009	42	9	0	0	5.2	130	4.9	2
527	2009	59	17	30	0	4.5	105	8.2	2
528	2009	91	10	0	0	4.9	130	7.8	2
529	2009	98	15	15	0	4.4	90	8.2	2
530	2009	99	16	45	0	3.8	95	8.1	2
531	2009	103	18	15	0	4	100	4.2	2
532	2009	110	6	0	0	1	100	8.2	0
533	2009	111	15	15	0	4	100	8.2	2
534	2009	111	17	0	0	3.8	95	6.8	2
535	2009	111	17	15	0	3.8	90	4.2	2
536	2009	112	16	15	0	5.2	105	8.2	2
537	2009	112	16	30	0	4.3	105	6	2
538	2009	112	18	15	0	4	125	4.7	2
539	2009	119	17	30	0	3.7	100	4.2	2
540	2009	128	18	45	0	4	100	5.2	2
541	2009	128	19	0	0	4.3	100	8.2	2
542	2009	137	18	15	0	4.6	100	8.2	2
543	2009	147	17	45	0	5.6	100	7.8	2
544	2009	147	18	0	0	4.3	95	8.2	2
545	2009	149	18	45	0	4	85	8.2	2
546	2009	164	20	0	0	3.9	90	8.2	2
547	2009	164	20	15	0	3.7	90	8	2
548	2009	165	18	15	0	4.6	95	8.2	2
549	2009	180	10	15	0	4.7	150	4.6	2
550	2009	187	17	30	0	4.2	100	8.2	2
551	2009	187	17	45	0	1	95	8.2	0
552	2009	207	18	45	0	3.7	95	8.2	2

553	2009	211	16	45	0	3.7	95	4.1	2
554	2009	232	16	30	0	3.8	110	3.7	2
555	2009	243	11	0	0	5.6	120	5.7	2
556	2009	246	3	45	0	1	95	8.2	0
557	2009	275	21	45	0	4	110	5.6	2
558	2009	291	14	30	0	4	160	7.5	2
559	2009	292	15	0	0	4.6	110	8.2	2
560	2009	292	15	15	0	3.9	100	8.2	2
561	2009	292	15	30	0	3.8	95	8.2	2
562	2009	294	16	45	0	4.2	105	4.6	2
563	2009	295	18	15	0	5.2	90	8.2	2
564	2009	295	18	30	0	7.5	90	7.8	2
565	2009	295	18	45	0	2.4	90	8.2	0
566	2009	295	19	0	0	4.5	90	7	2
567	2009	297	18	15	0	4.5	80	4.4	2
568	2009	315	9	30	0	5	145	4.6	2
569	2009	321	15	45	0	4.5	105	8.2	2
570	2009	321	16	0	0	6.1	105	8.2	2
571	2009	321	16	15	0	6.7	110	8.2	2
572	2009	321	16	30	0	5.9	110	8.2	2
573	2009	321	16	45	0	5.4	115	7.2	2
574	2009	321	17	15	0	4	100	4.6	2
575	2009	321	17	30	0	3.7	100	4.8	2
576	2009	321	17	45	0	4.2	100	4.7	2
577	2009	323	16	30	0	4.5	120	5.2	2
578	2009	327	14	30	0	5	120	4.9	2
579	2009	327	14	45	0	5	115	5.6	2
580	2009	327	15	0	0	4.7	115	5.5	2
581	2009	327	15	15	0	5	115	5.1	2
582	2009	327	16	15	0	4.1	115	4.4	2
583	2009	328	19	15	0	5.1	95	8.2	2
584	2009	328	19	30	0	2.2	95	8.2	0
585	2009	328	19	45	0	5	95	8.2	2
586	2009	328	20	0	0	4.3	95	8.2	2
587	2009	328	20	15	0	6.2	90	8.2	2
588	2009	334	15	45	0	4.3	130	4.2	2
589	2009	334	16	0	0	4	125	4.3	2
590	2009	338	19	15	0	4.6	100	8.2	2

591	2009	338	19	30	0	4.3	100	5.2	2
592	2009	340	16	15	0	4	115	4.1	2
593	2009	340	16	30	0	4.1	110	8.2	2
594	2009	343	7	45	0	3.9	100	4.1	2
595	2009	343	8	30	0	3.7	100	4.1	2
596	2009	345	19	30	0	4	100	8.1	2
597	2009	345	19	45	0	4.1	100	7.8	2
598	2009	345	20	0	0	3.7	105	8.2	2
599	2009	347	16	30	0	4.2	95	5.9	2
600	2009	349	18	0	0	3.8	95	5.2	2
601	2009	352	15	30	0	4.4	110	4.1	2
602	2009	352	15	45	0	4.8	105	4.7	2
603	2009	352	16	15	0	4.9	100	7.7	2
604	2009	352	17	30	0	3.9	105	4.6	2
605	2009	352	17	45	0	3.7	100	3.7	2
606	2009	356	9	15	0	4.5	135	4.5	2
607	2009	361	10	45	0	4.7	135	4.3	2
608	2009	361	11	0	0	5	130	4.6	2
609	2009	363	14	0	0	7	110	7.7	2
610	2009	363	14	15	0	6.6	100	7	2
611	2009	363	14	30	0	5.6	105	5.7	2
612	2009	363	14	45	0	5.3	110	6	2
613	2009	363	15	0	0	5.2	110	5.2	2
614	2009	363	16	45	0	5.6	115	7.9	2
615	2010	1	2	30	0	6.5	100	8.2	0
616	2010	1	2	45	0	4.8	100	8.2	0
617	2010	1	8	0	0	3.8	110	4.2	2
618	2010	1	17	15	0	5.5	90	8	2
619	2010	1	17	30	0	5.7	90	8.2	2
620	2010	2	19	15	2	4.5	95	5	2
621	2010	3	16	0	0	4.1	105	7.9	2
622	2010	3	16	15	0	5.9	105	8.2	2
623	2010	3	16	30	0	3.9	105	8.2	2
624	2010	5	19	45	0	4.3	100	5.2	2
625	2010	14	14	0	0	4.6	125	8.2	2
626	2010	16	17	15	0	5	95	8.2	2
627	2010	24	11	30	0	5.3	135	8.2	2
628	2010	25	15	45	0	4.2	125	8.1	2

629	2010	28	14	30	0	4.8	155	4.9	2
630	2010	28	14	45	0	4.7	155	4.6	2
631	2010	35	0	45	0	3.7	110	8.1	0
632	2010	47	17	0	0	3.9	110	4.8	2
633	2010	71	14	45	0	4.5	95	6	2
634	2010	71	15	0	0	6.1	95	8.2	2
635	2010	71	15	15	0	4.5	95	7.6	2
636	2010	71	15	30	0	4	95	8	2
637	2010	72	15	15	0	4.2	95	7.9	2
638	2010	72	15	45	0	4.2	95	8.2	2
639	2010	93	20	15	0	4	110	7.8	2
640	2010	97	5	45	0	3.2	100	8.2	0
641	2010	104	15	0	0	4	115	8.1	2
642	2010	112	8	0	0	3.9	100	6.2	2
643	2010	112	8	15	0	3.7	95	5.4	2
644	2010	119	17	45	0	3.8	95	3.8	2
645	2010	130	19	15	0	3.7	95	8.2	2
646	2010	130	20	0	0	5	95	8.1	2
647	2010	130	20	15	0	3.9	95	8.1	2
648	2010	130	21	0	0	3.7	95	8.2	2
649	2010	158	18	0	0	3.7	100	8.2	2
650	2010	162	10	45	0	4.1	125	3.8	2
651	2010	162	11	0	0	4.4	125	7.7	2
652	2010	162	11	15	0	4.2	125	4.1	2
653	2010	181	17	0	0	4.2	100	7.7	2
654	2010	181	17	15	0	4.9	100	8.2	2
655	2010	181	17	30	0	3.7	100	4.8	2
656	2010	193	17	15	0	4.2	165	4.3	2
657	2010	193	17	45	0	4.2	155	4.7	2
658	2010	193	19	30	0	3.7	100	8.2	2
659	2010	303	10	45	0	5	130	5.7	2
660	2010	316	12	14	59	4.8	160	8.1	2
661	2010	321	12	15	0	4.5	150	8.1	2
662	2010	326	14	30	0	4.6	115	5.4	2
663	2010	326	14	45	0	4.6	115	5.2	2
664	2010	326	15	0	0	4.5	110	4.6	2
665	2010	326	15	15	0	4.4	115	4	2
666	2010	326	15	30	0	4.2	110	4	2

