

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FÍSICA



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO FÍSICO

TÍTULADA:
“MODELO EMPIRICO DE DERIVAS VERTICALES DEL PLASMA SOBRE
JICAMARCA PARA ESTUDIAR SU DEPENDENCIA EN ACTIVIDAD
SOLAR”

PRESENTADA POR:
JORGE ANGEL HUAMAN YAMPUL

ASESOR:
DR. MARCO ANTONIO MILLA BRAVO

LIMA-PERÚ
2013

Dedico esta tesis a mis queridos padres (Conrado y Diana)
por su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Jorge Chau por brindarme la oportunidad, confianza, libertad y motivación en la elaboración del presente trabajo de Tesis, a su vez por todo su apoyo y conocimientos brindados hacia mi persona.

Al Dr. Marco Milla por su invaluable apoyo brindado en la etapa del desarrollo e implementación de este trabajo de tesis. Un agradecimiento especial por ser mi asesor.

A Freddy Galindo, Luis Condori y Miguel Urco encargados de mi entrenamiento en el Radio Observatorio de Jicamarca.

Al personal del Radio Observatorio de Jicamarca, por la confianza, apoyo y cariño brindado, todo este tiempo que estuve realizando el presente trabajo de Tesis.

INDICE

Capitulo 1	Introducción.....	01
Capitulo 2	Desarrollo de un modelo empírico de derivas.....	04
2.1	Los datos.....	05
2.1.1	Las derivas verticales de la ionosfera ecuatorial.....	05
2.1.2	Concepto de Radar.....	07
2.1.3	El experimento de JULIA.....	09
2.2	Desarrollo del modelo.....	10
2.2.1	Criterio de selección de datos a ser usados en el modelo.....	10
2.3	Interpolación de los datos de derivas.....	14
2.3.1	Interpolación polinomial por tramos.....	14
2.4	Elección del número de nodos.....	17
2.5	Modelos desarrollados.....	21
2.5.1	Modelo M0.....	21
2.5.2	Modelo M1.....	24
2.5.3	Modelo M2.....	26
2.5.4	Modelo M3.....	28
Capitulo 3	Comparación del modelo.....	31
3.1	El modelo de Alken.....	31
3.2	El modelo de Scherliess y Fejer.....	32
3.3	Criterio de comparación del modelo.....	32

Capítulo 4	Estudio de la variabilidad de las derivas para diferentes condiciones de actividad solar.....	46
4.1	Comparación entre condiciones altas y bajas de actividad solar.....	46
4.2	Comparación entre condiciones medias y bajas de actividad solar.....	50
4.3	Comparación entre condiciones medias de actividad solar.....	53
4.4	Comparación entre condiciones bajas de actividad solar.....	57
Capítulo 5	Conclusiones y trabajo a futuro.....	69
5.1	Conclusiones.....	69
5.2	Conclusiones Secundarias.....	71
5.3	Conclusiones del desarrollo y Comparación.....	72
5.4	Trabajo a Futuro.....	73
Apéndice A:	Gráficas.....	74
Apéndice B:	Tablas.....	93
Bibliografía.....		96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama del proceso de implementación y desarrollo del modelo.

Figura 2 Los ecos de 150km sobre Jicamarca.

Figura 3 Series de temperatura típicos para la atmósfera neutra (izquierda). Series de densidad típicos de densidad de plasma ionosférico (derecha) con indicación de las diferentes capas [Kelley, 2009].

Figura 4 Esquema fundamental de un sistema de radar biestático. Tx y Rx son las abreviaturas de Transmisor y receptor (del inglés Transmitter y Receiver respectivamente).

Figura 5 Variación del flujo solar $f_{10.7\text{cm}}$ en función del tiempo ($K_p \leq 3$) desde 2001 hasta 2009

Figura 6 Datos de $E_x B$ JULIA distribuidos mensualmente entre 2001 y 2009. Para enero-abril.

Figura 7 Datos de $E_x B$ JULIA para temporadas geomagnéticas tranquilas ($K_p \leq 3$), para condiciones de flujos solares bajos ($f_{10.7\text{cm}} \leq 100$). Para los meses de enero-abril.

Figura 8 El error cuadrático medio (s^2) en función del número de nodos para condiciones de flujo solar bajos ($f_{10.7\text{cm}} \leq 100$) y $K_p \leq 3$. Para los meses enero-abril

Figura 9 (verde) datos de $E_x B$ JULIA, (rojo) promedio mensual, (azul) función de interpolación desarrollada. Para condiciones de flujo solar bajo ($f_{10.7\text{cm}} \leq 100$)

Figura 10 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y la estación para M0 ($K_p \leq 3$, $f_{10.7\text{cm}} \leq 100$)

Figura 11 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y la estación para M1 ($K_p \leq 3$, $100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$)

Figura 12 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y la estación para M2 ($K_p \leq 3$, $f_{10.7\text{cm}} \leq 100$)

Figura 13 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y la estación para M3 ($K_p \leq 3$, $f_{10.7\text{cm}} \leq 100$)

Figura 14 Variaciones de los índices $f_{10.7cm}$ y $P(EUVAC)$ para condiciones geomagnéticas tranquilas ($K_p \leq 3$)

Figura 15 (abajo) variaciones de las derivas verticales en función del tiempo local y estacional para M0 ($K_p \leq 3$, $f_{10.7cm} \leq 100$), (arriba) resultados para el modelo de Alken ($K_p \leq 3$, $EUVAC \leq 100$)

Figura 16 (abajo) variaciones de las derivas verticales en función del tiempo local y estacional para M0 ($K_p \leq 3$, $100 < f_{10.7cm} < 150$), (arriba) resultados para el modelo de Alken ($K_p \leq 3$, $100 < EUVAC < 150$)

Figura 17 (abajo) variaciones de las derivas verticales en función del tiempo local y estacional para M0 ($K_p \leq 3$, $f_{10.7cm} \geq 150$), (arriba) resultados para el modelo de Alken ($K_p \leq 3$, $EUVAC \geq 150$)

Figura 18 (verde) series de tiempo para las derivas verticales de JULIA ($K_p \leq 3$) para flujo solar bajos ($f_{10.7cm} \leq 100$), (rojo) promedios mensuales de estimaciones del modelo de Alken para flujo solar bajo ($EUVAC \leq 100$) y (azul) el modelo desarrollado. Para enero-abril.

Figura 19 diferencias mensuales de la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) entre M0 y el modelo de Alken para los datos de 2001-2008 ($K_p \leq 3$) en tres diferentes intervalos de flujo solar ($f_{10.7cm} \leq 100$, $100 < f_{10.7cm} < 150$ y $f_{10.7cm} \geq 150$).

Figura 20 (verde) series de tiempo para derivas verticales de JULIA ($K_p \leq 3$) para tres intervalos de flujo solar ($f_{10.7cm} \leq 100$, $100 < f_{10.7cm} < 150$ y $f_{10.7cm} \geq 150$), (rojo) promedios mensuales de las estimaciones del modelo de Scherliess and Fejer y (azul) el modelo desarrollado. Para enero-abril.

Figura 21 diferencias mensuales de la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) entre el modelo y el modelo de Scherliess and Fejer ($K_p \leq 3$) en tres diferentes intervalos de flujo solar ($f_{10.7cm} \leq 100$, $100 < f_{10.7cm} < 150$ y $f_{10.7cm} \geq 150$).

Figura 22 Comparación entre M1 (2001-2003, $K_p \leq 3$) y M3 (2007-2009, $K_p \leq 3$)

Figura 23 Comparación entre M1 (2001-2003) y M3 (2007-2009) ($K_p \leq 3$)

Figura 24 Comparación entre M1 (2001-2003) y M2 (2004-2006) para diferentes estaciones ($K_p \leq 3$)

Figura 25 Comparación entre M2 (2004-2006) y M3 (2007-2009) para diferentes estaciones ($K_p \leq 3$)

Figura 26 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y estación ($K_p \leq 3$, $f_{10.7cm} \leq 100$). Para los modelos M2 (arriba) y M3 (abajo).

Figura 27 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y mensual para valores medios de flujo solar ($K_p \leq 3$, $100 < f_{10.7cm} < 150$)

Figura 28 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y estación ($K_p \leq 3$). Para los modelos M1 (arriba) ($150 \leq f_{10.7cm}$) y M3 (abajo) ($f_{10.7cm} \leq 100$).

Figura 29 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y estación ($K_p \leq 3$). Para los modelos M1 (arriba) ($100 < f_{10.7cm} < 150$) y M3 (abajo) ($f_{10.7cm} \leq 100$).

Figura 30 Derivas verticales de JULIA en función del tiempo para temporadas tranquilas ($K_p \leq 3$), para valores bajos de flujo solar ($f_{10.7cm} \leq 100$)

Figura 31 Derivas verticales de JULIA en función del tiempo para temporadas tranquilas ($K_p \leq 3$), para valores medios de flujo solar ($100 < f_{10.7cm} < 150$)

Figura 32 Derivas verticales de JULIA en función del tiempo para temporadas tranquilas ($K_p \leq 3$), valores altos de flujo solar ($150 \leq f_{10.7cm}$)

Figura 33 Error cuadrático medio (s^2) en función del número de nodos para valores bajos de flujo solar ($f_{10.7cm} \leq 100$).

Figura 34 Error cuadrático medio (s^2) en función del número de nodos para valores medios de flujo solar ($100 < f_{10.7cm} < 150$).

Figura 35 Error cuadrático medio (s^2) en función del número de nodos para valores altos de flujo solar ($f_{10.7cm} \geq 150$).

Figura 36 (verde) datos de *ExB* JULIA, (rojo) promedio mensual, (azul) Modelo implementado. Para valores bajos de flujo solar ($f_{10.7cm} \leq 100$)

Figura 37 (verde) datos de *ExB* JULIA, (rojo) promedio mensual, (azul) Modelo implementado. Para valores medios de flujo solar ($100 < f_{10.7cm} < 150$).

Figura 38 (verde) datos de *ExB* JULIA, (rojo) promedio mensual, (azul) Modelo implementado. Para valores altos de flujo solar ($f_{10.7cm} \geq 150$)

Figura 39 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y estación ($K_p \leq 3$) en M0 (arriba) flujo solar $f_{10.7\text{cm}} < 100$, (medio) flujo solar $100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$ y (abajo) flujo solar $f_{10.7\text{cm}} > 150$.

Figura 40 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y estación ($K_p \leq 3$) en M1 (arriba) flujo solar $100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$ y (abajo) flujo solar $f_{10.7\text{cm}} \geq 150$.

Figura 41 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y estación ($K_p \leq 3$) en M2 (arriba) flujo solar $f_{10.7\text{cm}} \leq 100$ y (abajo) flujo solar $100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$.

Figura 42 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y estación ($K_p \leq 3$) en M3 flujo solar $f_{10.7\text{cm}} \leq 100$

Figura 43 (verde) series de tiempo para las derivas verticales de JULIA ($K_p \leq 3$) para valores bajos de flujo solar ($f_{10.7\text{cm}} \leq 100$), (rojo) promedios mensuales de estimaciones del modelo de Alken para flujo solar ($\text{EUVAC} \leq 100$) y (azul) el modelo desarrollado.

Figura 44 (verde) series de tiempo para las derivas verticales de JULIA ($K_p \leq 3$) para valores medios de flujo solar ($100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$), (rojo) promedios mensuales de estimaciones del modelo de Alken para flujo solar ($100 < \text{EUVAC} < 150$) y (azul) el modelo desarrollado.

Figura 45 (verde) series de tiempo para las derivas verticales de JULIA ($K_p \leq 3$) para valores altos de flujo solar ($f_{10.7\text{cm}} \geq 150$), (rojo) promedios mensuales de estimaciones del modelo de Alken para flujo solar ($\text{EUVAC} \geq 150$) y (azul) el modelo desarrollado.

Figura 46 (verde) series de tiempo para derivas verticales de JULIA ($K_p \leq 3$) para valores bajos de flujo solar ($f_{10.7\text{cm}} \leq 100$), (rojo) promedios mensuales de estimaciones del modelo de Scherliess and Fejer y (azul) el modelo desarrollado.

Figura 47 (verde) series de tiempo para derivas verticales de JULIA ($K_p \leq 3$) para flujo solar ($100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$), (rojo) promedios mensuales de estimaciones del modelo de Scherliess and Fejer y (azul) el modelo desarrollado.

Figura 48 (verde) series de tiempo para derivas verticales de JULIA ($K_p \leq 3$) para flujo solar ($f_{10.7\text{cm}} \geq 150$), (rojo) promedios mensuales de estimaciones del modelo de Scherliess and Fejer y (azul) el modelo desarrollado.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación del valor de las derivas verticales.

Tabla 2 Valores de e entre M0 y el modelo de Alken, para todos los meses y tres intervalos de flujo solar.

Tabla 3 Valores de e entre M0 y el modelo de Scherliess y Fejer, para todos los meses y tres intervalos de flujo solar.

Tabla 4 Diferentes intervalos de flujo solar ($f_{10.7cm}$) a ser estudiados en los diferentes modelos desarrollados.

Tabla 5 Modelos desarrollados para tres intervalos de flujo solar. Comprendidos desde 2001 hasta 2009

Tabla 6 coeficientes del modelo entre 2001-2008 ($f_{10.7cm} \leq 100$)

Tabla 7 coeficientes del modelo entre 2001-2008 ($100 < f_{10.7cm} < 150$)

Tabla 8 coeficientes del modelo entre 2001-2008 ($f_{10.7cm} \geq 150$)

RESUMEN

En el Radio Observatorio de Jicamarca se desarrolló un modelo empírico de derivas del plasma ecuatorial para estudiar su variabilidad temporal y dependencia en actividad solar. El modelo fue desarrollado usando medidas de derivas verticales de la región de los 150Km llevadas a cabo por el radar de Jicamarca en el modo de operación de dispersión coherente (del Ingles “coherent scatter radar”). En el modelo empírico desarrollado, solamente se considera datos tomados durante periodos magnéticamente calmados ($K_p \leq 3$) entre el 2001 y 2009. Adicionalmente, el modelo solamente considera datos entre las 8:00 y 16:00 (tiempo local), el cual es aproximadamente el intervalo de tiempo en el cual el radar observa los ecos de 150Km. El comportamiento de las derivas sobre Jicamarca es modelado como una función del tiempo local, día del año y flujo solar ($f_{10.7cm}$). La función de interpolación usada para modelar las derivas es una aproximación polinómica de tercer grado por tramos. El número de nodos del interpolador fue escogido aplicando el criterio del buen ajuste. En este trabajo, se muestra que el modelo empírico desarrollado captura la complicada estructura estacional de las derivas, por ejemplo, muestra el aumento de la magnitud del valor de las derivas durante los equinoccios de marzo y septiembre, así como también las magnitudes durante los solsticios de junio y diciembre. Los resultados obtenidos con el modelo desarrollado para diferentes periodos, muestran que el número de observaciones de las derivas verticales disminuye con el aumento del flujo solar.

Capítulo 1

Introducción

La ionosfera es una capa de la atmósfera aproximadamente entre los 50 a los 2000 km de altura. Esta capa se encuentra altamente ionizada como para afectar las señales de radio que por ella se propaguen. El conocimiento del comportamiento de las características y la posibilidad de estudiarlos mediante modelos, son de fundamental importancia para las aplicaciones que utilizan este tipo de señales como las de comunicaciones en alta frecuencia, sistemas de navegación vía satélite (GPS y Galileo), etc.