667	2010	331	8	30	0	4.4	110	5	2
668	2010	331	11	45	0	4.9	135	4.9	2
669	2010	331	12	0	0	5.1	135	7.8	2
670	2010	331	12	15	3	5	135	4.7	2
671	2010	331	12	45	2	5.2	135	5	2
672	2010	331	13	0	0	5.7	125	6	2
673	2010	331	13	15	0	4.8	125	5.8	2
674	2010	331	14	15	0	4.6	120	5.6	2
675	2010	331	15	30	0	4.3	135	4.5	2
676	2010	331	15	45	0	4.8	135	5.3	2
677	2010	335	13	0	0	4.7	130	6.5	2
678	2010	335	13	15	0	5.2	135	5.1	2
679	2010	336	15	15	0	4.3	130	4.9	2
680	2010	336	15	30	0	4.1	125	5.6	2
681	2010	338	13	30	0	4.9	110	5.4	2
682	2010	338	13	45	0	5	105	8.1	2
683	2010	338	14	0	0	4.6	105	5.2	2
684	2010	348	9	45	0	4.5	135	7.7	2
685	2010	350	15	0	0	4.4	120	5.2	2
686	2010	350	15	15	0	4.1	125	6.1	2
687	2010	351	9	45	0	5.3	135	4.9	2
688	2010	351	16	45	0	4.1	120	5	2
689	2010	352	14	15	0	4.7	110	5.1	2
690	2010	352	15	15	0	5.3	90	6.9	2
691	2010	352	15	30	0	5.6	90	6.5	2
692	2010	357	16	15	0	3.8	105	8.1	2
693	2010	357	16	30	0	3.9	100	8.2	2
694	2010	365	12	30	0	6.1	115	8.1	2
695	2010	365	12	45	0	6.7	120	7.6	2
696	2010	365	13	0	0	6.8	115	7.9	2
697	2010	365	13	15	0	6.8	115	8	2
698	2011	1	15	30	0	4.6	95	5.6	2
699	2011	1	15	45	0	5.3	95	7.4	2
700	2011	2	12	45	0	4.9	140	4.6	2
701	2011	2	13	30	0	4.6	125	5.3	2
702	2011	2	13	45	0	5.6	115	6.3	2
703	2011	2	14	0	0	5.1	115	6.1	2
704	2011	2	14	15	0	5.3	115	8.1	2

705	2011	2	14	30	0	4.5	115	4.9	2
706	2011	4	12	45	0	5	155	8.2	2
707	2011	4	13	15	0	5.2	135	8.2	2
708	2011	4	13	30	0	4.8	135	5.3	2
709	2011	4	13	45	0	4.7	135	4.6	2
710	2011	4	15	0	0	4.6	95	6.3	2
711	2011	9	17	45	0	5.6	100	6.5	2
712	2011	9	18	0	0	6.9	100	8.2	2
713	2011	9	18	15	0	5.1	95	8.2	2
714	2011	15	14	30	0	6.3	115	7.1	2
715	2011	15	14	45	0	4.5	115	5.2	2
716	2011	18	14	30	0	4.6	105	4.8	2
717	2011	23	16	45	0	4.3	100	8.2	2
718	2011	23	17	0	0	5.1	100	7.8	2
719	2011	24	16	40	0	3.9	105	5.3	2
720	2011	28	9	15	0	4.1	115	4.8	2
721	2011	30	16	0	0	4.3	105	7.7	2
722	2011	30	16	15	0	4.1	105	4.4	2
723	2011	32	16	50	0	4	95	3.8	2
724	2011	32	16	55	0	3.8	95	4.3	2
725	2011	34	16	25	0	3.7	110	3.7	2
726	2011	41	15	45	0	4.1	165	8.2	2
727	2011	41	16	0	0	3.9	165	8.2	2
728	2011	43	8	45	0	3.9	105	7.9	2
729	2011	58	8	45	0	4.6	95	8	2
730	2011	76	14	30	0	4.2	155	8.2	2
731	2011	166	16	45	0	3.9	105	7.7	2
732	2011	166	17	0	0	3.7	105	4.9	2
733	2011	183	18	15	1	3.9	90	8.2	2
734	2011	219	17	30	0	4	100	8.2	2
735	2011	278	9	45	0	4.7	130	7.4	2
736	2011	278	10	0	0	5	140	5.3	2
737	2011	308	8	45	0	4.6	110	5.4	2
738	2011	308	9	0	0	4.7	115	7.6	2
739	2011	320	6	45	0	3.7	105	8.2	2
740	2011	351	11	15	0	5.4	130	6.2	2
741	2011	352	10	0	0	5	125	7.4	2
742	2011	352	10	30	0	4.9	115	7.8	2

743	2011	352	11	15	0	5.8	130	6.4	2
744	2011	353	10	45	0	5.7	120	5.7	2
745	2011	353	11	0	0	5.5	125	5.4	2
746	2011	354	16	15	0	4.6	110	4.4	2
747	2011	361	16	0	0	4.4	95	7.4	2
748	2012	6	14	15	0	4.8	95	8.2	2
749	2012	8	17	0	0	5.6	115	5.9	2
750	2012	8	17	30	0	4.5	125	4.8	2
751	2012	11	15	45	0	5.4	105	7.3	2
752	2012	11	16	0	0	6.4	105	7.1	2
753	2012	11	16	15	0	5.8	105	6.9	2
754	2012	11	16	30	0	5.6	105	7.9	2
755	2012	12	14	15	0	5.2	115	6.4	2
756	2012	20	16	30	0	4.4	95	4.7	2
757	2012	23	17	0	0	7.4	110	7.8	2
758	2012	29	8	45	0	4.7	110	5.4	2
759	2012	29	9	0	0	4.7	105	5.7	2
760	2012	29	12	15	0	6.2	130	6.1	2
761	2012	29	12	30	0	5.6	130	5.8	2
762	2012	35	14	15	0	5	140	4.8	2
763	2012	48	13	45	0	5.4	120	5.4	2
764	2012	48	14	0	0	5.2	125	5.5	2
765	2012	52	12	30	0	5	145	8	2
766	2012	52	13	45	0	5.1	125	6.7	2
767	2012	52	14	0	0	5.9	120	7.4	2
768	2012	58	8	0	2	4.5	95	7.9	2
769	2012	76	9	15	0	4.3	145	7.9	2
770	2012	88	7	45	0	3.9	95	7.2	2
771	2012	148	13	45	0	4.9	120	5	2
772	2012	148	14	0	0	4.8	120	5.1	2
773	2012	148	15	15	0	4.5	110	4.7	2
774	2012	266	9	15	0	4.5	150	4.1	2
775	2012	331	14	45	0	5.4	120	8.2	2
776	2012	331	15	0	0	6.5	120	8.2	2
777	2012	337	16	0	0	4	120	4.6	2
778	2012	338	11	15	0	4.7	140	7	2
779	2012	343	15	0	0	4.5	150	4.4	2
780	2012	344	13	30	0	4.9	140	4.8	2

781	2012	347	14	30	0	5	115	5.5	2
782	2012	347	14	45	0	6.7	120	7.7	2
783	2012	347	15	0	0	7.3	120	7.4	2
784	2012	347	15	15	0	7.1	125	8.2	2
785	2012	347	15	30	0	5.7	130	8.1	2
786	2012	349	14	30	0	4.7	120	5.1	2
787	2012	350	11	30	0	5.5	125	6.1	2
788	2012	357	10	15	0	4.6	115	5.4	2
789	2012	358	12	0	0	5.4	120	5	2
790	2012	358	13	45	0	5	110	6.2	2
791	2013	3	19	0	0	3.8	95	7.6	2
792	2013	7	12	30	0	5.2	140	4.8	2
793	2013	12	7	30	0	4.2	115	4.5	2
794	2013	12	17	15	0	3.9	120	5.3	2
795	2013	17	17	55	0	5.8	105	7.1	2
796	2013	17	18	0	0	4	105	8.2	2
797	2013	17	18	5	0	3.8	105	8.2	2
798	2013	17	18	10	0	4.3	110	7.9	2
799	2013	20	9	30	0	5	120	5.4	2
800	2013	23	13	15	0	7.3	120	7.5	2
801	2013	23	14	30	0	6	115	8	2
802	2013	23	14	45	0	7.2	100	7.8	2
803	2013	45	8	15	0	3.9	100	5.5	2
804	2013	50	8	30	0	3.8	95	4.7	2
805	2013	50	8	45	0	4.2	100	7.6	2
806	2013	118	17	45	0	4.7	95	5.8	2
807	2013	120	8	15	0	4.9	115	5.6	2
808	2013	127	16	0	0	4.4	140	4.9	2
809	2013	127	16	15	0	5.5	135	5.6	2
810	2013	127	16	30	0	5.1	125	6.3	2
811	2013	157	17	45	0	6.8	125	7.1	2
812	2013	157	18	0	0	7.7	125	8.1	2
813	2013	157	18	15	0	6.5	125	6.8	2
814	2013	171	16	45	0	3.9	110	5.4	2
815	2013	174	19	15	0	3.9	100	8.2	2
816	2013	182	17	15	0	4.4	95	6.9	2
817	2013	189	16	15	0	3.7	105	3.8	2
818	2013	214	16	0	0	3.9	110	4.2	2