La ionización presente en esta región de la atmósfera, es producida principalmente por radiación ultravioleta proveniente del Sol. En latitudes medias esa ionización es removida por procesos de recombinación química que involucran a la atmósfera neutra y a especies ionizadas. Los movimientos de los iones, y el balance entre producción y pérdida, son afectados por vientos de aire neutro. Los procesos típicos de la ionosfera de latitud media también operan en baja y alta latitud, pero en estas regiones se presentan además procesos adicionales que son importantes. En la zona de baja latitud, que se extiende hasta los 30° a ambos lados del ecuador magnético, la ionosfera está fuertemente influenciada por fuerzas electromagnéticas que se originan porque el campo geomagnético es horizontal sobre el ecuador magnético. La principal consecuencia es que la conductividad es alta sobre el ecuador. Una intensa corriente eléctrica (electrochorro) fluye en la región E. En la región F se presentan aumentos o “crestas” de ionización a ambos lados del ecuador magnético, producidas por la existencia de campos magnético y eléctrico en la ionosfera ecuatorial. Estos campos generan procesos físicos que trasladan la ionización desde el

ecuador a las “crestas”, localizadas en su máxima separación del ecuador geomagnético, a unos 15°.

La generación de campos eléctricos en la atmósfera puede ser explicada con la teoría de la dínamo (Rishbeth and Garrioth 1969). El Sol y la Luna originan fuerzas de mareas en la atmósfera, las que producen movimiento del gas neutro el que, en primera aproximación, puede ser considerado horizontal. El movimiento del gas neutro a través de las líneas del campo geomagnético produce corrientes en las zonas donde la conductividad eléctrica es apreciable (región E de la ionosfera). Las corrientes no pueden fluir libremente en todas las direcciones, ya que existen variaciones horizontales y verticales de la conductividad. Así, se generan cargas de polarización. Los campos electrostáticos asociados con estas cargas son transmitidos a la región F ecuatorial a través de las líneas de campo geomagnético que son altamente conductoras. En la región F, estos campos electrostáticos causan las derivas electromagnéticas (EXB).

En el Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ) se observan y se reportan este tipo de peculiaridades desde 1960.

El radar de dispersión incoherente de Jicamarca (12.0° S, 283.0° E), Perú, ha permitido la realización de mediciones de derivas verticales y zonales de la región F de la ionosfera ecuatorial. Varias publicaciones [Fejer et al. 1979, Fejer 1981, Fejer et al. 1999, entre otros] describieron el comportamiento de la deriva vertical bajo diversas condiciones magnéticas y solares, considerado diferentes épocas del año.

El presente trabajo de tesis se encuentra dividido en dos partes principales. En la primera de ellas se desarrolla un modelo empírico de derivas verticales a partir de los datos tomados en el Radio Observatorio de Jicamarca. En la segunda parte se realiza el análisis

de la variabilidad de las derivas verticales para diferentes condiciones solares con la finalidad de mostrar diferencias de las derivas entre condiciones solares bajas, medias y altas.

Capítulo 2

Desarrollo de un modelo empírico de derivas

En este capítulo se describe el desarrollo del modelo empírico. Se inicia describiendo el experimento por el cual se obtienen los datos, criterio de selección de los datos, desarrollo de la función interpoladora, para finalizar se presentarán los modelos desarrollados.

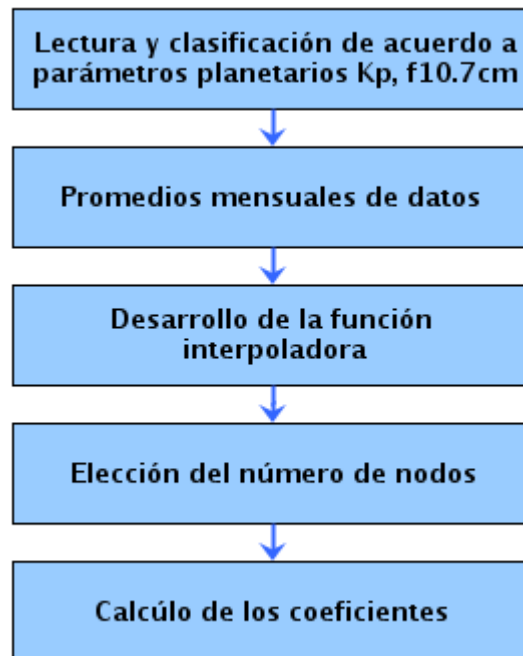


Figura 1 Diagrama del proceso de implementación y desarrollo del modelo.

En la Figura 1 se muestra el esquema para las distintas etapas en el desarrollo del modelo empírico.

2.1 Los datos

En esta sección se describen las observaciones y la técnica por la cual se hacen estas observaciones. Primeramente se hablará de las derivas verticales del plasma y se mencionará la técnica para hacer estas observaciones.

2.1.1 Las derivas verticales de la ionosfera ecuatorial

La región 150-km de la ionosfera ecuatorial es una región de transición entre las regiones E y F de la ionosfera. [Véase la Figura 2]. El gas ionizado no puede ser descrito completamente por la dinámica de fluidos razón por la cual se necesitan conceptos de física del plasma.

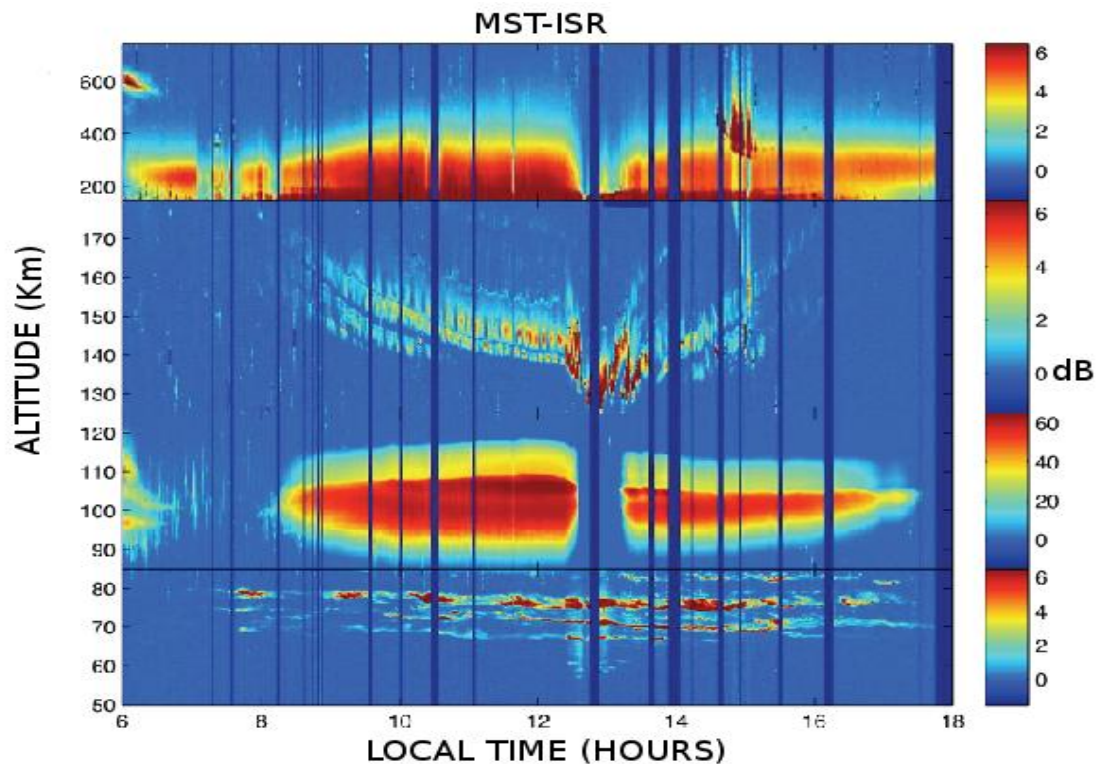


Figura 2 Los ecos de 150km sobre Jicamarca.

En la ionosfera ecuatorial la electrodinámica del plasma está restringida por un campo magnético $\mathbf{B}$ alineado horizontalmente. La densidad del plasma varía con la altura y el tiempo local. [Véase la Figura 3]

La fuerza de Lorentz, que viene dada por:

$$\vec{F}_L = q(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (1)$$

Debido al efecto de la fuerza de Lorentz dado por la ecuación (1) en las partículas cargadas, la conductividad de la atmósfera es un tensor. Los elementos del tensor de conductividad son llamados paralelo (σ_o), Pedersen (σ_p) y Hall (σ_H). Como una consecuencia de la variación con la altura de las conductividades de Pedersen y Hall, los electrones e iones positivos se mueven casi con la misma velocidad perpendicular a B , conocido como $E \times B$ velocidad de deriva, que viene dado por la ecuación (2), aproximadamente sobre los 130Km,

$$\vec{V} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{|\vec{B}|^2} \quad (2)$$

Debido a que en la ionosfera ecuatorial el campo magnético es $|\vec{B}| = 2.5 \times 10^{-5}T$, a una rapidez de 40 m/s de la deriva en la región F implica un campo eléctrico de 1mV/m. Campos con dirección al este controlan las derivas hacia arriba y campos orientados hacia abajo controlan las derivas hacia el este.

Las derivas verticales de las irregularidades de la región de los 150-km coinciden con las derivas verticales de la región F de la ionosfera. [Kudeki and Fawcett, 1993]

En la siguiente sub sección se hablará de la técnica utilizada para observar las derivas

de los 150-km.

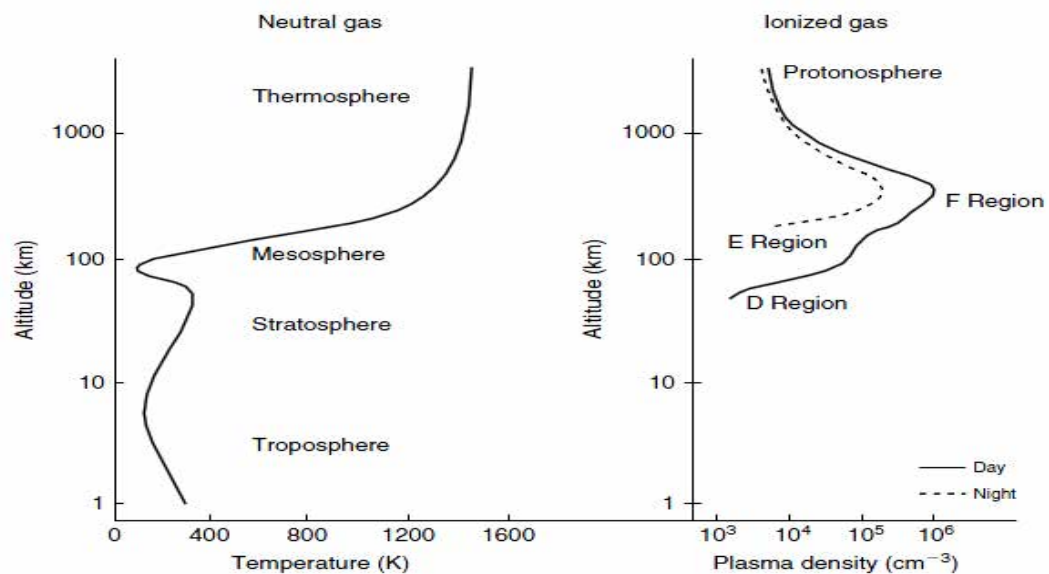


Figura 3 Series de temperatura típicas para la atmósfera neutra (izquierda). Series de densidad típicas de densidad de plasma ionosférico (derecha) con indicación de las diferentes capas [Kelley, 2009].

2.1.2 Concepto de Radar

La palabra RADAR tiene su origen en la unión de los términos en inglés Radio Detection And Ranging (Detección y ubicación mediante ondas de radio). El concepto fundamental de un radar se basa en la propagación de ondas electromagnéticas en la atmósfera a la velocidad de la luz. Si se obstruye la trayectoria de propagación de la onda o se genera algún cambio en el medio de propagación, se generan ecos o retornos de ondas electromagnéticas que pueden ser detectados y que permiten tener información de la presencia de un objeto y/o de sus características.

Conociendo además el tiempo entre la transmisión y la llegada del eco, se determina el

rango del mismo. Se denomina radar monoestático como aquel sistema de radar que utiliza la misma antena para la transmisión y recepción, mientras que un radar biestático utiliza una antena para la transmisión y otra para la recepción.

En la Figura 4 se muestra un esquema básico para un sistema de radar biestático.

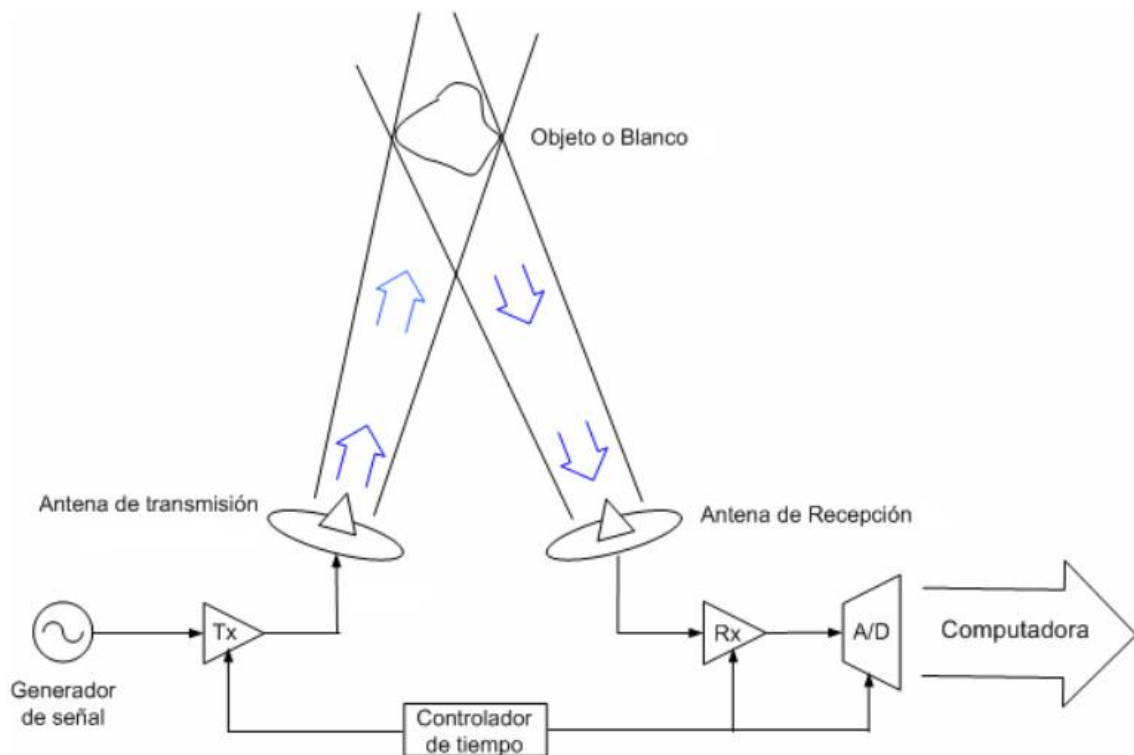


Figura 4 Esquema fundamental de un sistema de radar biestático. Tx y Rx son las abreviaturas de Transmisor y receptor (del inglés Transmitter y Receiver respectivamente).

2.1.3 El experimento JULIA

El modo de operación en dispersión coherente conocido como JULIA (del Inglés "Jicamarca Unattended Long-term Investigations of the Ionosphere and Atmosphere"), está diseñado para observar las irregularidades del plasma sobre el ecuador magnético y las ondas atmosféricas neutras durante periodos extensos de tiempo. Este sistema optimiza la funcionalidad del radar de Jicamarca al operar en periodos en los que no se utilizan transmisores de alta potencia. Además su concepción implica operar de modo desatendido. El sistema JULIA es considerado un radar MST (del Inglés "mesosphere–stratosphere–troposphere") formidable. Los fenómenos ionosfericos que se estudian con este radar son: Ecos de 150 km (aproximadamente entre 140 a 170 km), Electrochorro Ecuatorial (entre los 90 y 120 km) y F – dispersa (150-930 km). Estos fenómenos pueden apreciarse en la Figura 3.

2.2 Desarrollo del modelo

En esta parte se detalla el método desarrollado para la interpolación implementada, para visualizar la variabilidad de las derivas verticales en función del tiempo local, día del año y flujo solar. Básicamente el método consiste en (1) Criterio de selección de datos, (2) desarrollo de la función de interpolación, (3) cálculo de los coeficientes de interpolación y (4) modelos desarrollados.