819	2013	214	16	15	0	4.7	105	6.6	2
820	2013	214	16	30	0	4.5	110	5.9	2
821	2013	214	16	45	0	3.9	105	4.4	2
822	2013	252	9	15	0	4.7	130	4.9	2
823	2013	284	9	15	0	5.4	125	5.6	2
824	2013	309	9	10	0	5.6	120	5.9	2
825	2013	309	9	15	0	5.2	120	5.6	2
826	2013	325	11	15	0	5.4	130	5.1	2
827	2013	325	11	45	0	5.3	125	5.2	2
828	2013	325	12	0	0	5.2	130	5.2	2
829	2013	325	13	15	0	5.2	125	5.4	2
830	2013	325	13	30	0	5	130	4.9	2
831	2013	330	10	0	0	6	120	6.2	2
832	2013	343	9	0	0	4.6	125	5.2	2
833	2013	343	9	15	0	4.9	125	5	2
834	2013	350	7	15	0	3.9	100	4.7	2
835	2013	351	8	0	0	5.6	115	5.7	2
836	2014	20	1	0	0	3.9	100	7.3	2
837	2014	20	16	45	0	4.3	125	4.8	2
838	2014	20	17	0	0	3.8	145	3.9	2
839	2014	122	17	0	0	3.7	140	5.6	2
840	2014	122	17	15	0	6.2	120	7.2	2
841	2014	122	17	30	0	3.9	130	5.8	2
842	2014	171	16	45	0	3.8	100	8.1	2
843	2014	171	17	0	0	3.9	100	7.7	2
844	2014	255	14	55	0	4.6	125	5.1	2
845	2014	255	15	0	0	4.4	125	4.5	2
846	2014	304	10	45	0	5.6	115	5.6	2
847	2014	315	11	0	0	5.6	130	5.5	2
848	2014	330	9	45	0	6.4	115	7.9	2
849	2014	330	9	50	0	6.6	120	8.2	2
850	2014	330	9	55	0	6.4	120	7.4	2
851	2014	330	10	20	0	5	150	7.9	2
852	2014	330	10	25	0	5	150	7.6	2
853	2014	330	10	30	0	5	160	6.2	2
854	2014	330	10	35	0	5.2	165	7.6	2
855	2014	331	7	55	0	4.3	125	4.8	2
856	2014	351	9	5	0	4.6	95	8.2	2

857	2014	354	9	30	0	5	130	5.2	2
858	2014	354	9	35	0	5	125	5.2	2
859	2014	354	13	35	0	5.3	125	5.3	2
860	2014	354	13	40	0	5.2	125	5.2	2
861	2014	354	14	0	0	5.2	120	5.5	2
862	2014	354	15	10	0	4.9	120	5.7	2
863	2014	356	16	15	0	4.5	130	4.8	2
864	2015	8	17	45	0	3.7	120	4.1	2
865	2015	48	9	0	0	4.6	110	6.3	2
866	2015	48	9	15	0	4.5	120	6.5	2
867	2015	53	8	45	0	4.8	105	7.5	2
868	2015	53	9	0	0	4.6	100	7.3	2
869	2015	122	8	15	0	4.2	130	4.1	2
870	2015	174	11	0	0	3.7	120	7.8	0
871	2015	185	16	45	0	4.1	110	8.2	2
872	2015	339	12	0	0	5.2	135	5.4	2
873	2015	343	12	30	0	5	135	4.9	2
874	2015	345	15	0	0	5.5	115	5.4	2
875	2015	346	15	45	0	4.3	125	4.7	2
876	2015	359	10	45	0	5	130	5	2
877	2015	359	15	0	0	5	120	5.4	2
878	2015	359	15	15	0	4.7	120	6	2
879	2015	361	10	15	0	7.2	120	7.6	2
880	2015	362	12	45	0	6	125	6.8	2
881	2015	363	19	45	0	3.8	105	8.1	2
882	2015	364	15	15	0	6	120	5.8	2
883	2015	364	15	30	0	6	120	5.8	2
884	2015	364	15	45	0	4.2	120	4.2	2
885	2016	17	14	0	0	6.1	100	7.7	2
886	2016	20	18	0	0	4	95	5.5	2
887	2016	50	14	0	0	5.5	105	8.2	2
888	2016	54	23	45	0	4.3	100	8	2
889	2016	102	9	0	0	5.5	135	4.8	2
890	2016	137	18	30	0	4.2	100	8.2	2
891	2016	169	17	15	0	3.8	100	5.6	2
892	2016	189	15	45	0	3.9	105	8.2	2
893	2016	234	18	45	0	5.5	95	8.2	2
894	2016	234	19	0	0	3.9	95	4.3	2

895	2016	250	17	30	0	4.2	110	4.6	2
896	2016	259	16	15	0	4.4	135	4.3	2
897	2016	259	16	30	0	4	135	4.3	2
898	2016	280	16	30	0	4.5	135	4.2	2
899	2016	306	8	30	0	5.6	120	8.2	2
900	2016	314	12	45	0	4.9	140	5.1	2
901	2016	314	13	0	0	5	135	4.7	2
902	2016	323	16	15	0	5.4	80	6.6	2
903	2016	325	7	0	0	3.9	95	3.8	2
904	2016	336	14	55	0	4.5	95	5	2
905	2016	336	15	0	0	5.2	95	5.5	2
906	2016	336	15	10	0	4.8	95	4.6	2
907	2016	336	15	30	0	5.1	95	4.7	2
908	2016	339	8	10	0	4.4	125	4.3	2
909	2016	345	16	15	0	4	115	5.9	2
910	2016	346	14	15	0	5.2	125	5.1	2
911	2016	357	13	45	0	5.3	125	4.9	2
912	2016	357	14	15	0	5.2	120	5.1	2
913	2017	2	8	0	0	4.5	115	4.3	2
914	2017	2	9	0	0	4.6	135	5.3	2
915	2017	4	12	55	0	4.8	135	5	2
916	2017	4	16	25	0	4.2	110	4.5	2
917	2017	4	16	35	0	4.1	110	4.3	2
918	2017	4	16	40	0	4.1	110	6.6	2
919	2017	18	9	45	0	5.7	120	5.3	2
920	2017	28	17	15	0	4.6	100	7.2	2
921	2017	91	17	55	0	4.4	95	5.9	2
922	2017	91	18	0	0	4.2	95	5.5	2
923	2017	102	18	0	0	4.5	110	4.5	2
924	2017	130	19	15	0	4.5	110	6.7	2
925	2017	130	19	30	0	3.3	110	7.7	0
926	2017	205	17	0	0	3.8	100	4.4	2
927	2018	191	16	15	0	4.7	100	4.4	2
928	2018	219	5	5	0	1	95	8.2	0
929	2018	224	6	0	0	1	105	8.2	0
930	2018	244	10	30	0	4	125	4.5	2
931	2018	256	3	0	0	1.9	105	7.9	0
932	2018	271	18	0	0	4.4	95	8.2	2

933	2018	271	18	15	0	4.6	95	8.2	2
934	2018	271	18	30	0	4.3	95	4.7	2
935	2018	277	11	15	0	5	100	8.2	2
936	2018	285	9	15	0	5.5	110	7.4	2
937	2018	285	9	30	0	4.3	120	6.2	2
938	2018	286	16	30	0	4.4	145	4.2	2
939	2018	286	16	45	0	5.2	140	5.2	2
940	2018	304	18	15	0	4.6	100	8.2	2
941	2018	304	18	30	0	4.9	100	8	2
942	2018	304	18	45	0	3.8	105	8.2	2
943	2018	307	13	0	0	4.4	95	8.2	2
944	2018	307	13	15	0	4.5	95	8.2	2
945	2018	307	13	30	0	4.5	95	4.1	2
946	2018	318	11	15	0	5.1	125	5.3	2
947	2018	318	15	45	0	3.9	130	7.7	2
948	2018	320	14	15	0	4.6	145	8.2	2
949	2018	320	14	30	0	4.5	150	7.9	2
950	2018	321	16	30	0	5.3	110	5.9	2
951	2018	321	16	45	0	4.7	115	5.7	2
952	2018	321	17	0	0	3.9	115	7	2
953	2018	322	13	30	0	4.3	95	8.2	2
954	2018	322	13	45	0	4.3	95	7.8	2
955	2018	322	14	45	0	4.1	125	7.5	2
956	2018	322	15	0	0	4.3	125	8.1	2
957	2018	322	15	15	0	3.9	135	8.2	2
958	2018	326	13	45	0	4.8	95	7.9	2
959	2018	326	14	0	0	5.4	100	8	2
960	2018	328	11	15	0	4.6	140	4.6	2
961	2018	332	8	45	0	4.2	100	7.9	2
962	2018	334	14	30	0	4.1	120	4.6	2
963	2018	336	8	15	0	4.4	100	8.2	2
964	2018	339	10	45	0	4.4	150	4.9	2
965	2018	339	10	50	0	4.5	150	4.3	2
966	2018	339	10	55	0	4.4	145	4.4	2
967	2018	342	14	15	0	4.9	95	8.2	2
968	2018	342	16	45	0	4.1	90	5.5	2
969	2018	342	18	15	0	4.4	90	8.1	2
970	2018	343	16	45	0	4.5	115	5.9	2

971	2018	343	17	0	0	4	110	7.2	2
972	2018	343	17	15	0	4.4	110	8	2
973	2018	343	17	30	0	3.7	110	8.2	2
974	2018	346	15	0	0	4.4	135	4.7	2
975	2018	346	15	30	0	3.9	130	4.7	2
976	2018	352	12	15	0	4.5	115	4.5	2
977	2018	353	8	30	0	4.1	115	4.3	2
978	2018	353	8	45	0	4	125	4.4	2
979	2018	354	9	15	0	4	95	4.7	2
980	2018	355	11	45	0	4.5	135	4.2	2
981	2018	357	0	15	0	1.9	100	8.2	0
982	2018	365	13	50	0	5.4	110	8.2	2
983	2018	365	13	55	0	5.8	110	8.2	2
984	2018	365	14	0	0	5	110	8.2	2
985	2018	365	14	5	0	4.9	105	8.2	2

Anexo 2: Tabla de identificación visual de ionogramas con *Esb* y sus respectivos parámetros

La siguiente tabla muestra la identificación visual de los ionogramas con *Esb* y sus respectivos parámetros para los años 2007, 2010, 2011 y 2016. YY, indica el año, D indica el día del año, h la hora local y mm los minutos. fminF anterior (siguiente) indica la frecuencia mínima de la capa F del ionograma anterior (siguiente) y fbEs la frecuencia de blanketing en MHz. Los casos de *Esb* total tienen etiqueta *Esbt* y los casos de F dispersa tienen etiqueta SF. hEs indica la altura de la capa *Es* y foEs la frecuencia crítica de la *Esb*. Además evento indica el número de evento del respectivo año, considerando cada evento como ionogramas que estén cercanos y no más lejanos de 3 horas. No identificados, tiene etiqueta 1 para aquellos ionogramas que no han sido identificados.

N	YY	D	h	mm	fminF ant. (MHz)	fbEs (MHz)	fminF sigu. (MHz)	hEs (km)	foEs (MHz)	Evento de año	No Ident
1	2007	11	16	45	3.5	8		105.0	8.8	1	
2	2007	11	17	0		Esbt		100.0	9.2	1	
3	2007	11	17	15		4.9	2.8	105.0	5.2	1	1
4	2007	16	11	0	3.6	4.7		125.0	4.9	2	1
5	2007	16	11	15		6.9		120.0	6.9	2	
6	2007	16	11	30		5.5	4.3	125.0	6.1	2	1
7	2007	16	13	30	3.7	5.7		130.0	6	2	
8	2007	16	13	45		4.5	3.9	130.0	4.8	2	
9	2007	18	16	45	2.9	6.7	2.9	115.0	6.6	3	
10	2007	22	5	15	2.9	6.7	2.9	95.0	12	4	
11	2007	27	7	45	3.2	3.7	3.4	115.0	4	5	
12	2007	30	16	30		5.7	–	105.0	6.2	6	
13	2007	33	18	30	2.6	4.4	1.6	110.0	5.7	7	
14	2007	35	18	0		3.8	2.8	95.0	8.4	8	
15	2007	41	15	0	4.4	4.3		130.0	4.5	9	1
16	2007	41	15	15		4.4		130.0	4.7	9	
17	2007	41	15	30		4.2		130.0	4.7	9	1
18	2007	41	15	45		4.3		125.0	4.6	9	
19	2007	41	16	0		4.6	3.2	125.0	4.6	9	
20	2007	42	16	0	3.4	5.1	3.3	125.0	5.2	10	
21	2007	50	16	30	3.2	5.1	3.1	110.0	4.9	11	
22	2007	92	22	0	3.8	4.2	2.9	110.0	4.6	12	

23	2007	92	22	30	2.9	4.3	2.7	95.0	4.3	12	1
24	2007	95	15	45	3.8	4.1	3.6	120.0	4.7	13	
25	2007	96	7	45	2.6	3.9	3	95.0	3.7	14	
26	2007	99	18	0	3.1	4.1		100.0	9	15	
27	2007	99	18	15		5.1		95.0	5.4	15	
28	2007	99	18	30		5.1		90.0	5.6	15	
29	2007	99	18	45		5.3		90.0	7	15	
30	2007	99	19	0		4	3.4	90.0	4.8	15	
31	2007	100	2	15	2.8	Esbt	SF	100.0	4.6	16	
32	2007	101	2	45	2.8	Esbt	SF	100.0	7.2	17	
33	2007	105	21	15	2.6	3.7	2.9	115.0	4.6	18	
34	2007	107	15	30	3.5	4.4		95.0	8	19	
35	2007	107	15	45		5.6	3.9	95.0	9.4	19	
36	2007	111	10	30	3.7	4.7	3.8	135.0	5	20	
37	2007	112	9	0	3.4	4		90.0	4.7	21	1
38	2007	112	9	15		4.6	3.8	90.0	4.1	21	1
39	2007	113	18	15	1.6	4.5		100.0	4.9	22	
40	2007	113	18	30		5.3		100.0	5.7	22	1
41	2007	113	18	45		5.2		100.0	7	22	
42	2007	113	19	0		5	3.6	100.0	9.4	22	1
43	2007	113	19	30	3.6	5.2		100.0	9.3	22	
44	2007	113	19	45		5.1	2.4	100.0	9.5	22	
45	2007	118	20	45		5.1		100.0	5.4	23	
46	2007	118	21	0		5.1		100.0	5.1	23	
47	2007	118	21	15		5.5		100.0	9.5	23	
48	2007	118	22	0		4.5	2.6	100.0	5.8	23	
49	2007	119	18	45	1.6	3.8	3.6	100.0	5.8	24	
50	2007	121	8	30	3.4	3.9	3.2	130.0	4.4	25	
51	2007	122	18	15	3	4		95.0	4	26	
52	2007	123	8	15	2.9	4.1	3.4	120.0	4.5	27	
53	2007	125	20	15	3.2	3.7	2.3	100.0	4.7	28	
54	2007	127	18	30	1.7	3.7		100.0	9.3	29	
55	2007	127	18	45		Esbt		95.0	12.5	29	
56	2007	129	18	45	1.8	5.1		100.0	5.5	30	
57	2007	129	19	0		Esbt		100.0	6.7	31	1
58	2007	129	20	30		Esbt		110.0	9.5	31	
59	2007	131	18	45	1.6	4.1	3.4	95.0	5.6	32	
60	2007	133	19	30	2.8	4	3.3	95.0	8.9	33	