2.2.1 Criterio de selección de datos a ser usados en el modelo:

Para la selección de datos se tomo en cuenta dos parámetros que a continuación se describen.

* Índice geomagnético (Kp): Este índice se calcula a partir de las variaciones en la componente horizontal del campo magnético durante un intervalo de tres horas medido por un solo magnetómetro ubicado en una estación. Usando una escala cuasi-logarítmica Kp toma valores desde 0 (muy tranquilas) hasta 9 (muy perturbado). [De acuerdo a la escala del clima espacial de la NOAA. Ver: http://www.swpc.noaa.gov/NOAA_scales/]

* Índice flujo solar (f10.7cm): Medidas de la radiación en la frecuencia de 2800MHz, es el parámetro clave para describir la intensidad de radiación solar. La intensidad de este parámetro es del orden de ($10^{-22} \text{Wm}^2 \text{Hz}^{-1}$). Así como el número relativo de manchas solares, f10.7cm es también un índice útil de la actividad solar. [Zhao & Han, 2008]. Véase en la Figura 5 la variación anual de este índice.

Los datos de las derivas verticales fueron agrupados en promedios mensuales desde el 2001 hasta 2009 (ver Figura 6 y en la figura 30 del anexo). La actividad magnética fuerte

en bajas latitudes pueden afectar dramáticamente a las derivas [Sherliess and Fejer, 1997]. Razón por la cual los datos de las derivas verticales fueron seleccionados para condiciones geomagnéticas tranquilas ($Kp \leq 3$). Estos datos se caracterizan por ubicarse entre las 8 am y 4 pm, concentrándose la mayor cantidad alrededor del medio día y disminuyendo el número de observaciones después de las 3pm hasta desaparecer después de las 5 pm en todas las temporadas. [Chau and Kudeki, 2006]

Para clasificar los datos basados en la actividad solar, se usó el índice f10.7cm. Agrupando los datos seleccionados en tres intervalos de flujo solar: para flujo solar bajo ($f10.7cm \leq 100$), flujo solar medio ($100 < f10.7cm < 150$) y flujo solar alto ($f10.7cm \geq 150$) (ver Figura 7 y figuras 30, 31 y 32 del anexo).

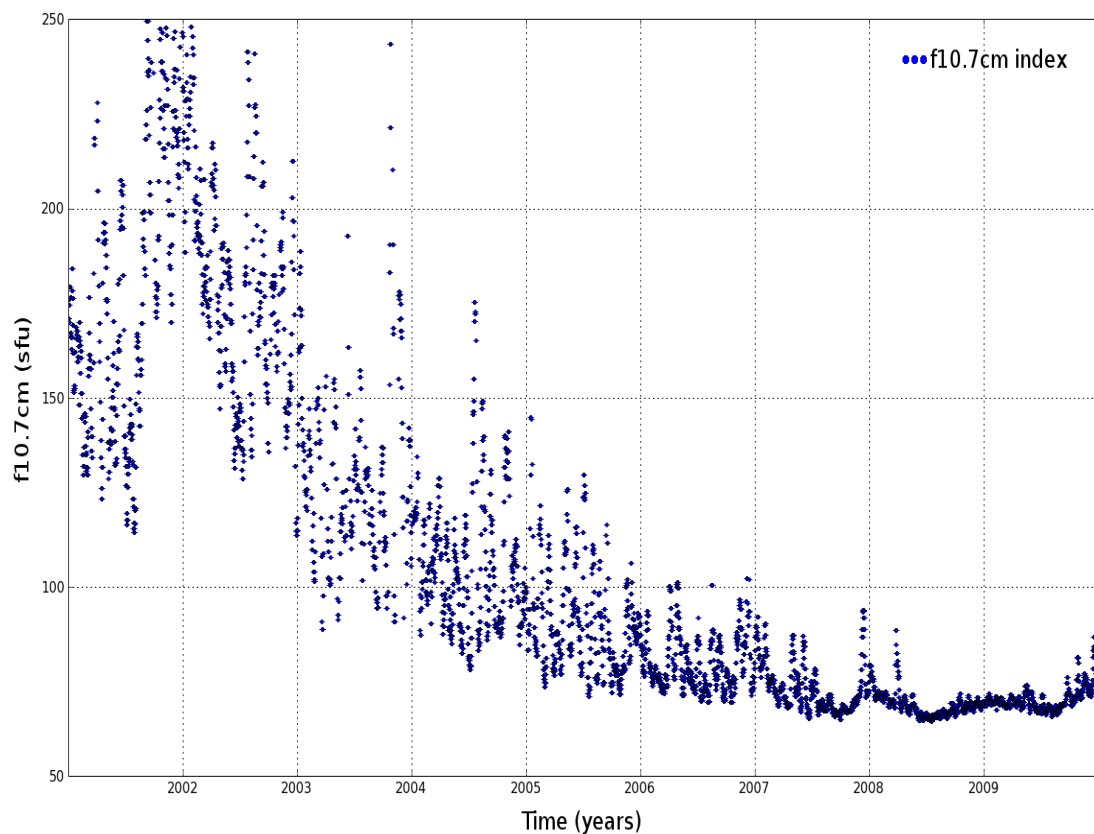


Figura 5 Variación del flujo solar f10.7cm en función del tiempo ($Kp \leq 3$) desde 2001 hasta 2009

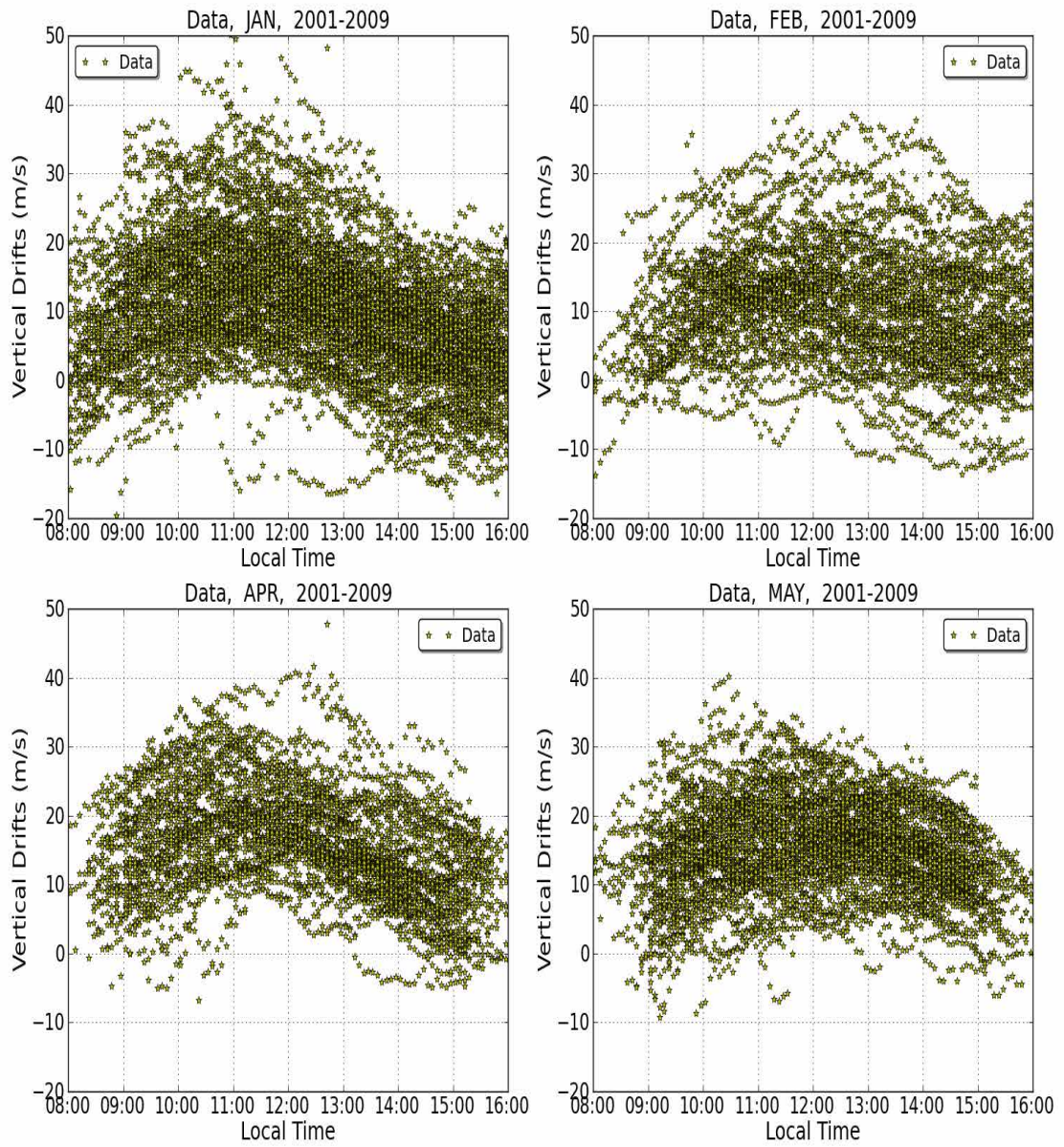


Figura 6 Datos de *ExB* JULIA distribuidos mensualmente entre 2001 y 2009. Para enero-abril.

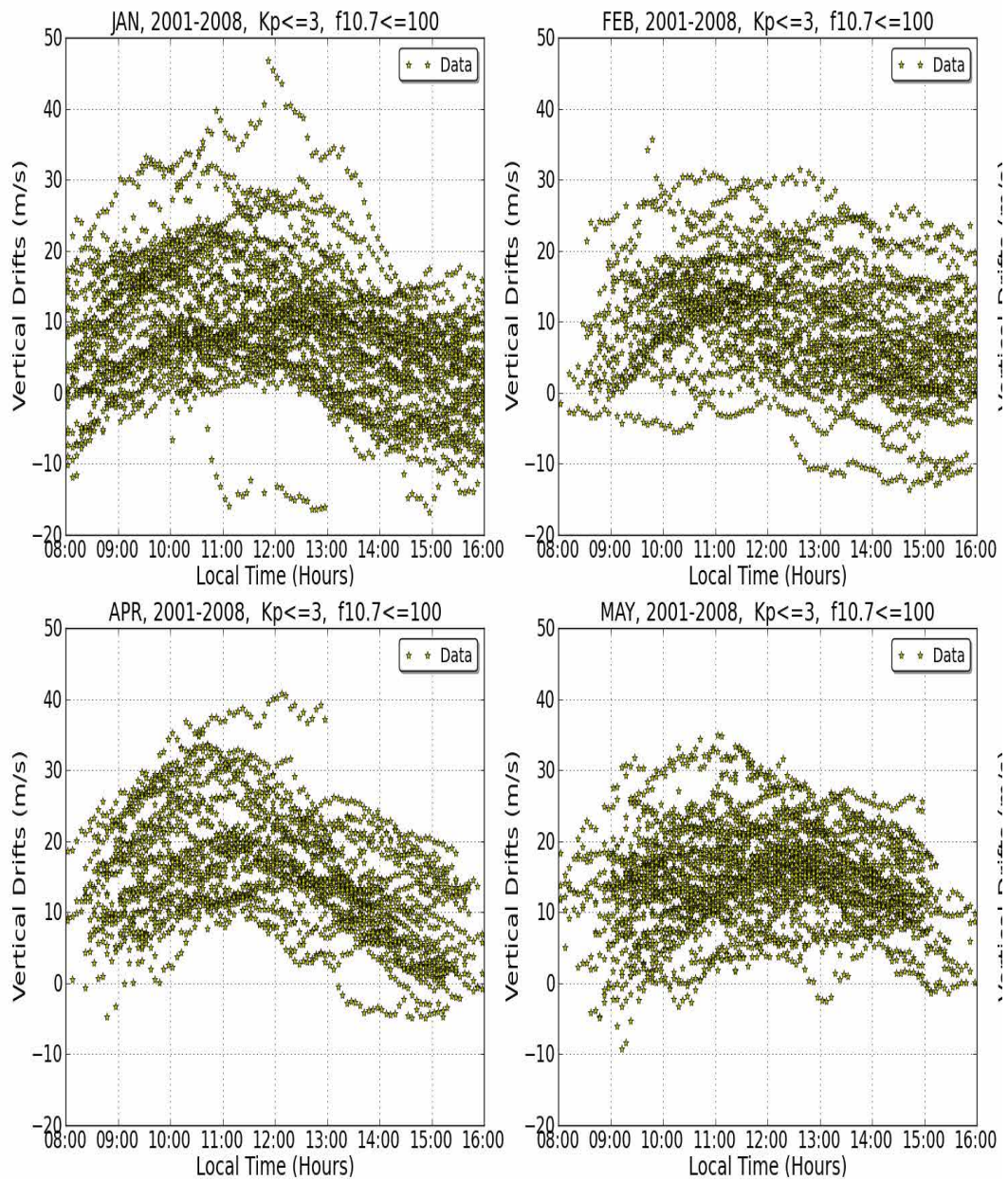


Figura 7 Datos de *ExB* JULIA para temporadas geomagnéticas tranquilas ($K_p \leq 3$), para condiciones de flujos solar bajos ($f_{10.7} \leq 100$). Para los meses de enero-abril

2.3 Interpolación de los datos de derivas

En esta sección se describe la función de interpolación desarrollada. El objetivo es modelar aproximadamente el comportamiento de los datos mediante una función matemática que cumpla ciertos criterios de continuidad.

2.3.1 Interpolación polinomial por tramos

Consiste en dividir un intervalo en una serie de subintervalos, y en cada subintervalo construir un polinomio de grado tres, ya que un polinomio cúbico general contiene cuatro constantes ofreciendo suficiente flexibilidad para garantizar que el polinomio interpolante no solo sea continuamente diferenciable en el intervalo, sino que además tenga una segunda derivada continua en el intervalo.

A continuación se muestra el desarrollo matemático para la obtención de la función interpoladora y los coeficientes.

Para la implementación de la interpolación por tramos se define el polinomio cúbico

$S_j(x) = a_j + b_j(x - x_j) + c_j(x - x_j)^2 + d_j(x - x_j)^3$ Para el intervalo $x_j \leq x \leq x_{j+1}$ para $j = 0, 1, 2, \dots, n - 1$, donde a_j, b_j, c_j y d_j son los coeficientes que se deben calcular; y un conjunto de nodos, $x_0 < \dots < x_n$ aplicando las condiciones de la definición de interpolación cúbica por tramos:

Inicialmente se pide la condición de interpolación

$$S(x_j) = f(x_j) \tag{3}$$

Para cada $j = 0, 1, \dots, n$

Luego se aplican las condiciones de continuidad

$$S_{j+1}(x_{j+1}) = S_j(x_{j+1}) \quad (4)$$

Para cada $j = 0, 1, \dots, n - 2$

A continuación, se aplican las condiciones de derivadas primeras

$$S'_{j+1}(x_{j+1}) = S'_j(x_{j+1}) \quad (5)$$

Para cada $j = 0, 1, \dots, n - 2$

Ahora, se aplican las condiciones de derivadas segundas

$$S''_{j+1}(x_{j+1}) = S''_j(x_{j+1}) \quad (6)$$

Para cada $j = 0, 1, \dots, n - 2$

De la ecuación (3) se obtienen un sistema de ecuaciones lineales el cual se puede expresar en forma matricial como una matriz A de dimensiones $n \times (k - 1)$

$$Ax = y \quad (7)$$

Finalmente de las condiciones (4), (5) y (6) se obtiene otro sistema de ecuaciones la cual se expresa en forma matricial como la matriz B de dimensiones $m \times (k - 1)$

$$B\hat{x} = C \quad (8)$$

Luego para resolver el sistema de ecuaciones (7), sujeto a (8). Se puede generalizar a una función cuadrática:

$$\|y - Ax\|^2 \quad (9)$$

Sujeto a la condición

$$B\hat{x} = C \quad (10)$$

Finalmente solo se tendría que minimizar (9) sujeto a (10), haciendo uso de los multiplicadores de Lagrange. Para esto de (9) y (10) se obtiene:

$$g(\lambda) = x^T A^T A x - 2y^T A x + y^T y + \lambda^T (Bx - C) \quad (11)$$

Derivando (11):

$$\frac{\partial g(\lambda)}{\partial x} = 0$$

Se tiene:

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T y - \frac{1}{2} (A^T A)^{-1} B^T \lambda \quad (12)$$

Reemplazando (12) en (11):

$$\hat{g}(\lambda) = \lambda^T B (A^T A)^{-1} A^T y - \frac{1}{4} \lambda^T B (A^T A)^{-1} B^T \lambda - y^T A (A^T A)^{-1} A^T y + y^T y - \lambda^T C \quad (13)$$

Derivando y despejando (13):

$$\begin{aligned} \hat{x} = \{ & (A^T A)^{-1} - (A^T A)^{-1} B^T [B (A^T A)^{-1} B^T]^{-1} B (A^T A)^{-1} \} A^T y \\ & + (A^T A)^{-1} B^T [B (A^T A)^{-1} B^T]^{-1} C \end{aligned} \quad (14)$$

Reemplazando (10) en (14):

$$\hat{x} = \{ (A^T A)^{-1} - (A^T A)^{-1} B^T [B (A^T A)^{-1} B^T]^{-1} B (A^T A)^{-1} \} A^T y \quad (15)$$

De la ecuación (15) se obtienen los coeficientes para las interpolaciones

2.4 Elección del número de nodos

En esta subsección se describe el método por el cual se escogió el número de nodos adecuado en las interpolaciones. Básicamente se usaron criterios como el error cuadrático medio y el criterio del buen ajuste (del Ingles “goodness-of-fit”).

Para la elección del número de nodos se examinó la variación del error cuadrático medio como una función del número de nodos. El error cuadrático medio se define como:

$$s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i (v_i - v(t_i))^2 \quad (16)$$

Donde N es el número de derivas verticales y los pesos w_i vienen dados por la inversa de la varianza estimada de los datos de JULIA para cada tiempo t_i .

Los v_i son valores de las derivas verticales tomados en el experimento JULIA y $v(t_i)$ es el correspondiente valor del modelo desarrollado.

Cuando se aumenta el número de nodos disminuye el error cuadrático medio, eventualmente un aumento del número de nodos produciría un sobreajuste, acercando S^2 al valor verdadero de la varianza. [Draper and Smith, 1981]. En la Figura 8 se puede apreciar la disminución del valor de s^2 al incrementar el número de nodos. Para los casos en donde hay una cantidad considerable de datos se observa que S^2 tiende a estabilizarse en una asíntota al agregar un número mayor de nodos (véase Figura 8 para enero, febrero y abril), en el apéndice A se muestran estas gráficas para todos los meses del año, para flujo solar bajo ($f_{10.7\text{cm}} \leq 100$), flujo solar medio ($100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$) y flujo solar alto ($f_{10.7\text{cm}} \geq 150$).

En los casos que no se observa un comportamiento asintótico (como para el mes de

marzo en la Figura 8), se escoge un número de nodos que coincide con el “codo” de las curvas (Véase las figuras del anexo A) en este caso se escoge seis como el número de nodos adecuado ya que con este valor se describe muy bien los cambios estacionales de los datos de derivas verticales.

Con el número de nodos adecuados se calculo los coeficientes de la interpolación haciendo uso de las rutinas implementadas en Python a partir de la ecuación (15).

En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos con el modelo desarrollado para algunos meses comparándolos con los promedios y los datos. En el apéndice A se muestran los gráficos para todos los meses del año.

Obteniéndose la variabilidad de las derivas verticales en función del tiempo local, estación y flujo solar.

Finalmente se tiene doce funciones interpoladas uno por cada mes del año. Para introducir el día del año como parámetro de entrada se realizó una segunda interpolación entre las doce funciones (utilizando la función implementada en Python).

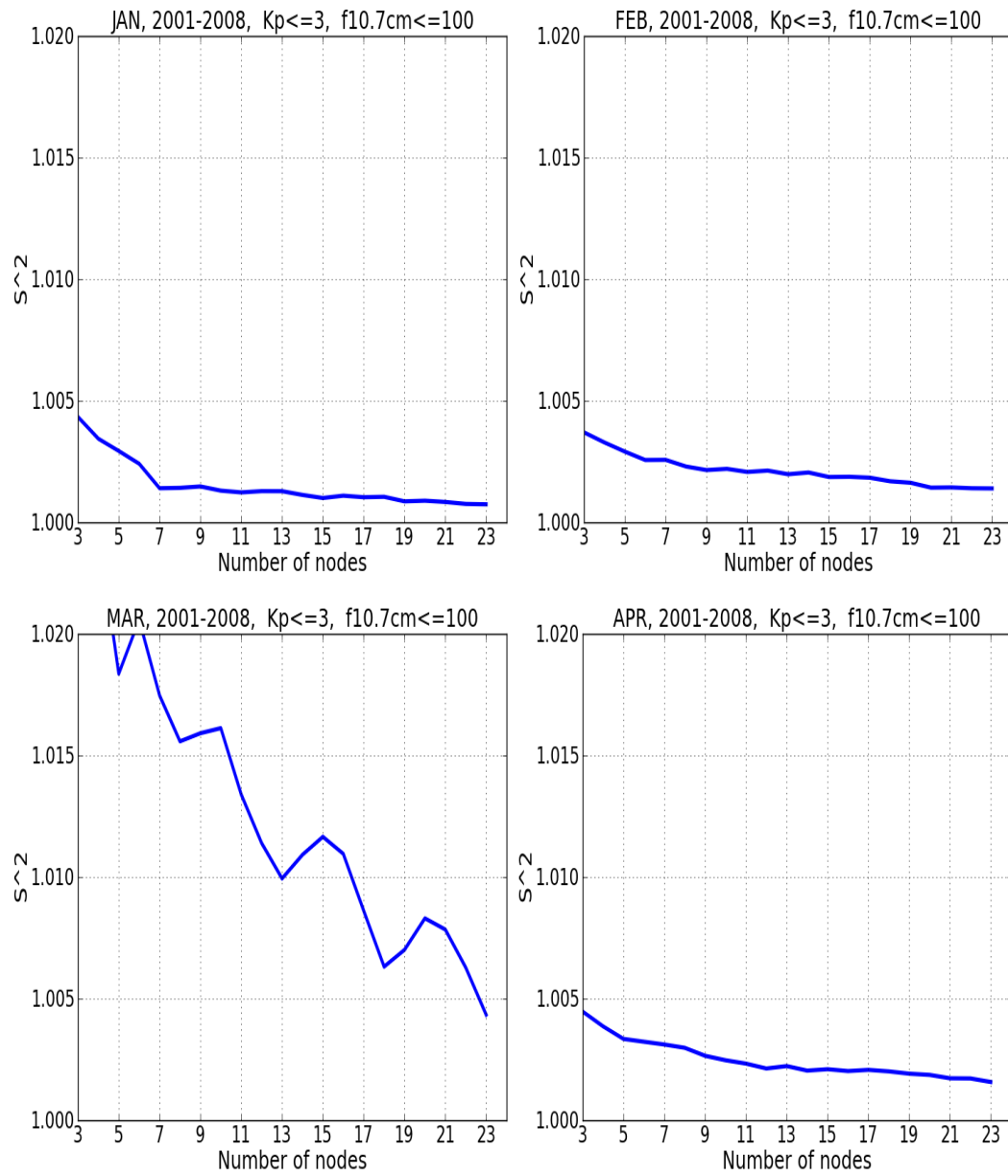


Figura 8 El error cuadrático medio (s^2) en función del número de nodos para condiciones de flujo solar bajos ($f10.7cm \leq 100$) y $Kp \leq 3$. Para los meses enero-abril

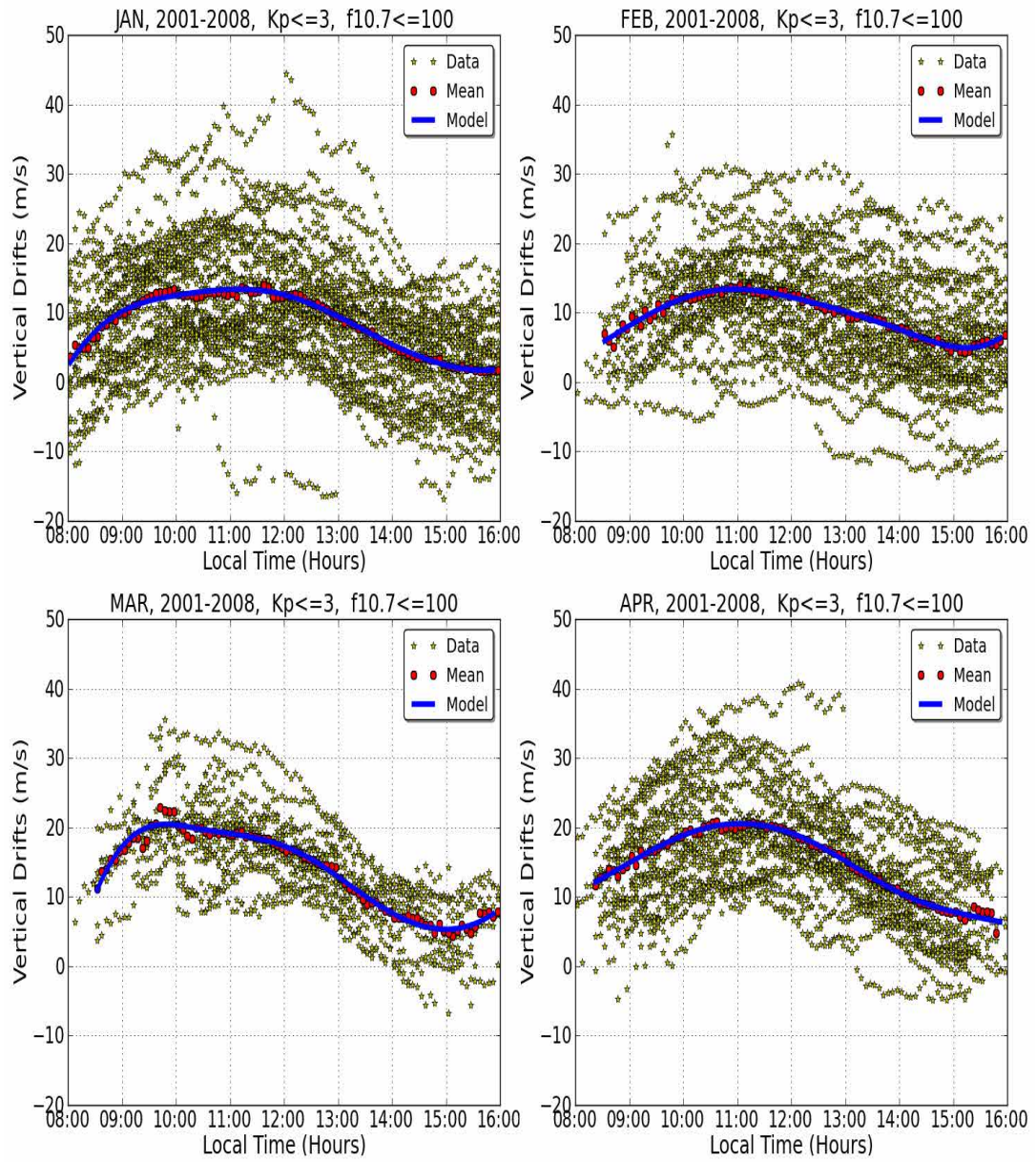


Figura 9 (verde) datos de *ExB* JULIA, (rojo) promedio mensual, (azul) función de interpolación desarrollada. Para condiciones de flujo solar bajo ($f_{10.7cm} \leq 100$)

2.5 Modelos desarrollados

Una vez implementados los algoritmos descritos anteriormente, se desarrolla cuatro modelos basados en los datos de JULIA: modelo M0 para comparar el modelo desarrollado contra el modelo de Alken y el modelo de Scherliess y Fejer , modelo M1 para estudiar la variabilidad de las derivas en condiciones solares medias($100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$) y altas($f_{10.7\text{cm}} > 150$), modelo M2 para estudiar la variabilidad de las derivas en condiciones solares bajas ($f_{10.7\text{cm}} < 100$) y moderadas ($100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$), finalmente el modelo M3 para estudiar la variabilidad de las derivas en condiciones solares bajas ($f_{10.7\text{cm}} < 100$). A continuación se describe cada modelo con más detalle.

2.5.1 Modelo M0

Este modelo fue desarrollado para ser comparado contra otros modelos (Alken y Scherliess, 1999). Los datos usados corresponden al periodo del 2001 al 2008. Estos datos fueron clasificados en tres niveles de flujo solar: flujo solar bajo ($f_{10.7\text{cm}} \leq 100$), flujo solar medio ($100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$) y flujo solar alto ($f_{10.7\text{cm}} \geq 150$), para tiempos geomagnéticos tranquilos ($K_p \leq 3$). En los siguientes capítulos para hacer referencia al modelo M0 solamente se utilizara M0.

Tabla 1. Clasificación del valor de las derivas verticales.

Clasificación	Valores de derivas (m/s)
Altos	14-21
Medios	7-14
Bajos	0-7

Principales características de este modelo:

Para flujo solar $f10.7\text{cm} \leq 100$ (Véase Figura 10)

Solo se consideran datos a partir de las 8:30 am hasta las 3:15pm.

Se observan tres grupos marcados que concentran derivas con valores altos, estos se encuentran:

Entre marzo y abril (valores de derivas entre 17 y 21m/s). Estos valores se presentan entre las 9 am y 12 pm.

Entre septiembre y noviembre (valores entre 17 y 21 m/s). Estos valores se presentan entre las 10 am y 12 pm.

Entre junio y septiembre (valores entre 17 y 19 m/s). Estos valores se presentan entre las 9 am y 12 pm.

Se observan dos grupos marcados que concentran derivas con valores bajos (valores de derivas entre 1 y 6m/s), estos se encuentran después de las 2pm entre enero y abril, entre octubre y diciembre.

Para flujo solar $100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$ (Véase Figura 39 del anexo A):

Solo se tomaron en cuenta datos a partir de las 9 am a 3:30 pm (tiempo local).

Se observan tres grupos marcados que concentran derivas con valores altos, estos se encuentran:

Entre los meses de marzo y mayo se observan valores altos de las derivas verticales con picos de 19 a 21 m/s, entre las 9:30 am y las 12:30 pm (tiempo local).

Entre los meses de mayo y julio observan valores de las derivas verticales de 15 a 18 m/s entre las 10 am y la 1 pm (tiempo local).

Entre el agosto y noviembre se observan valores de 17 a 21m/s, entre las 9am y 13:30.

Además, se presentan valores de 14 a 17m/s alrededor de los meses de enero y diciembre, entre las 9am y las 12pm.

Se observan dos grupos marcados que concentran derivas con valores bajos (valores de derivas entre 1 y 6m/s), estos se encuentran después de las 1pm entre enero y febrero, entre noviembre y diciembre

Para flujo solar $f_{10.7\text{cm}} \geq 150$ (Véase Figura 39 del anexo A):

Para este rango de flujo solar solo se considero datos entre las 10:30 am y 3 pm aproximadamente.

No se encontraron datos para los meses de marzo y mayo.

Se observan tres grupos marcados que concentran derivas con valores altos, estos se encuentran:

Alrededor del mes de agosto se observan valores altos de las derivas verticales entre

17 a 21 m/s, entre las 10:30 am y las 12:30 pm.

Entre junio y agosto se observan valores de derivas entre 18 y 21 m/s entre las 10:30 am y 2 pm.

Alrededor de septiembre observan valores entre 17 y 21 m/s, entre las 10:30 am y las 1:30 pm.

Además, en el mes de enero se observan valores de las derivas alrededor de los 16 m/s entre las 10:30 am y las 1 pm.