61	2007	134	18	45		4		100.0	9.5	34	1
62	2007	134	19	0		Esbt	2.1	100.0	9.4	34	
63	2007	135	18	15	3.5	5.1		95.0	5.5	35	
64	2007	135	18	30		5.2		95.0	9	35	
65	2007	135	18	45		4.5	3.5	95.0	9.5	35	
66	2007	139	18	30	1.6	5.1		95.0	9	36	
67	2007	139	18	45		5.1		95.0	9.5	36	1
68	2007	139	19	0		4	3.4	95.0	9.3	36	
69	2007	167	5	30		Esbt		95.0	8	37	1
70	2007	167	5	45		Esbt		95.0	8.5	37	1
71	2007	189	13	0	4.5	6.3	3.5	115.0	6.3	38	
72	2007	191	15	45	3.1	4	3.3	100.0	4.9	39	
73	2007	213	18	30		5.5	1.6	100.0	9.8	40	1
74	2007	230	17	45	2.7	4.4	2.6	100.0	4.8	41	1
75	2007	240	18	0	1.9	4.1	1.7	105.0	6.3	42	1
76	2007	246	8	45	2.9	4.6	3.3	110.0	4.8	43	
77	2007	250	18	30	1.6	3.8		100.0	3.9	44	
78	2007	250	18	45		4.3	3.6	100.0	4.7	44	
79	2007	254	17	0	3.2	4.1	2.1	125.0	4.3	45	
80	2007	255	1	0		Esbt		100.0	9.5	46	
81	2007	256	15	0	3.4	4.8	3.4	110.0	4.9	47	
82	2007	270	13	45	4	4.5		115.0	4.9	48	
83	2007	270	14	45		3.7		155.0	3.8	48	1
84	2007	270	15	0		3.8		150.0	3.8	48	1
85	2007	270	15	15		4.5		110.0	4.8	48	
86	2007	270	15	30		4.8		110.0	4.8	48	
87	2007	270	15	45		4.8	3.2	110.0	4.8	48	
88	2007	289	8	30	3.5	3.8	3.5	145.0	3.9	49	
89	2007	292	19	15	3.5	5.1	3.5	105.0	9.3	50	
90	2007	297	15	15	3.1	4.2	3.2	95.0	10	51	
91	2007	315	0	45	2.2	4	2.7	95.0	5.8	52	
92	2007	322	13	30	3.9	4.3	3.7	125.0	4.5	53	1
93	2007	322	14	30	3.9	4.6	3.7	130.0	4.8	53	
94	2007	326	16	30	2.9	4	2.8	115.0	4.5	54	
95	2007	335	11	45	3.8	4.7		135.0	4.6	55	
96	2007	335	12	0		4.7		130.0	4.9	55	
97	2007	335	12	15		4.5		130.0	4.7	55	
98	2007	335	12	30		4.1	3.6	145.0	4.4	55	1

99	2007	335	19	30	1.6	3.9	2.9	100.0	4.8	56	
100	2007	338	12	45	3.9	4.6		145.0	4.3	57	1
101	2007	338	13	0		5.6		130.0	6	57	
102	2007	338	13	15		7	4.3	130.0	8	57	
103	2007	338	14	15	4	4.4		130.0	4.4	57	1
104	2007	338	14	30		4.2		130.0	4.2	57	1
105	2007	338	14	45		4.1		135.0	4.3	57	1
106	2007	338	15	0		4.2		130.0	4.5	57	1
107	2007	338	15	15		4.1		125.0	4.3	57	1
108	2007	338	15	30		4.1		130.0	4.3	57	1
109	2007	338	15	45		4		130.0	4.2	57	1
110	2007	338	16	0		4		130.0	4.9	57	1
111	2007	338	16	15		4		125.0	4	57	
112	2007	338	16	30		4.6	3	120.0	4.9	57	1
113	2007	345	15	45	3.2	4.1	3.1	110.0	5.7	58	
114	2007	347	9	15	3.4	4.4		170.0	4.7	59	1
115	2007	347	9	30		4.8		165.0	4.9	59	
116	2007	347	9	45		4.7		155.0	4.8	59	1
117	2007	347	16	0	4	4	3.2	115.0	4.8	60	1
118	2007	351	13	0	4.2	4.5		130.0	4.5	61	1
119	2007	351	13	15		4.5	3.7	130.0	4.8	61	
120	2007	351	15	0	3.5	4.3	3.6	120.0	4.1	61	
121	2007	351	15	30	3.6	4.4	3.3	115.0	4.4	61	
122	2007	357	8	30	3.5	3.9		150.0	3.9	62	1
123	2007	357	8	45		3.9	3.4	155.0	4	62	1
124	2007	360	16	15	3.5	3.9	3	100.0	5.6	63	
125	2010	1	2	15	SF	Esbt		105.0	14	1	
126	2010	1	2	30		Esbt		100.0	14.5	1	
127	2010	1	2	45		Esbt	SF	100.0	9.6	1	
128	2010	1	8	0	3.6	3.8	3.3	110.0	4.2	2	
129	2010	1	17	0	2.9	4		90.0	4.5	3	1
130	2010	1	17	15		5.3		90.0	7	3	
131	2010	1	17	30		5.7	3.1	90.0	8.6	3	
132	2010	2	-5	15	3.2	5.1		95.0	4.9	4	
133	2010	3	16	0	4	4.7		105.0	4.8	5	
134	2010	3	16	15		5.9		105.0	6.2	5	
135	2010	3	16	30		4.1	3.3	105.0	4.1	5	
136	2010	5	19	30	2.3	3.9		100.0	3.9	6	

137	2010	5	19	45		4.6	3.3	100.0	4.7	6	
138	2010	14	14	0	4.2	4.5	3.5	95.0	5.7	7	
139	2010	16	17	15	2.8	5.5	3.2	105.0	6.1	8	
140	2010	24	11	30	4.6	5.3		138.0	5.7	9	
141	2010	25	15	45	3.3	4.2	3.1	100.0	4.3	10	
142	2010	28	9	15	3.2	5	3.6	100.0	4.9	11	
143	2010	28	14	30	4.5	5.1	4.4	155.0	4.8	12	
144	2010	29	16	30	3.2	4.5	3.2	105.0	4.9	13	
145	2010	47	17	0	3.5	3.9	3.4	110.0	4.9	14	
146	2010	71	14	45	3.8	5.1		95.0	4.9	15	
147	2010	71	15	0		6.9		95.0	7.1	15	
148	2010	71	15	15		6.2	3.7	95.0	5.8	15	
149	2010	72	15	15	4.2	5.1		105.0	4.8	16	
150	2010	91	19	30		4.1	2.4	105.0	4.1	17	
151	2010	93	20	15		5.1		110.0	4.8	18	
152	2010	97	5	45	1.8	Esbt	1.9	100.0	9.5	19	
153	2010	112	8	0	3	4.1		110.0	4	20	
154	2010	112	8	15		3.7	3.3	95.0	3.7	20	
155	2010	119	17	45	2.7	3.8	3.5	95.0	3.8	21	
156	2010	130	20	0		5.5		103.0	6.4	22	
157	2010	130	20	15		4	3.3	95.0	4.4	22	
158	2010	130	21	0	3	4	3.5	95.0	4	22	
159	2010	140	19	30	2.9	3.7		105.0	4.4	23	1
160	2010	162	10	30	3.6	3.7		130.0	3.9	24	1
161	2010	162	10	45		3.7		120.0	4	24	
162	2010	162	11	0		4.2		126.3	4.4	24	
163	2010	162	11	15		4.2	3.4	125.0	4.2	24	
164	2010	181	16	45	2.7	4		105.0	4.3	25	1
165	2010	181	17	0		4.5		100.0	4.7	25	
166	2010	181	17	15		5.1		100.0	4.8	25	
167	2010	181	17	30		5.2	1.9	100.0	4.4	25	
168	2010	193	16	30	3.9	3.8		178.3	4.2	26	1
169	2010	193	16	45		4.2		170.0	4.3	26	1
170	2010	193	17	0		5.1		165.7	4.8	26	1
171	2010	193	17	15		4.4		168.2	4.3	26	
172	2010	193	17	30		4.1		158.2	4.3	26	1
173	2010	193	17	45		4.1		153.2	4.1	26	
174	2010	193	18	0		3.9		145.5	2.4	26	1