2.5.2 Modelo M1

Este modelo se desarrolló con datos entre los años 2001 y 2003 con dos intervalos de flujo solar: $100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$ y $f_{10.7\text{cm}} \geq 150$. En los siguientes capítulos para hacer referencia al modelo M1 solamente se utilizará M1.

Para flujo solar $100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$ (Véase Figura 40 del anexo A):

En este intervalo de flujo solar solo se consideran datos entre las 9 am y las 3:45 pm.

Se observan tres grupos marcados que concentran derivas con valores altos, estos se encuentran:

En el mes de enero con valores de derivas entre 16 y 21 m/s, entre las 9 am y las 11 am.

Entre los meses de marzo y mayo se observan valores de 17m/s a 21m/s, entre las 10 am y la 1pm.

Entre los meses de agosto y noviembre se observan valores de 21 m/s, entre las 10 am

y las 1 pm.

Además, se observan dos grupos marcados que concentran derivas con valores bajos (valores de derivas entre 1 y 6m/s), estos se encuentran después de las 1pm entre enero y febrero, entre noviembre y diciembre.

Para flujo solar $f_{10.7\text{cm}} \geq 150$ (Véase Figura 40 del anexo A):

Para este rango solo se considero datos entre las 10 am y las 3:30 pm.

No se hallaron datos para los meses de marzo y mayo.

Se observan tres grupos marcados que concentran derivas con valores altos, estos se encuentran:

Alrededor del mes de agosto se observan valores altos de las derivas verticales entre 17 a 21 m/s, entre las 10 am y las 12:30 pm.

Entre junio y julio se observan valores de derivas entre 17 y 21 m/s entre las 10:30 am y 2 pm.

Alrededor de septiembre observan valores entre 17 y 21 m/s, entre las 10 am y las 2 pm.

Además, en el mes de enero se observan valores de las derivas alrededor de los 16 m/s entre las 10 am y las 1 pm

2.5.3 Modelo M2

Este modelo se desarrolló con datos de los años 2004 a 2006 en dos intervalos de flujo solar: $f_{10.7\text{cm}} \leq 100$ y $100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$. En los siguientes capítulos para hacer referencia al modelo M2 solamente se utilizaron M2.

Para el rango de flujo solar $f_{10.7\text{cm}} \leq 100$ (Véase Figura 41 del anexo A):

Para este rango solo se considera datos a partir de las 8:30 am hasta las 3:15 pm.

No se encontraron datos para el mes de junio.

Se observan tres grupos marcados que concentran derivas con valores altos, estos se encuentran:

Entre los meses de marzo y mayo se observan valores altos de las derivas verticales entre 17 a 21 m/s, entre las 9 am y las 1:30 pm.

Entre julio y agosto se observan valores de derivas entre 16 y 18 m/s entre las 9 am y 12 pm.

Entre los meses de agosto y octubre se observan valores entre 16 y 19 m/s, entre las 9:30 am y las 1 pm.

Además, en el mes de enero se observan valores de derivas entre 14 y 16 m/s, entre las 10 am y las 12:30 pm.

Además, se observan dos grupos marcados que concentran derivas con valores bajos (valores de derivas entre 1 y 6 m/s), estos se encuentran después de las 2 pm entre enero y febrero, entre noviembre y diciembre.

Para el rango de flujo solar $100 < f < 10.7 \text{ cm} < 150$ (Véase Figura 41 del anexo A):

Para este modelo solo se consideraron datos a partir de 9 am a 3pm. No se encontraron datos para los meses de junio y septiembre.

Se observan cuatro grupos marcados que concentran derivas con valores altos, estos se encuentran:

Entre los meses de febrero y mayo se observan valores altos de las derivas verticales entre 17 a 21 m/s, entre las 9 am y las 2 pm.

Entre julio y agosto se observan valores de derivas entre 17 y 21 m/s entre las 9 am y 2 pm.

Alrededor del mes de octubre se observan valores entre 17 y 21 m/s, entre las 9 am y las 1:30 pm.

En el mes de enero se observan valores de derivas entre 14 y 17 m/s, entre las 9:30 am y las 12 pm.

Además, en el mes de diciembre se observan derivas con valores bajos (valores de derivas entre 1 y 6 m/s), después de las 2pm.

2.5.4 Modelo M3

Este modelo se desarrolló con datos de los años 2007 a 2009 (correspondientes al ciclo solar número 23) solo se encontraron datos para un intervalo de flujo solar: $10.7 \text{ cm} \leq 100$ (Véase Figura 13). En los siguientes capítulos para hacer referencia al modelo M3 solamente se utilizará M3.

Para este modelo solo se consideran datos desde las 9 am hasta las 3:30 pm.

Se observan cuatro grupos marcados que concentran derivas con valores altos, estos se encuentran:

Entre febrero y abril se observan valores de derivas entre 14 y 18m/s, a partir de las 10am hasta la 1 pm.

Entre mayo y julio se observan valores de derivas entre 14 y 18m/s, a partir de las 10am hasta la 2 pm.

Entre agosto y septiembre se observan valores de derivas entre 16 y 19m/s, a partir de las 9am hasta la 2 pm.

Entre septiembre y noviembre se observan valores de derivas entre 17 y 21m/s, a partir de las 10am hasta la 1 pm.

Además, también se observan dos grupos marcados que concentran derivas con valores bajos (valores de derivas entre 1 y 6m/s), estos se encuentran después de las 2pm entre enero y febrero, entre noviembre y diciembre.

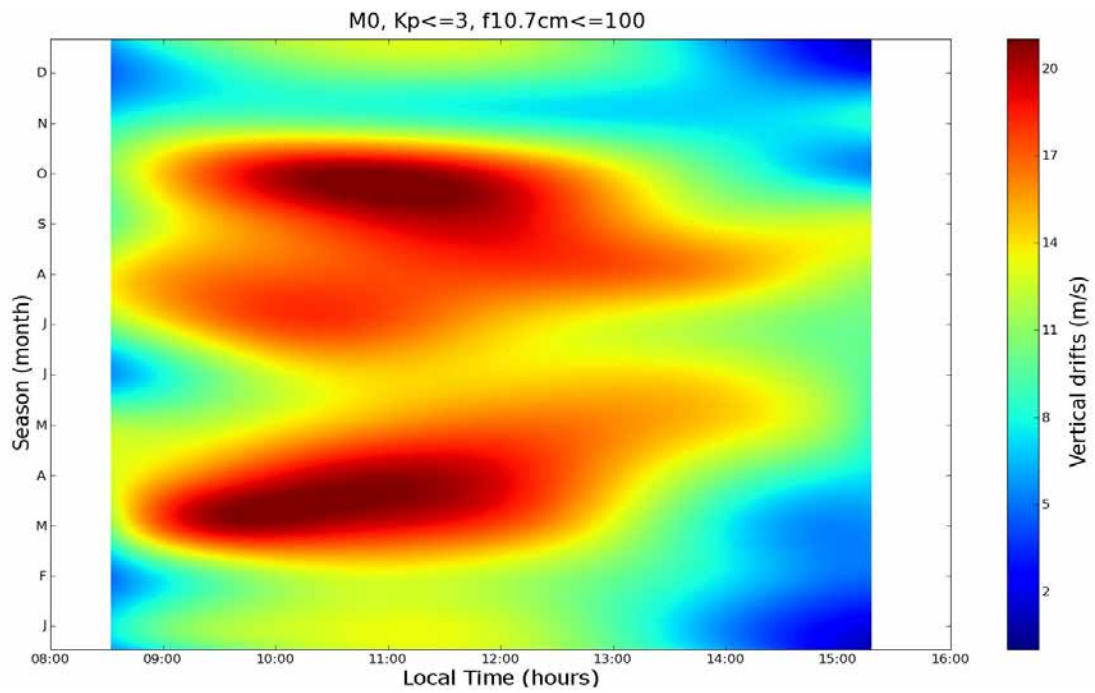


Figura 10: Variación de las derives verticales en función del tiempo local y la estación para M0 ($K_p \leq 3$, $f_{10.7\text{cm}} \leq 100$)

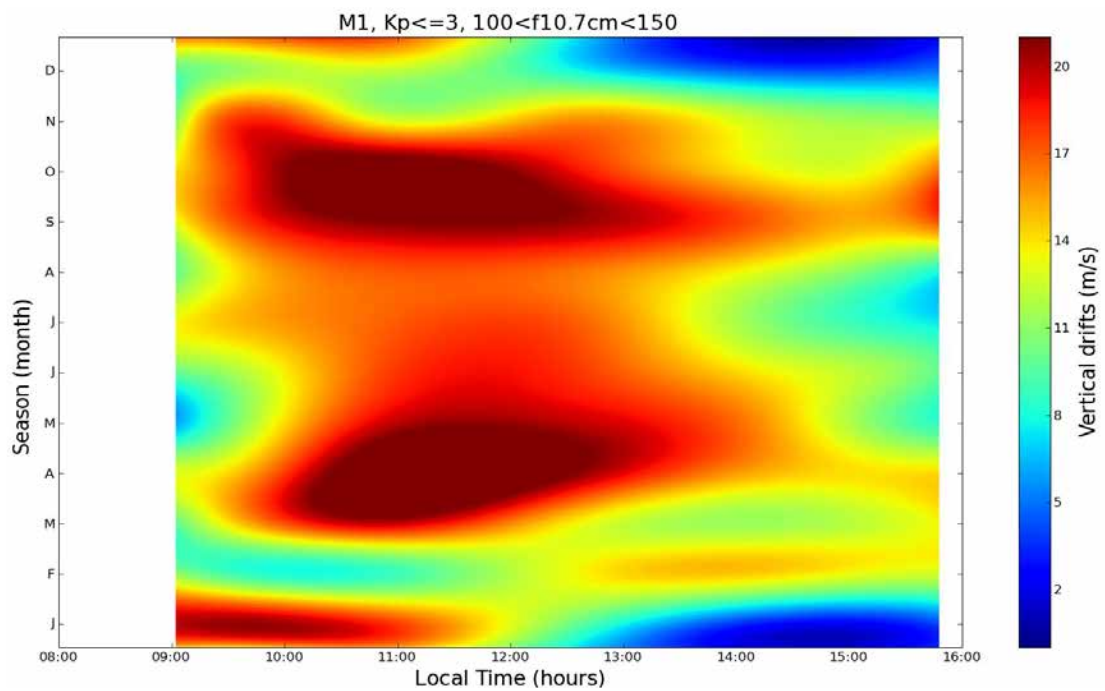


Figura 11: Variación de las derives verticales en función del tiempo local y la estación para M1 ($K_p \leq 3$, $100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$)

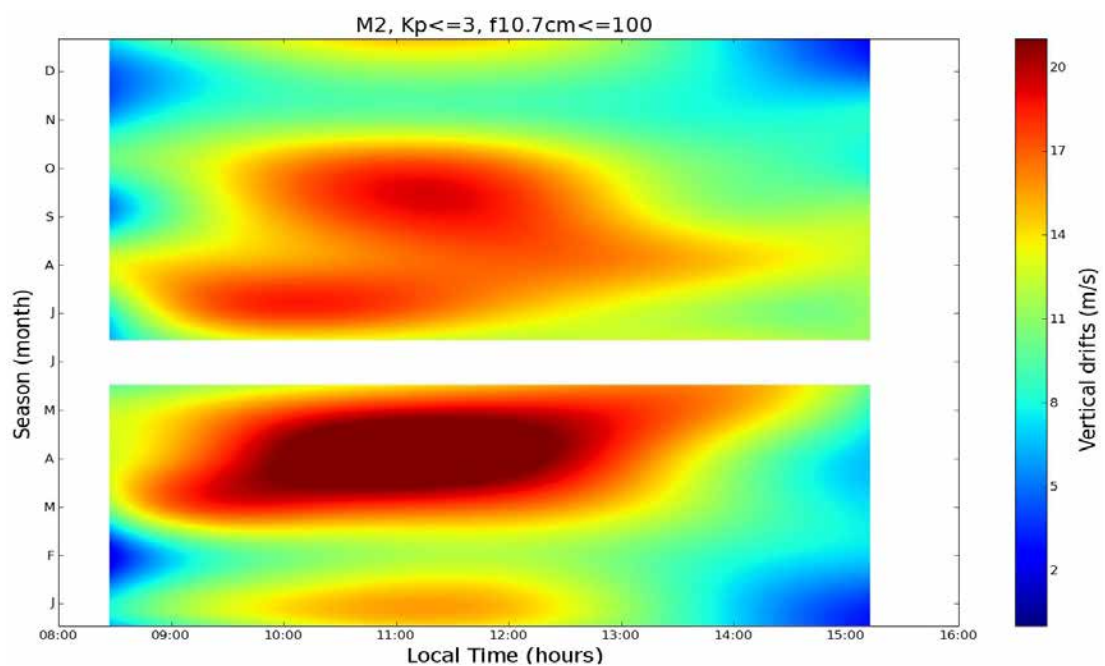


Figura 12: Variación de las derives verticales en función del tiempo local y la estación para M2 ($K_p \leq 3$, $f_{10.7\text{cm}} \leq 100$)

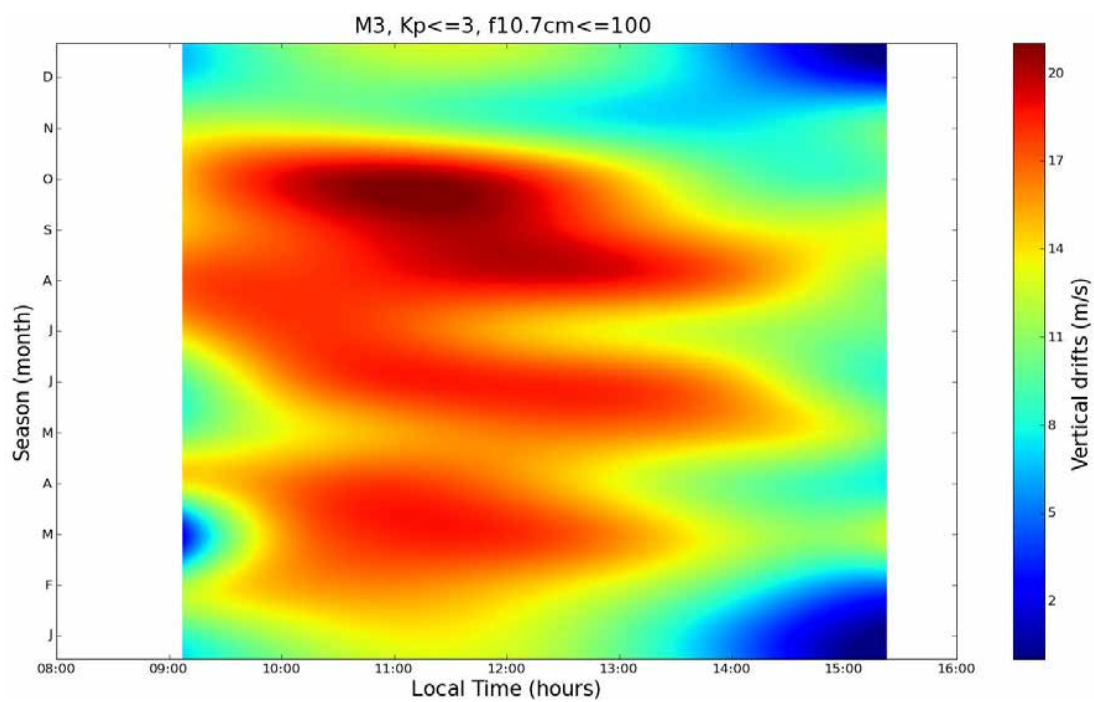


Figura 13: Variación de las derives verticales en función del tiempo local y la estación para M3 ($K_p \leq 3$, $f_{10.7\text{cm}} \leq 100$)

Capítulo 3

Comparación del Modelo

En este capítulo se describe el método de comparación del modelo contra dos modelos empíricos: El modelo empírico de derivas verticales de Alken [Alken 2008] y el modelo de Scherliess y Fejer [Scherliess and Fejer, 1999]. Se empieza describiendo los modelos con que se compara el modelo desarrollado.