175	2010	193	18	15		5.1		145.5	4.6	26	1
176	2010	193	18	30		Esbt		138.0	4.7	26	1
177	2010	193	19	30		4		112.8	4.5	26	
178	2010	193	19	45		4	3.4	135.0	4.1	26	1
179	2010	225	19	0	2.3	5.1	3.3	100.0	4.7	27	1
180	2010	303	10	45	3.9	4.7	4	128.8	5.2	28	
181	2010	316	11	45	4.2	4.7		120.0	4.5	29	1
182	2010	316	12	0		4.6		177.6	4.5	29	1
183	2010	316	12	14		4.8		160.0	4.5	29	
184	2010	316	12	30		4.6		165.0	4.6	29	1
185	2010	321	12	15	4.1	4.5	4.1	144.2	4.6	30	
186	2010	326	14	30	3.8	4.6		110.0	4.9	31	
187	2010	326	14	45		5.1		120.0	4.9	31	
188	2010	326	15	0		4.5	3.9	115.0	4.5	31	
189	2010	331	8	30	3.4	4.4	3.8	110.0	4.9	32	
190	2010	331	12	45	5.1	5.2		139.0	4.9	33	
191	2010	331	13	0		5.8		123.3	5.9	33	
192	2010	331	13	15		4.8		130.0	4.9	33	
193	2010	331	13	30		5.5	5.2	119.2	5.6	33	
194	2010	331	14	0	5.2	5.1		125.0	4.7	33	
195	2010	331	14	15		4.6	3.7	115.0	4.8	33	
196	2010	331	15	30		4.1		132.0	4	33	
197	2010	331	15	45		5.2		127.9	4.9	33	
198	2010	331	16	30		4.8		228.0	4.6	33	1
199	2010	331	16	45		5.1		226.0	4.7	33	1
200	2010	331	17	15		4.5	–	226.0	4.4	33	1
201	2010	335	13	0	3.9	4.5		127.0	6	34	
202	2010	335	13	15		5.2	3.6	134.0	5.1	34	
203	2010	336	15	15	4.3	5.1		135.0	4.9	35	
204	2010	336	15	30		5.1	3.5	120.0	4.9	35	
205	2010	338	13	30	4.6	5.1		105.0	4.9	36	
206	2010	338	13	45		5.1		105.0	5.7	36	
207	2010	338	14	0		4.6	3.9	105.0	5.2	36	
208	2010	348	9	45	4.2	4.7	4.2	134.0	4.7	37	
209	2010	350	15	0	3.6	4.5		130.0	4.5	38	
210	2010	350	15	15		4.4	3.4	100.0	4.3	38	
211	2010	351	9	45	3.8	5.3	4	128.3	4.9	39	
212	2010	352	14	15	3.8	4.5	3.6	110.0	4.5	40	

213	2010	352	15	15	3.8	5.4		90.0	5.1	40	
214	2010	352	15	30		5.7		90.0	6.1	40	
215	2010	352	15	45		5.1		95.0	5.8	40	1
216	2010	352	16	0		4.9	–	90.0	4.6	40	1
217	2010	357	16	30		7.2	2.9	105.0	7.5	41	
218	2010	365	11	45	4.7	5.1		124.0	4.9	42	1
219	2010	365	12	0		5.2		124.0	4.9	42	1
220	2010	365	12	15		5.2		128.0	4.9	42	1
221	2010	365	12	30		6.3		122.5	7.1	42	
222	2010	365	12	45		7		120.0	7	42	
223	2010	365	13	0		7.1		120.0	7.4	42	
224	2010	365	13	15		6.9		117.5	6.8	42	
225	2010	365	13	30		6.2	4.7	117.5	6.2	42	1
226	2011	1	15	30	3.4	4.6		100.0	4.6	1	
227	2011	1	15	45		5.3	3.5	100.0	5.1	1	
228	2011	2	13	30	4	4.6		120.0	5.3	2	
229	2011	2	13	45		5.6		120.0	4.9	2	
230	2011	2	14	0		5.2		100.0	4.9	2	
231	2011	2	14	15		5.4		105.0	4.9	2	
232	2011	2	14	30		4.5	3.8	115.0	4	2	
233	2011	4	12	45	3.8	5.1		153.0	4.9	3	
234	2011	4	13	0		4.9		148.1	4.8	3	1
235	2011	4	13	15		5.4		135.5	5.5	3	
236	2011	4	13	30		4.8	4.4	132.9	4.8	3	
237	2011	4	15	0	4.2	4.7	3.9	105.0	4.9	3	
238	2011	9	17	45	2.9	5.7		103.3	5.5	4	
239	2011	9	18	0		7		100.0	6.6	4	
240	2011	9	18	15		6.5		100.0	6.3	4	
241	2011	15	14	15	4.5	6.9		115.0	7.4	5	1
242	2011	15	14	30		6.3		110.0	6.6	5	
243	2011	15	14	45		4.6	3.8	120.0	4.7	5	
244	2011	18	14	30	3.9	4.6	3.7	115.0	4.6	6	
245	2011	23	16	45		4.8		100.0	4.9	7	
246	2011	23	17	0		6.5		100.0	7.1	7	
247	2011	24	16	40	3.2	3.9	3.5	110.0	4.5	8	
248	2011	28	9	15	3.6	4.6	3.7	115.0	5	9	
249	2011	30	16	0		4.3		105.0	4.9	10	
250	2011	30	16	15		4.1	3.4	105.0	3.9	10	

251	2011	32	16	50	3.5	4		95.0	4.1	11	
252	2011	32	16	55		4.5		95.0	4.6	11	
253	2011	32	17	0		4		90.0	3.9	11	1
254	2011	32	17	5		3.8	3.6	93.3	4.1	11	1
255	2011	34	16	25	3.4	3.7	3.5	110.0	4	12	
256	2011	41	15	45	3.4	4.1		165.0	4.3	13	
257	2011	41	16	0		3.9	3.6	165.0	4	13	
258	2011	43	8	30	3.6	4.6		105.0	9	14	1
259	2011	43	8	45		4.2	3.6	105.0	9	14	
260	2011	58	8	45	3.2	4.8	3.4	95.0	4.9	15	
261	2011	76	14	30	3.7	4.2		155.0	4.3	16	
262	2011	76	14	45		3.9	3.6	150.0	4.2	16	1
263	2011	166	16	45	3.2	4		105.0	4	17	
264	2011	171	14	15	3.5	4.5	3.4	143.5	3.4	18	1
265	2011	183	18	15	2.9	4.1		90.0	4.9	19	
266	2011	219	17	30	2.3	4.4	3.5	100.0	4.3	20	
267	2011	278	9	45	3.9	4.7		134.0	4.8	21	
268	2011	278	10	0		5.1		141.7	4.9	21	
269	2011	278	10	15		4.6	4.1	154.5	4.6	21	1
270	2011	308	8	45	4.7	4.8		110.0	5	22	
271	2011	308	9	0		5.2	4.7	115.0	6	22	
272	2011	338	9	15	3.1	4.5	4.3	125.0	4.9	22	1
273	2011	338	11	15	4.5	5.2	4.4	140.0	5.2	22	
274	2011	351	11	15	4.5	5.2		130.0	6.1	23	
275	2011	351	11	30		5.2	4.6	135.0	5.5	23	1
276	2011	352	11	15	4.6	5.7	4.7	130.0	6.2	24	
277	2011	353	10	45	4.5	5.7		120.0	5.9	25	
278	2011	353	11	0		5.5	4.4	125.0	5.7	25	
279	2011	354	16	15	3.5	4.6	3.5	110.0	4.7	26	
280	2011	361	16	0	3.6	4.5	4	95.0	6	27	
281	2016	17	14	0	6.6	7	5.3	102.5	7.1	1	
282	2016	20	18	0		4	2.6	85.0	4.1	2	
283	2016	50	14	0		6.3	5.1	103.0	6.2	3	
284	2016	54	23	45	1.8	3.9	3	100.0	4.8	4	
285	2016	102	9	0	3.8	5.6	3.8	135.0	4.8	5	
286	2016	137	18	30	1.7	4.3	2.9	100.0	6	6	
287	2016	141	18	30		5.1		110.0	3.6	7	1
288	2016	169	17	15	2.4	3.9	3.3	94.4	3.6	8	

289	2016	176	17	30		3.9		85.0	3.6	9	1
290	2016	189	15	45	3.3	3.9		100.0	3.6	10	
291	2016	189	16	0		4.8		100.0	4.9	10	1
292	2016	210	16	0	3.1	3.8	3.3	95.0	4.1	11	
293	2016	234	18	45	2.6	5.8		88.3	5.9	12	
294	2016	234	19	0		4.1	2.6	85.0	4.5	13	
295	2016	250	17	15	3.7	5.2		102.5	4.9	14	1
296	2016	250	17	30		4.3	2.8	110.0	4.3	14	
297	2016	259	15	45	4.1	4.1		125.0	4.1	15	1
298	2016	259	16	0		4.3		140.5	4.2	15	1
299	2016	259	16	15		4.4		132.9	4.3	15	
300	2016	259	16	30		4	3.3	135.0	4	15	
301	2016	280	16	30	3.7	4.2	3.1	110.0	4.1	16	
302	2016	306	8	30	3.3	5.8		98.8	6.1	17	
303	2016	306	8	45		5.9	4.2	120.0	6	17	1
304	2016	314	12	45	4.7	4.8		140.0	5	18	
305	2016	314	13	0		5.1	5.2	135.0	5	18	
306	2016	323	16	15	3.1	5.4	3.6	85.0	5.7	19	
307	2016	325	7	0	2.6	4	3.5	95.0	3.8	20	
308	2016	332	14	15	4.2	4.5	4.2	120.0	4.6	21	1
309	2016	334	17	50	2.9	4.1	2.6	115.0	3.8	22	1
310	2016	336	14	35	3.9	4.5		100.0	4.2	23	1
311	2016	336	14	40		4.2		100.0	4.2	23	1
312	2016	336	14	45		4.5		113.3	4.5	23	1
313	2016	336	14	50		4.6		95.0	4.5	23	1
314	2016	336	14	55		4.8		100.0	4.8	23	
315	2016	336	15	0		5.2		100.0	4.8	23	
316	2016	336	15	5		4.7		95.0	4.5	23	1
317	2016	336	15	10		4.7		85.0	4.6	23	
318	2016	336	15	15		5.1		103.3	4.4	23	1
319	2016	336	15	20		4.6		85.0	4.5	23	1
320	2016	336	15	25		4.5		100.0	4.5	23	1
321	2016	336	15	30		4.5	3.9	108.3	4.6	23	
322	2016	339	8	10	3.9	4	3.8	109.6	4.3	24	
323	2016	345	16	15	4.1	6.5	2.9	80.0	6.4	25	
324	2016	346	14	0	3.6	5.1		135.5	4.5	26	1
325	2016	346	14	15		5.3	3.4	130.0	4.9	26	
326	2016	346	15	30	3.7	4.2	3	95.0	4.6	26	1

327	2016	351	16	15	3.6	3.7	3	120.0	3.9	27	1
328	2016	357	13	45	5.2	5.3	5.1	125.0	5	28	
329	2016	357	14	15	5.1	5.2	4.6	120.0	5.2	28	
330	2016	366	16	30	4.1	5.8	3.6	100.0	5.8	29	1

Anexo 3: Tabla de comparación de eventos Esb de la digisonda con VIPIR

La siguiente tabla muestra la comparación de los ionogramas que en la digisonda presentaban eventos de blanketing con los ionogramas de VIPIR. La comparación se hizo para ionogramas del año 2009 considerando la data disponible de VIPIR y cuyos ionogramas son adecuados y no polémicos. Debe notarse que la fecha y hora de ocurrencia está en UT. Además que en la mayoría de los casos, no hay registros simultáneos, sino separados alrededor de 8 minutos para VIPIR y la digisonda, por lo que esto podría influir en la comparación. La comparación se hace con el ionograma más cercano de VIPIR, y la etiqueta Identificado VIPIR-digisonda será 1 si en ambos ionogramas se ha registrado un evento Esb sino será 0.

Evento Esb	Digisonda			VIPIR			Identificado VIPIR - Digisonda
	Día del año (UT)	Hora (UT)	min	Ionograma anterior (hh:mm:ss)	Ionograma cercano (hh:mm:ss)	Ionograma posterior (hh:mm:ss)	
1	8	14	45	14:30:03	14:45:03	15:00:03	1
2	95	13	15	13:07:03	13:22:03	13:37:03	1
3	98	20	15	20:07:03	20:22:03	20:37:03	1
4	99	21	45	21:22:03	21:37:03	21:52:03	1
5	124	7	45	07:37:03	07:52:03	08:07:03	1
5	124	8	0	07:52:03	08:07:03	08:22:03	1
5	124	8	30	08:22:03	08:37:03	08:52:04	1
6	129	0	15	00:07:03	00:22:03	00:37:03	1
7	147	22	45	22:37:03	22:52:03	23:07:03	1
7	147	23	0	22:52:03	23:07:03	23:22:03	1
8	149	23	45	23:37:03	23:52:03	00:07:03	1
9	292	20	0	19:37:03	19:52:03		1
9	292	20	15		20:07:03		1
10	294	21	45	21:37:03	21:52:03	22:07:03	0
11	295	23	45	23:22:03	23:37:03	23:52:03	0
12	297	23	15	23:07:03	23:22:03	23:37:03	1
13	315	13	30	13:22:03	13:37:03	13:52:03	1
13	315	14	30	14:22:03	14:37:03	14:52:03	1
14	316	17	0	16:52:03	17:07:03	17:22:03	1
15	327	19	30	19:22:03	19:37:03	19:52:03	1
15	327	19	45	19:37:03	19:52:03	20:07:03	1

15	327	20	0	19:52:03	20:07:03	20:22:03	1
15	327	20	15	20:07:03	20:22:03	20:37:03	1
16	327	21	15	21:07:03	21:22:03	21:37:03	0
17	329	0	15	00:07:03	00:22:03	00:37:03	1
17	329	0	30	00:22:03	00:37:03	00:52:03	1
17	329	0	45	00:37:03	00:52:03	01:07:03	1
17	329	1	0	00:52:03	01:07:03	01:22:03	1
17	329	1	15	01:07:03	01:22:03	01:37:03	1
18	339	0	15	00:07:03	00:22:03	00:37:03	1
18	339	0	30	00:22:03	00:37:03	00:52:03	1
19	340	21	15	21:07:03	21:22:03	21:37:03	1
19	340	21	30	21:22:03	21:37:03	21:52:03	1
20	346	0	15	00:07:03	00:22:03	00:37:03	1
20	346	0	30	00:22:03	00:37:03	00:52:03	1
20	346	0	45	00:37:03	00:52:03	01:07:03	1
21	347	21	30	21:22:03	21:37:03	21:52:03	0
22	352	14	15	14:07:03	14:22:03	14:37:03	1
23	352	20	30	20:22:03	20:37:03	20:52:03	1
23	352	20	45	20:37:03	20:52:03	21:07:03	1
23	352	21	0	20:52:03	21:07:03	22:22:03	1
24	352	22	30	22:22:03	22:37:03	22:52:03	0
24	352	22	45	22:37:03	22:52:03	23:07:03	0
25	356	14	15	14:07:03	14:22:03	14:37:03	0
26	361	16	0	15:52:03	16:07:03	16:22:03	0
26	361	16	15	16:07:03	16:22:03	16:37:03	0
26	361	16	30	16:22:03	16:37:03	16:52:03	0
26	361	16	45	16:37:03	16:52:03	17:07:03	0
26	361	17	0	16:52:03	17:07:03	17:22:03	0
27	363	19	0	18:52:03	19:07:03	19:22:03	1
27	363	19	15	19:07:03	19:22:03	19:37:03	1
27	363	19	30	19:22:03	19:37:03	19:52:03	1
27	363	19	45	19:37:03	19:52:03	20:07:03	1
27	363	20	0	19:52:03	20:07:03	20:22:03	0
27	363	21	45	21:37:03	21:52:03	22:07:03	0