3.1 El modelo de Alken

Para comparar el modelo, se usará el modelo M0 contra el modelo de Alken. Este modelo está desarrollado con datos de JULIA entre agosto del 2001 hasta julio del 2008. El modelo es válido entre las 8 am y 4 pm (tiempo local). Para condiciones geomagnéticas tranquilas ($K_p \leq 3$). Este modelo depende de la hora local, día del año y el flujo solar EUVAC (Véase Figura 14) como parámetros de entrada. El modelo de Alken usa una interpolación en dos dimensiones y usa los cubic spline como funciones base.

3.2 El modelo de Scherliess y Fejer

También se comparó el modelo contra el modelo de Scherliess y Fejer [Scherliess and Fejer, 1999]. Este modelo esta desarrollado con datos de derivas verticales observados por el radar del Radio Observatorio de Jicamarca con la técnica de dispersión incoherente (del Ingles “Incoherent scatter radar, ISR”), también utiliza los datos tomados del satélite Atmospheric Explorer E (AE-E). Los datos ISR usados son promedios correspondientes a observaciones entre los 300 y 400 Km de altitud sobre Jicamarca. Los datos del satélite AE-E usados fueron tomados mientras orbitaba a una altitud entre los 230 a 470 Km, estos datos también corresponden a promedios. Este modelo está basado en productos de funciones cubic-B splines. Describe las derivas verticales en función del día del año, hora, flujo solar y longitud geográfica.

3.3 Criterio de comparación del modelo

Para la comparación del modelo contra los modelos anteriores se usó la raíz cuadrada del error cuadrático medio (e).

Definido de la siguiente manera:

$$e = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - Vm_i)^2} \quad (17)$$

Donde: V es el valor de la deriva del modelo desarrollado, Vm es el valor de la deriva del modelo contra el cual se quiere comparar y N es el número total de valores de derivas usados.

Para esta tesis V corresponde a promedios mensuales del modelo contra el que se quiere comparar.

La Tabla 2 muestra los valores de e entre el modelo M0 y el modelo de Alken, para todos los meses del año en tres intervalos de flujo solar. En el intervalo de flujo solar $f_{10.7\text{cm}} \leq 100$ se obtiene un valor promedio de 1.588 m/s. En el intervalo de flujo solar $100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$ se obtiene un valor promedio de 1.739 m/s, finalmente en el intervalo $f_{10.7\text{cm}} \geq 150$, se obtiene un valor promedio de 2.202 m/s.

Este aparente desplazamiento mostrado entre M0 y el modelo de Alken es producido a los valores promedio de las derivas que se obtienen del modelo de Alken.

En la Figura 19 se muestra la variación de e en función del mes para los tres intervalos de flujo solar (M0 con Alken). Observándose valores relativamente altos de e para flujos mayores ($f_{10.7\text{cm}} \geq 150$).

También comparamos los valores de la raíz cuadrada del error cuadrático medio, entre el promedio de los valores de las derivas de M0 expresado en porcentaje, 14.34 %

Haciendo uso de las figuras 15, 16 y 17 se observan algunas diferencias como un aparente desplazamiento estacional de las derivas hacia adelante en el modelo para $f_{10.7\text{cm}} < 100$. Así también un desplazamiento temporal en el modelo para $100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$. Mientras que para $f_{10.7\text{cm}} > 150$ las diferencias son muy marcadas.

Tabla 2. Valores de e entre M0 y el modelo de Alken, para todos los meses y tres intervalos de flujo solar.

Mes	Modelo M0 - Alken Model					
	Raíz cuadrada del Error cuadrático medio (m/s)					
	f10.7cm≤100	EUVAC≤100	100<f10.7cm<150	100<EUVAC<150	f10.7cm≥150	EUVAC≥150
enero	0.856		1.982		2.750	
febrero	1.001		1.824		1.661	
marzo	2.732		1.984		-	
abril	0.587		2.817		3.878	
mayo	1.584		1.020		-	
junio	2.848		1.248		1.752	
julio	2.273		1.884		3.244	
agosto	1.213		0.837		1.455	
septiembre	1.678		2.462		0.362	
octubre	1.019		1.240		3.001	
noviembre	1.217		1.261		2.541	
diciembre	2.045		2.313		1.380	
Promedio	1.588		1.739		2.202	

La Tabla 3 muestra los valores de e entre M0 y el modelo de Scherliess and Fejer, para todos los meses del año en tres intervalos de flujo solar. En el intervalo de flujo solar $f10.7cm \leq 100$ se obtiene como resultado un valor promedio de 5.925m/s. En el intervalo de flujo solar $100 < f10.7cm < 150$ se obtiene un valor promedio de 5.485m/s, finalmente en el intervalo $f10.7cm \geq 150$, se obtiene un valor promedio de 5.522m/s.

También comparamos los valores de la raíz cuadrada del error cuadrático medio entre el promedio de los valores de las derivas de M0 expresado en porcentaje, 45.14 %

En la Figura 21 se muestra la variación de e en función del mes para los tres intervalos de flujo solar. Observándose altos valores de e en los tres intervalos de flujo solar (M0 contra el modelo de Scherliess y Fejer).

Se puede concluir que los valores altos en las diferencias entre el modelo y el modelo de Scherliess y Fejer se producen debido al tratamiento estacional diferente.

Los valores obtenidos para esta comparación son razonables y permiten concluir que es positiva la comparación del modelo.

Tabla 3. Valores de e entre M0 y el modelo de Scherliess & Fejer, para todos los meses y tres intervalos de flujo solar.

Mes	Modelo M0 - Scherliess and Fejer Model		
	Raíz cuadrada del Error cuadrático medio(m/s)		
	$f10.7cm \leq 100$	$100 < f10.7cm < 150$	$f10.7cm \geq 150$
enero	5.354	4.888	4.282
febrero	5.389	5.483	4.135
marzo	3.328	3.154	-
abril	3.318	3.916	3.529
mayo	7.908	7.238	-
junio	9.201	7.349	6.805
julio	6.480	6.795	9.389
agosto	7.339	5.798	4.287
septiembre	4.966	5.529	4.121
octubre	3.514	3.900	6.879
noviembre	7.713	5.015	5.840
diciembre	6.586	6.751	5.951
Promedio	5.925	5.485	5.522

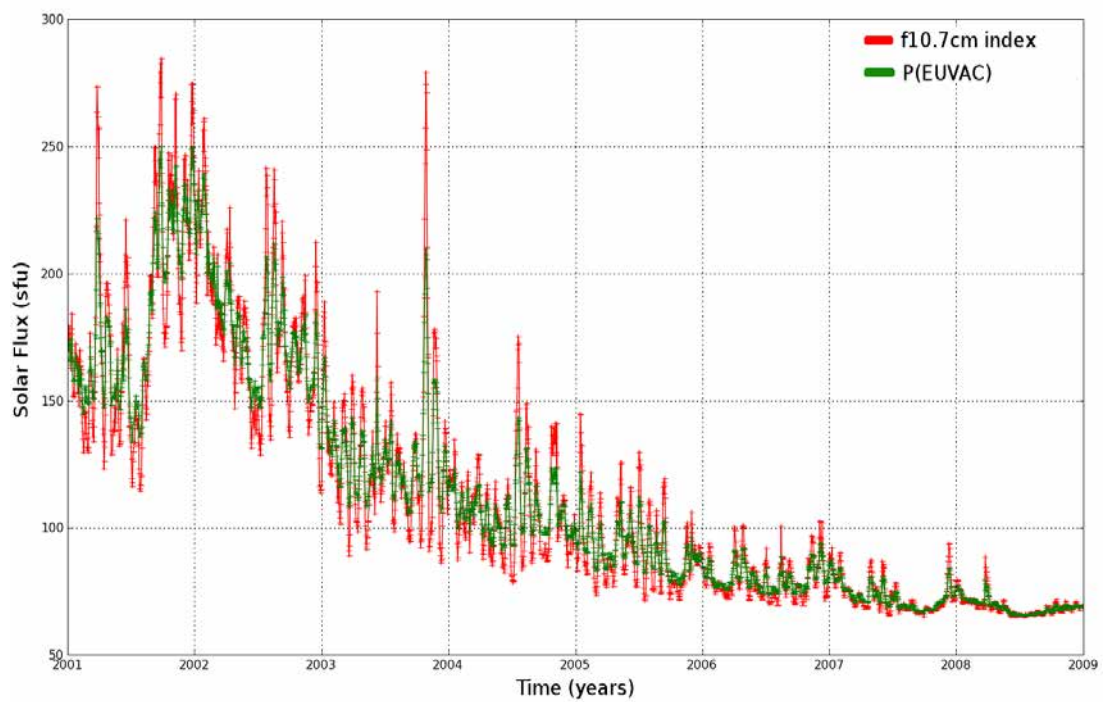


Figura 14 Variaciones de los índices f10.7cm y P(EUVAC) para condiciones geomagnéticas tranquilas ($K_p \leq 3$)

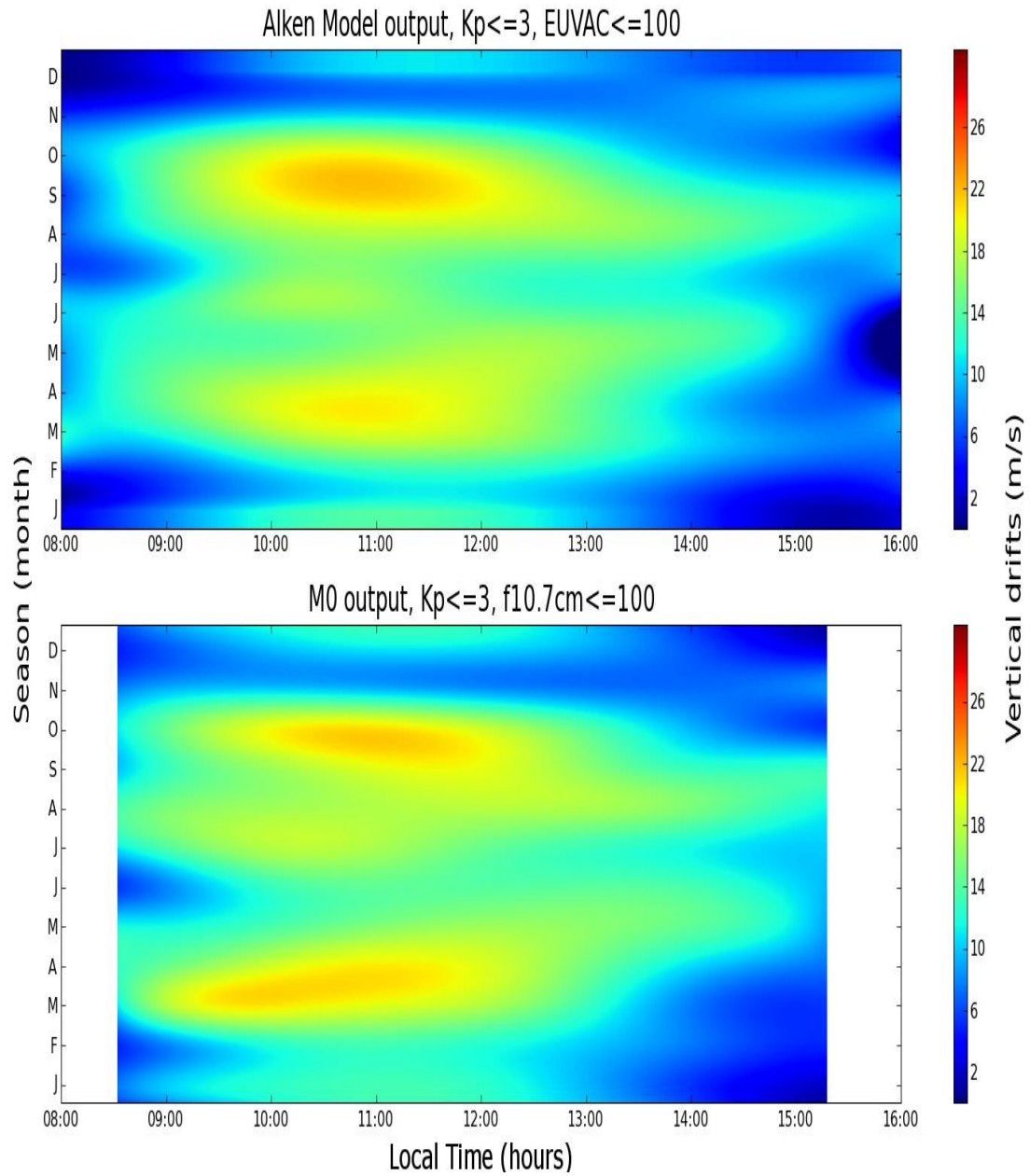


Figura 15 (abajo) variaciones de las derivas verticales en función del tiempo local y estacional para M0 ($K_p \leq 3$, $f_{10.7cm} \leq 100$), (arriba) resultados para el modelo de Alken ($K_p \leq 3$, $EUVAC \leq 100$)

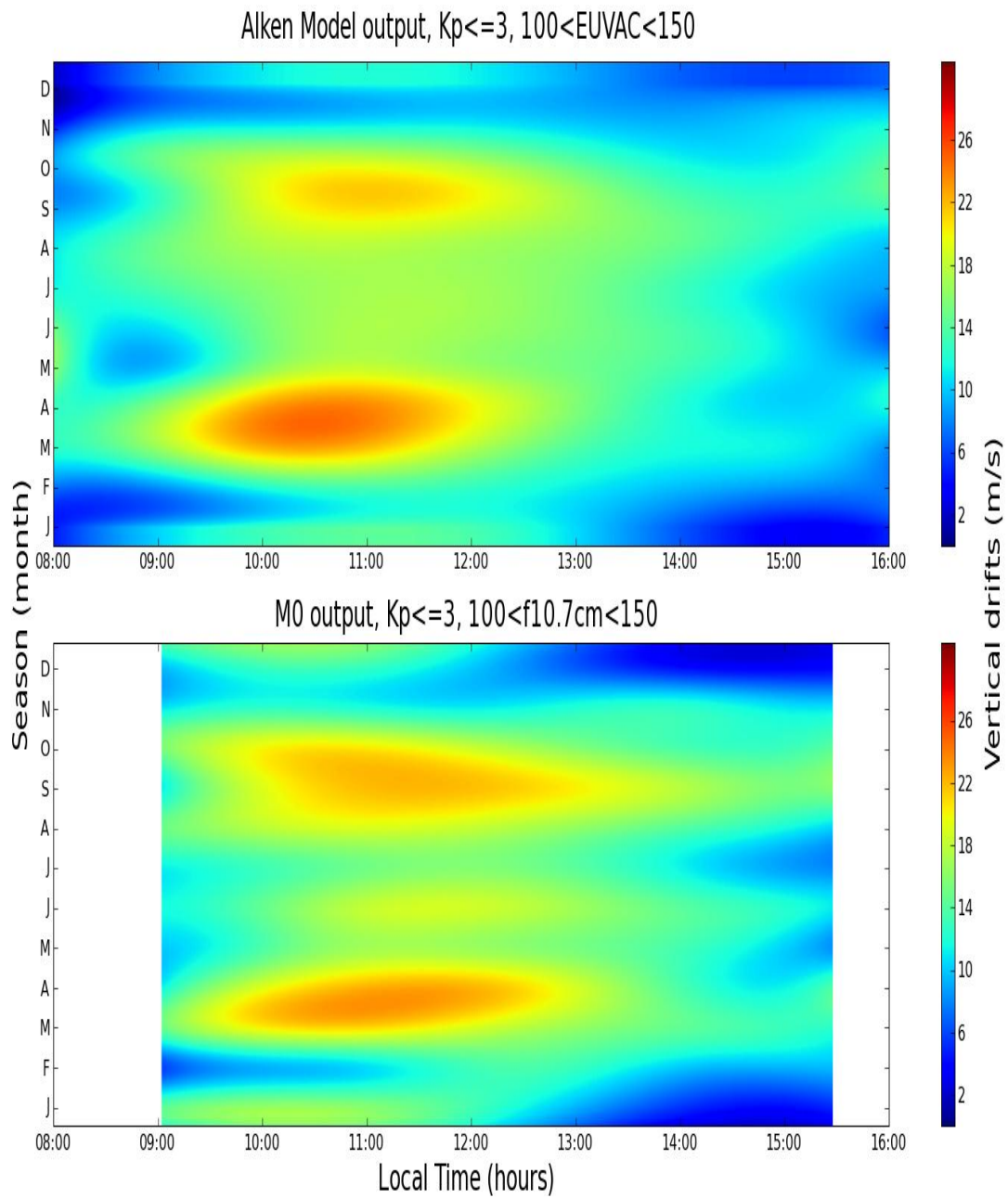


Figura 16 (abajo) variaciones de las derivas verticales en función del tiempo local y estacional para M0 ($K_p \leq 3$, $100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$), (arriba) resultados para el modelo de Alken ($K_p \leq 3$, $100 < \text{EUVAC} < 150$)

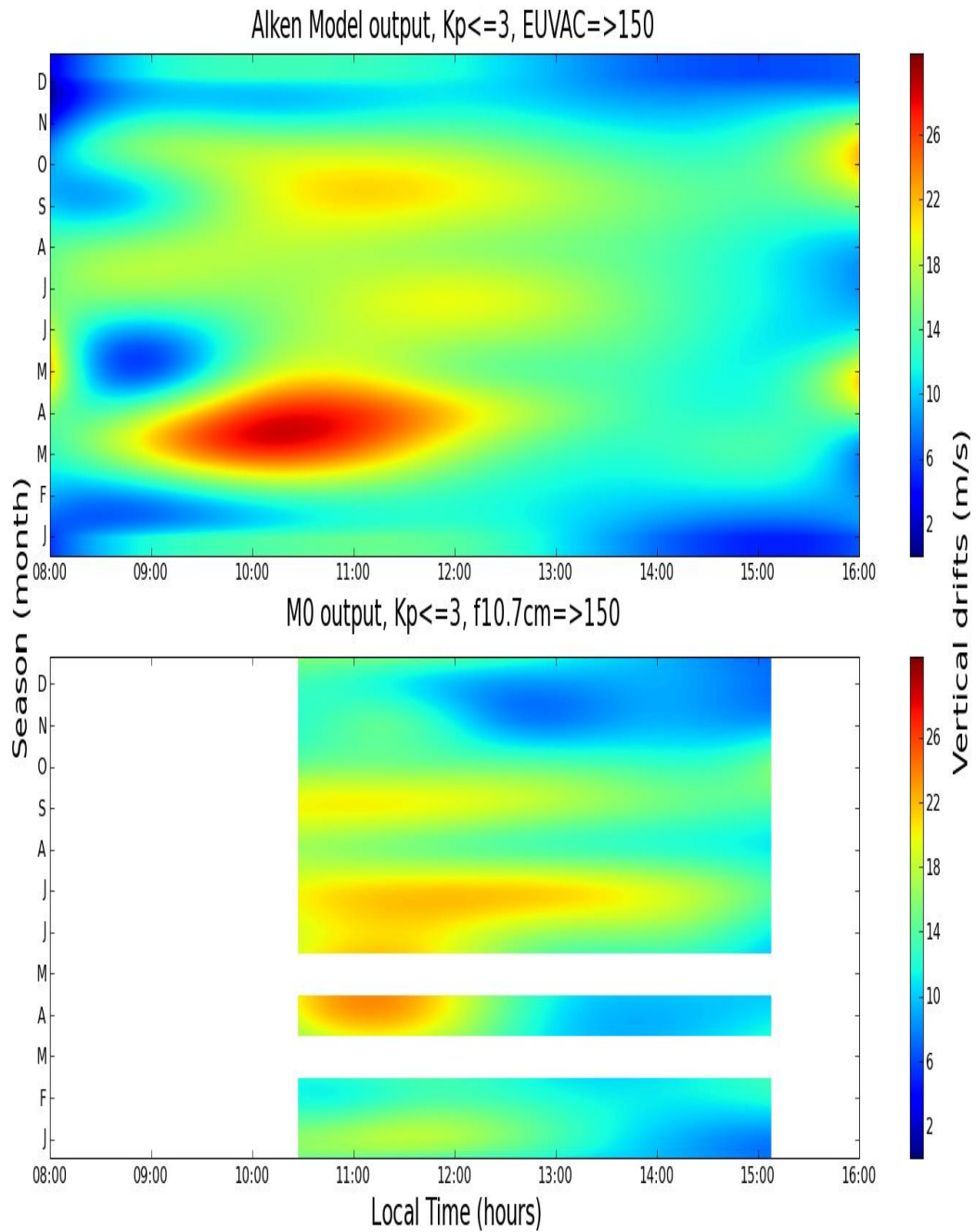


Figura 17 (abajo) variaciones de las derivas verticales en función del tiempo local y estacional para M0 ($K_p \leq 3$, $f_{10.7cm} \geq 150$), (arriba) resultados para el modelo de Alken ($K_p \leq 3$, EUVAC ≥ 150)

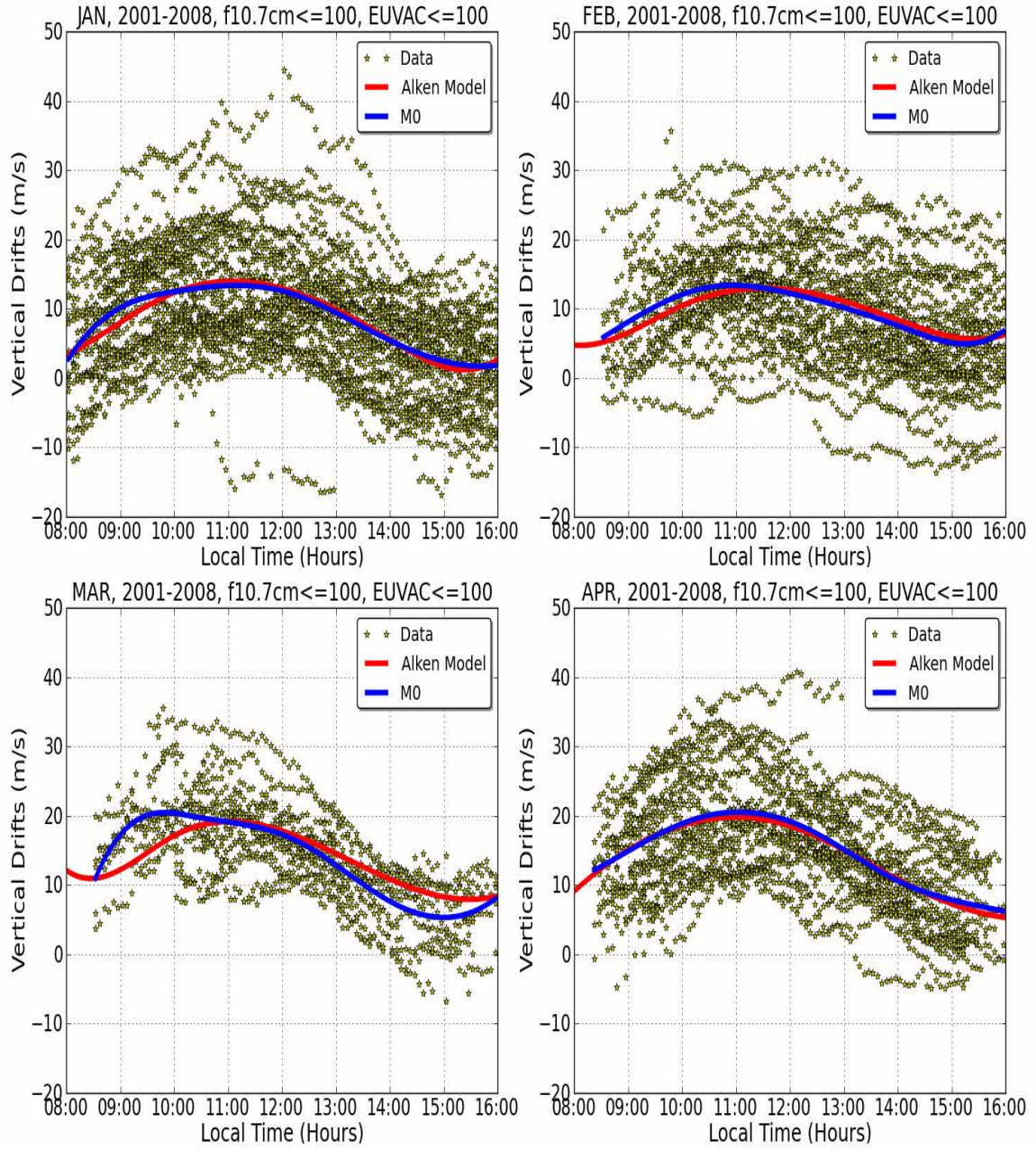


Figura 18 (verde) series de tiempo para las derivas verticales de JULIA ($K_p \leq 3$) para flujo solar bajos ($f_{10.7\text{cm}} \leq 100$), (rojo) promedios mensuales de estimaciones del modelo de Alken para flujo solar bajo ($\text{EUVAC} \leq 100$) y (azul) el modelo desarrollado. Para enero - abril.

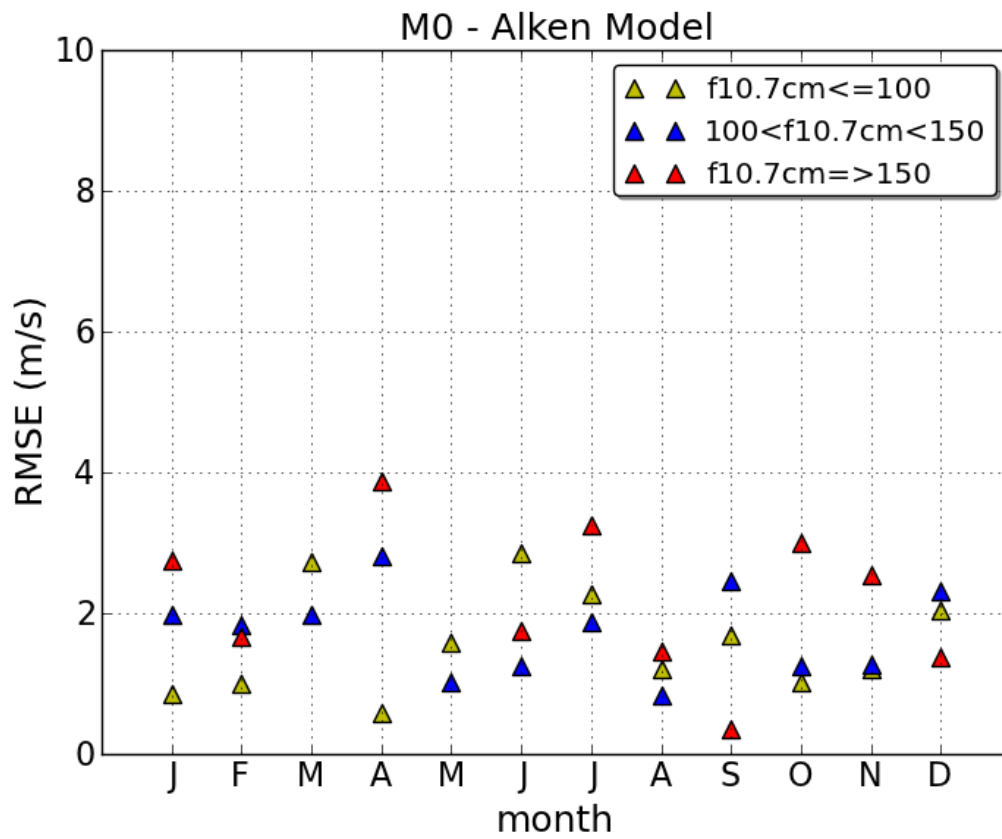


Figura 19 diferencias mensuales de la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) entre M0 y el modelo de Alken para los datos de 2001-2008 ($K_p \leq 3$) en tres diferentes intervalos de flujo solar ($f_{10.7\text{cm}} \leq 100$, $100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$ y $f_{10.7\text{cm}} \geq 150$).

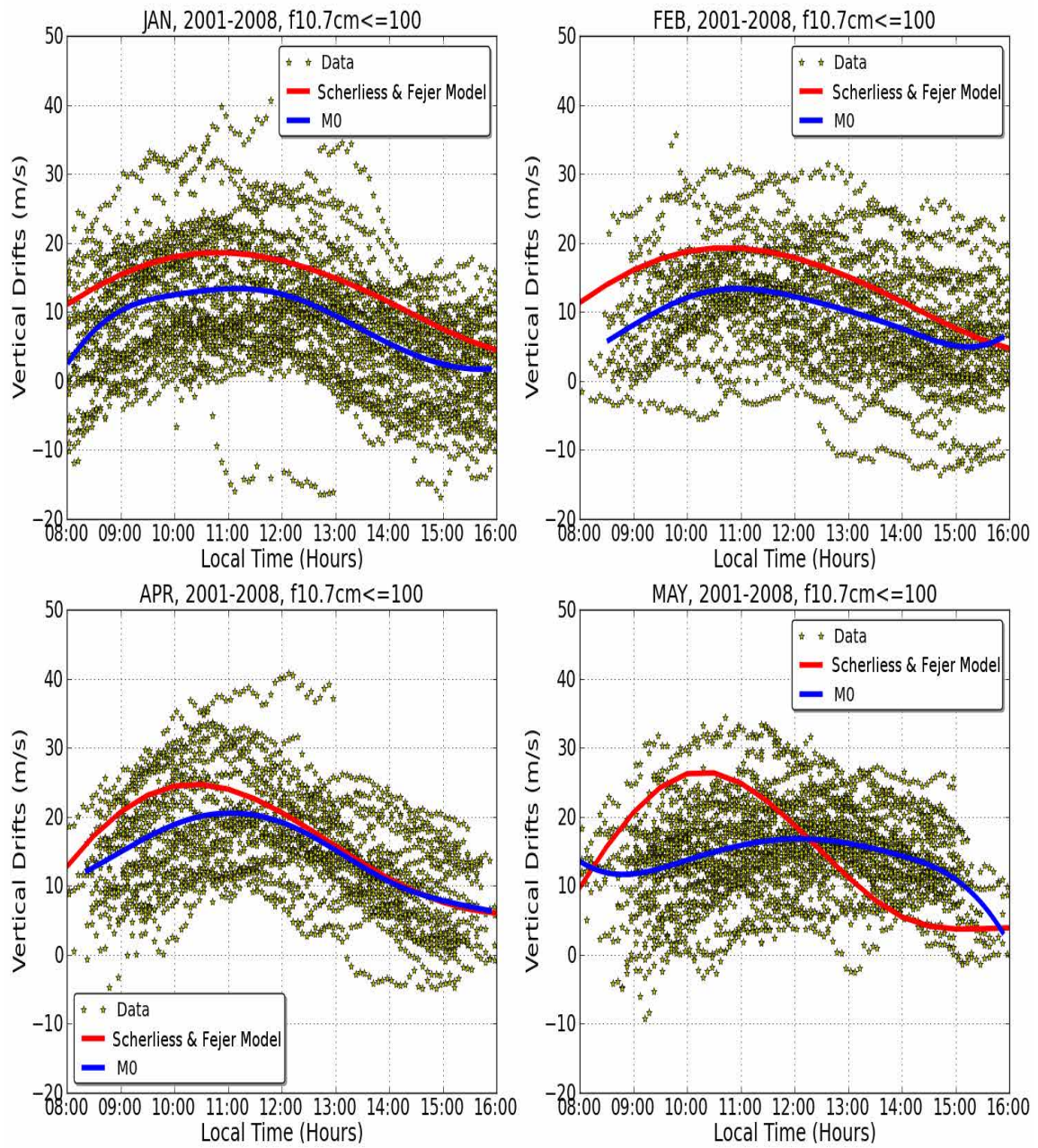


Figura 20 (verde) series de tiempo para derivas verticales de JULIA ($k_p \leq 3$) para tres intervalos de flujo solar ($f_{10.7cm} \leq 100$, $100 < f_{10.7cm} < 150$ y $f_{10.7cm} \geq 150$), (rojo) promedios mensuales de las estimaciones del modelo de Scherliess and Fejer y (azul) el modelo desarrollado. Para enero-abril.