Bibliografía

- [1] P. M. Reyes, “Study of waves observed in the equatorial ionospheric valley region using jicamarca isr and vipir ionosonde”, tesis de doctorado (University of Illinois at Urbana-Champaign, 2017).
- [2] J. A. Chocos Núñez, “Diseño y establecimiento de un enlace de radiocomunicaciones vhf punto a punto vía el electrochorro ecuatorial”, Tesis de pregrado (2005).
- [3] J. Chau, y E. Kudeki, *Ann. Geophys.* **24** (2006) 10.5194/angeo-24-1305-2006.
- [4] S. A. Sánchez Juárez, “Estudio de la f dispersa en la ionósfera ecuatorial con datos de radio observatorio de jicamarca”, Tesis de Licenciatura (2013).
- [5] F. Lu, “Aspect sensitivity studies of the small scale plasma irregularities in the equatorial electrojet”, tesis de doctorado (Cornell University, 2005).
- [6] E. Shume, “The equatorial electrojet : radar observations and modeling”, tesis de doctorado (Cornell University, ago. de 2006).
- [7] M. C. Kelley, *The earth’s ionosphere: plasma physics and electrodynamics* (2009).
- [8] S. Kato, *Space Science Reviews* **4**, 223 (1965).
- [9] S. Kato, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* **35**, 1073 (1973).
- [10] D. Hurtado de Mendoza, “Estudio teórico y experimental de la inestabilidad de gradiente en la ionósfera”, tesis de doctorado (Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires, 1997).
- [11] P. Muralikrishna, y V. Kulkarni, *Advances in Space Research* **42**, 164 (2008).
- [12] P. Muralikrishna, y V. Kulkarni, *Annales Geophysicae* **24** (2006) 10.5194/angeo-24-2949-2006.

- [13] J. F. Conte, “Perfeccionamiento del modelo ionosférico la plata (lpim)”, tesis de doctorado (Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, 2015).
- [14] R. Schunk, y A. Nagy, *Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry*, 2.^a ed., Cambridge Atmospheric and Space Science Series (Cambridge University Press, 2009).
- [15] H. A. Elliott, J.-M. Jahn, y D. J. McComas, *Space Weather* **11**, 339 (2013).
- [16] J. Bartels, N. H. Heck, y H. F. Johnston, *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity* **44**, 411 (1939).
- [17] J. Bartels, *IATME Bull. 12b* **97**, 2021 (1949).
- [18] A. Segarra, y J. J. Curto, *Annals of Geophysics* **58**, 0440 (2015).
- [19] V. Yadav, B. Kakad, A. Bhattacharyya, y T. Pant, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* (2017) 10.1002/2017ja023911.
- [20] L. Resende, I. Batista, C. Denardini, A. Carrasco, V. Andrioli, J. Moro, P. Batista, y S. Chen, *Earth, Planets and Space* **68** (2016) 10.1186/s40623-016-0577-z.
- [21] C. Haldoupis, *Aeronomy of the Earth’s Atmosphere and Ionosphere*, 381 (2011).
- [22] A. Asokan Pillai, T. Pant, C. Vineeth, M. Neelakantan, y K. kishore kumar, *Advances in Space Research* **62** (2018) 10.1016/j.asr.2018.07.001.
- [23] B. G. Fejer, y M. C. Kelley, *Reviews of Geophysics* **18**, 401 (1980).
- [24] C. Reddy, y C. Devasia, *Planetary and Space Science* **21**, 811IN3813 (1973).
- [25] C. Devasia, *Indian Journal of Radio and Space Physics* **5**, 217 (1976).
- [26] H. Chandra, y R. G. Rastogi, *Journal of Geophysical Research* (1896-1977) **80**, 149 (1975).
- [27] J. O. Oyinloye, *Radio Science* **4**, 765 (1969).
- [28] J. Oyinloye, *Planetary and Space Science* **19**, 1131 (1971).
- [29] V. Yadav, B. Kakad, C. Nayak, G. Surve, y K. Emperumal, *Annales Geophysicae* (2014) 10.5194/angeo-32-553-2014.
- [30] I. A. Galkin, G. M. Khmyrov, A. V. Kozlov, B. W. Reinisch, X. Huang, y V. V. Paznukhov, en *Radio sounding and plasma physics*, vol. 974, ed. por P. Song, J. Foster, M. Mendillo, y D. Bilitza, American Institute of Physics Conference Series (feb. de 2008), págs. 150-159.

- [31] C. Devasia, S. Vadakke Veettil, y S. Ravindran, *Annales Geophysicae* **24** (2006) 10.5194/angeo-24-2931-2006.
- [32] C. Denardini, L. Resende, J. Moro, y S. Chen, *Earth, Planets and Space* **68** (2016) 10.1186/s40623-016-0456-7.
- [33] C. Haldoupis, M. Kelley, G. Hussey, y S. Shalimov, *Journal of Geophysical Research Atmospheres* **108**, 8 (2003).
- [34] A. Malhotra, J. Mathews, y J. Urbina, *Geophysical Research Letters - GEOPHYS RES LETT* **35** (2008) 10.1029/2008GL034661.
- [35] S. Gopi Krishna, C. Valladares, P. Doherty, T. Bullet, y R. Livingston, (2009).
- [36] W. R. Piggott, y K. Rawer, *URSI handbook of ionogram interpretation and reduction, second edition, November 1972, revision of chapters 1-4*, inf. téc. (jul. de 1978).
- [37] W. Piggott, y K. Rawer, *Ursi handbook of ionogram interpretation and reduction, world data center a for solar-terrestrial physics*, inf. téc. (1972).
- [38] P. Ghosh, y F. Berkey, *Earth and Space Science* **2** (2015) 10.1002/2014EA000091.
- [39] S. Ghosh, y S. Kumar, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* **4** (2013) 10.14569/IJACSA.2013.040406.
- [40] N. Matloff, *Parallel computing for data science: with examples in r, c++ and cuda*, vol. 28 (CRC Press, 2015).
- [41] J. E. Jackson, *A user's guide to principal components*, vol. 587 (John Wiley & Sons, 2005).
- [42] I. Galkin, G. Khmyrov, A. Kozlov, B. Reinisch, y S. Fung, 2006 World Automation Congress, WAC'06, 1 (2006).
- [43] J. Jauregui, Philadelphia: Penn Arts & Sciences (2012).
- [44] S. Ferrero, M. Palacio, y O. R. Campanella, *Teledetección* **17**, 43 (2002).
- [45] L. Breiman, *Machine Learning* **45**, 5 (2001).
- [46] J. Tang, R. R. Gamache, y B. W. Reinisch, *Progress on artist improvements*, inf. téc. (NORTHWEST RESEARCH ASSOCIATES INC BELLEVUE WA, 1988).
- [47] I. A. Galkin, "A pre-attentive vision model for automated data exploration applied to space plasma remote sensing data", tesis de doctorado (Citeseer, 2004).

- [48] P. Reyes, “Solar flare effects observed over jicamarca during mst-isr experiments”, tesis de doctorado (University of Illinois at Urbana-Champaign, 2012).
- [49] L. Gilli, U. Sciacca, y E. Zuccheretti, *Sensors* **18**, 1564 (2018).
- [50] W. Baggaley, *Planetary and space science* **33**, 457 (1985).
- [51] K. Davies, *Ionospheric radio*, 31 (IET, 1990).
- [52] M. Fontell, y cols. “Numerical ray tracing of medium and high frequency radio waves in the terrestrial ionosphere”, tesis de doctorado (University of Oulu, 2018).
- [53] M. Maalouf, y T. B. Trafalis, *International Journal of Data Mining, Modelling and Management* **3**, 375 (2011).
- [54] S. Prasad, D. Prasad, K. Venkatesh, K. Niranjana, y P. Rao, 94.20. dg; 94.20. Vv (2012).
- [55] C. A. Reddy, y S. Matsushita, *Journal of Geophysical Research* (1896-1977) **74**, 824 (1969).
- [56] P. Bandyopadhyay, y H. Montes, *Journal of Geophysical Research* (1896-1977) **68**, 2453 (1963).
- [57] P. Bandyopadhyay, y H. Montes, *Journal of Research NBS/USNC-URSI* **68D**, 1237 (1964).
- [58] Z. Khan, H. Ara, y G. Murtaza, *8. occurrence of a peculiar sequential es at karachi*, inf. téc. (1994).
- [59] T.-W. Fang, A. Richmond, J.-Y. Liu, A. Maute, C.-H. Lin, C.-H. Chen, y B. Harper, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **70**, 2203 (2008).
- [60] T. Fang, T. Fuller-Rowell, H. Wang, R. Akmaev, y F. Wu, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **119** (2014) 10.1002/2014JA020142.