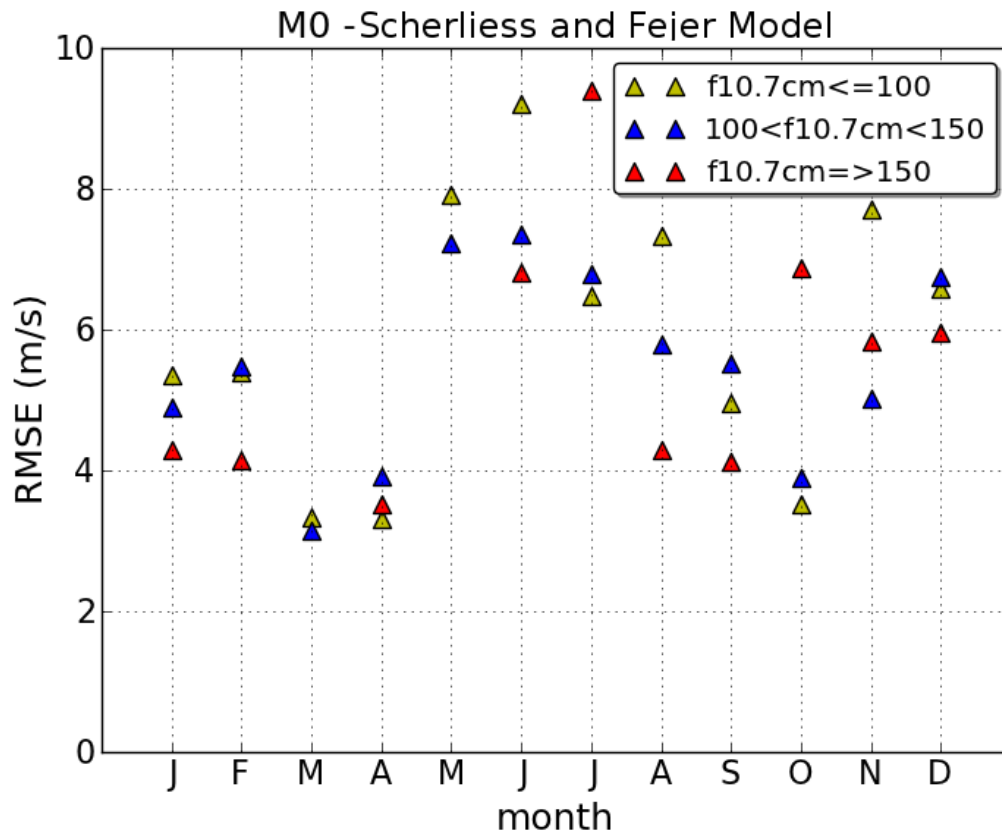


Figura 21 diferencias mensuales de la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) entre el modelo desarrollado y el modelo de Scherliess and Fejer ($kp \leq 3$) en tres diferentes intervalos de flujo solar ($f10.7 \leq 100$, $100 < f10.7cm < 150$ y $f10.7cm \geq 150$).

Tabla 4. Diferentes intervalos de flujo solar ($f_{10.7\text{cm}}$) a ser estudiados en los diferentes modelos desarrollados.

MODELOS	INTERVALOS DE FLUJOS SOLAR		
	$f_{10.7\text{cm}} \leq 100$	$100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$	$f_{10.7\text{cm}} \geq 150$
M2 entre M3			
M2 entre M1			
M3 entre M1			
M3 entre M1			

Capítulo 4

Estudio de la variabilidad de las derivas en diferentes condiciones de actividad solar

En este capítulo se estudia la variabilidad de las derivas verticales para diferentes condiciones de actividad solar. Para esto se utilizará los diferentes modelos descritos en el capítulo 2. La Tabla 4 muestra los diferentes modelos en los tres intervalos de flujo solar. En este capítulo se hace uso de la clasificación de los valores de las derivas como en la tabla1.

4.1 Comparación entre condiciones altas y bajas de actividad solar

Para este estudio se consideró los modelos M1 (para condiciones de flujo, $f_{10.7} > 150$) y M3. Haciendo uso de las figuras 23 y 28.

Las principales diferencias entre los modelos M1 y M3 para estas condiciones de flujo solar, es la diferencia del número de sectores que concentran un numero de valores de las derivas altos (18-21m/s). Mientras que para M3 se observan tres sectores marcados. Para M1 solo se observa un sector. En la siguiente parte se describen estas diferencias con detalle por mes.

Enero:

Las derivas verticales descritas por M1 aparecen a partir de las 10 (hora local) con valores de derivas mayores en aproximadamente en 5m/s con respecto a M3. M1 posee valores de derivas máximos de aproximadamente 17 m/s alrededor de las 11 horas.

Mientras que M3 posea valores entre las 8 a 16 (local time), con valores máximos de 12 m/s alrededor de las 11 horas.

Febrero:

Los valores de las derivas verticales en M3 son mayores hasta las 13 horas, luego los valores de derivas en M1 supera a los de M3 hasta en 10 m/s. M3 presenta valores de derivas máximos de aprox. 15 m/s alrededor de las 11 horas. M1 presenta dos picos de 13 m/s alrededor de las 12 y las 16 horas.

Marzo:

Solo se obtuvieron resultados para M3. Con valores máximos de aprox. 20 m/s, también se presentan alrededor del las 11 horas.

Abril:

M3 presenta un pico de 18-19 m/s alrededor de las 11 horas. Mientras que en M1, presenta un máximo de 22-23 m/s alrededor de las 11 horas y un mínimo de 10 m/s alrededor de las 13:30 horas.

M1 presenta valores de derivas mayores en 2-3 m/s que los valores de derivas en M3, entre las 10 a 12 horas y a partir de las 14:20. Mientras que los valores de derivas en M3 son mayores entre las 12:30 y 14 horas.

Mayo:

Solo se observan valores de derivas en M3. Valores pico de 17-18 m/s alrededor de las 12 horas.

Junio:

M1 presenta valores pico de 20-21 m/s alrededor d las 11 horas. M3 también presenta valores pico de 18-19 m/s alrededor de las 12 horas.

Los valores de derivas en M1 superan en aprox. 1 m/s a los valores de las derivas en M3.

Julio:

Los valores de las derivas en M1 son mayores que las derivas en M3 entre 2-10 m/s.

M1 presenta valores máximos de 22-23 m/s alrededor de las 13 horas. M3 presenta valores máximos de 16-17 m/s alrededor de las 10 horas.

Agosto:

M3 presenta valores de derivas mayores que los valores de derivas mostrados en M1 en aprox. 5 m/s entre las 10 a 15 horas.

M3 presenta un pico de 20 m/s en los valores de las derivas alrededor de las 12 horas. Mientras que M1 presenta un valor de deriva de 17-18 m/s a las 10 horas, decayendo hasta 10 m/s alrededor de las 16 horas.

Septiembre:

M3 presenta valores pico de las derivas de aprox. 20 m/s alrededor de las 11 horas. Igualmente para M1 presenta picos de 20 m/s alrededor de las 11 horas.

M1 presenta valores de derivas mayores en 1 m/s.

Octubre:

M3 presenta valores de derivas pico de 20 m/s alrededor de las 11 horas. Mientras que M1 presenta picos de 15 m/s alrededor de las 11 horas.

Los valores de las derivas en M3 son mayores que las que se presenta M1 en 5 m/s, entre las 9 y las 13 horas. A partir de las 13 horas los valores de las derivas en M1 son mayores a las de M3 en 5 m/s.

Noviembre:

Se aprecian valores de derivas pico de 15 m/s en M1 alrededor de las 11 horas. Mientras que para M3 se aprecian picos de 11-12 m/s alrededor de las 10 horas.

Los valores de las derivas mostrados en M1 son mayores que las de M3 en 1-3 m/s.

Diciembre:

M3 presenta valores pico de las derivas de 11 m/s alrededor de las 11 horas. Mientras que los valores de M1 presentan un valor pico aproximado de 12 m/s, alrededor de las 10 horas.

Los valores de las derivas presentados en M1 son mayores que los valores de M3, entre las 9 a 11 horas y a partir de las 13 horas. Solamente en un pequeño lapso de tiempo los valores de M3 son mayores que las de M1, entre las 11:30 y las 13 horas.

4.2 Comparación entre condiciones medias y bajas de actividad solar

Para este estudio se consideró los modelos M1 (para condiciones de flujo solar: $100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$) y M3. Haciendo uso de las Figuras 22 y 29.

La principal diferencia entre estos modelos es la disminución del número de derivas con valores altos (18-21 m/s) en M3. Así, también una disminución de la concentración del número de derivas con valores bajos (1-5 m/s) en M3. (Véase la Figura 29)

Enero:

En M1 los valores de las derivas se muestran a partir de las 9 horas hasta las 16 horas. Para M3 los valores de los derivas se muestran de 8 a 16 horas.

M1 presenta valores pico de aprox. 20 m/s alrededor de las 10 horas y un valor mínimo aprox. 5 m/s alrededor de las 15 horas. Mientras M3 presenta un valor pico aprox. de 15 m/s alrededor de las 11 horas y un valor mínimo aprox. de 0-1 m/s alrededor de las 15:30 horas.

De 9 a 12 horas M1 presenta valores mayores a los valores de M3. Igualmente a partir de las 14:30 horas hasta las 16 horas. No obstante en el intervalo de 12 a 14:30 horas M3 presenta mayores valores de derivas que en M1.

M1 presenta un valor pico aprox. de 20 m/s alrededor de las 10 horas. Y un valor mínimo aproximado de 3-4 m/s alrededor de las 14:30 horas.

Febrero:

M3 presenta valores pico aproximadamente de 16 - 17 m/s alrededor de las 11 horas. Mientras que en M1 presenta valores pico de 15-16 m/s alrededor de las 13:30 horas y

valores de 17-18 m/s aproximadamente alrededor de las 16 horas.

De las 9 hasta las 12:30 horas M3 presenta valores de las derivas mayores a las del M1. M1 presenta valores de las derivas mayores que las del M3 a partir de las 12:30 horas.

Marzo:

M3 presenta valores de las derivas pico de 18-19 m/s alrededor de las 11 horas. Mientras que M1 presenta valores pico de 20 m/s también alrededor de las 11 horas.

M1 presenta valores de las derivas mayores que en M3, entre las 9 y las 11 horas. Entre las 11:30 y las 14 horas, M3 presenta valores de las derivas mayores que en M1. Alrededor de las 15 horas, los valores de las derivas de M1 son mayores que los valores del M3. Después de las 15 horas los valores de las derivas en M3 son mayores que los valores en M1.

Abril:

M1 presenta picos en los valores de las derivas alrededor de las 11 horas con valores aproximados de 25 m/s. M3 presenta picos también alrededor de las 11 horas con valores aproximados de 18-19 m/s.

Los valores de las derivas en M1 son mayores que los valores en M3 desde las 9 hasta las 16 horas.

Mayo:

M1 presenta valores pico de 20-21 m/s alrededor de las 12 horas. Mientras que M3 presenta valores pico de 18- 19 m/s alrededor de las 12 horas.

Entre las 10 y las 15 horas M1 presenta valores de derivas mayores que los valores en M3.

Junio:

M1 presenta valores pico de 20 m/s alrededor de las 12 horas. M3 también presenta valores pico de 20 m/s alrededor de las 12 horas.

Entre las 9 y las 11 horas, M3 presenta valores de derivas mayores que las de M1. Pero entre las 14:30 y las 16 horas, M1 presenta valores mayores que M3.

Julio:

M3 presenta valores pico de derivas de 18-19 m/s alrededor de las 10 horas. M1 presenta valores pico de 18-19 m/s alrededor de las 12 horas. Entre las 9 y las 11 horas, el valor de las derivas en M3 son mayores que los valores de M1. De 11 a 13:30 horas, M1 presenta valores mayores que los valores de M3. Después de las 13:30 horas, M3 presenta valores mayores que los valores de M1.

Agosto:

M3 presenta valores pico de 20 m/s alrededor de las 13 horas. M1 presenta valores pico de 17-18 m/s alrededor de las 11 horas. Los valores de las derivas dados en M3 son mayores en 1-5 m/s.

Septiembre:

M1 presenta valores pico de 21-22 m/s alrededor de las 11 horas. M3 presenta valores pico de 20 m/s alrededor de las 11:30 horas. Los valores de M1 son mayores que los valores de M3.

Octubre:

M1 presenta valores pico de 21-22 m/s alrededor de las 11 horas. El M3 presenta valores pico de 20 m/s alrededor de las 11 horas.

Los valores de derivas en M1 son mayores que los valores de M3.

Noviembre:

M1 presenta valores pico de 28-29 m/s alrededor de las 9:30 horas. M3 presenta valores pico de 22-23 m/s alrededor de las 10 horas.

Los valores de las derivas en M1 son mayores que los valores en M3.

Diciembre:

M1 presenta valores pico de 13-14 m/s alrededor de las 11 horas. M3 presenta valores pico de 11-12 m/s alrededor de las 12 horas.

Entre las 9 y las 11:30 horas, M1 presenta valores mayores que en M3. También a partir de las 15 horas. Pero entre las 12 y 15 horas, los valores en M3 son mayores que en M1.

4.3 Comparación entre condiciones medias de actividad solar

Para este estudio se consideraron los modelos M1 (para condiciones de flujo solar, $100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$) y M2 ($100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$). Para este análisis se usaron las figuras 24 y 27.

La principal diferencia entre estos modelos es un aparente desplazamiento estacional y una reducción temporal es estos. En las siguientes secciones se describen estas diferencias con más detalle.

Enero:

M1 presenta valores pico de 20 m/s alrededor de las 10 horas. M2 presenta valores pico de 14 m/s alrededor de las 12 horas.

De 9 a 12 horas los valores de las derivas en M1 son mayores a los valores en M2.

De 12 a 16 horas, los valores de las derivas en M2 son mayores que los valores en M1.

Febrero:

M1 presenta valores pico en las derivas de 16 m/s alrededor de las 14 horas. M2 presenta valores pico de 15 m/s alrededor de las 12 horas.

Entre las 9:30 y 12:30 horas, M2 presenta valores de derivas mayores que en M1.

Entre las 12:30 y las 16 horas, M1 presenta valores de derivas mayores que en M2.

Marzo:

M1 presenta picos de 20 m/s alrededor de las 11 horas. M2 presenta picos de 21-22 m/s alrededor de las 11 horas.

Los valores de las derivas en M2 son mayores al los valores que en M1 hasta las 15 horas.

Abril:

M1 presenta valores pico de 24-25 m/s alrededor de las 11:30 horas. M2 presenta valores pico de 21-22 m/s alrededor de las 11 horas.

Los valores de las derivas en M1 son mayores a las derivas en M2 a partir de las 10:15 horas. Entre las 9 y las 10 horas, los valores en M2 son mayores a los valores que en M1.

Mayo:

M1 presenta valores pico de 20 m/s alrededor de las 12 horas. M2 presenta valores pico de 15 m/s alrededor de las 11 horas.

A partir de las 10 horas, los valores de las derivas en M1 son mayores que los valores de M2.

Junio:

Solo se observan valores de derivas en M2, con picos de 20 m/s alrededor de las 12 horas.

Julio:

M1 presenta valores pico de 17-18 m/s alrededor de las 12 horas. M2 presenta valores pico de 13-14 m/s alrededor de las 12 horas.

M1 presenta valores de las derivas mayores que en M2.

Agosto:

M1 presenta valores pico de 17-18 m/s alrededor de las 11 horas. M2 presenta valores pico de 21-22 m/s alrededor de las 11 horas.

Los valores del M2 son mayores que los valores del M1.

Septiembre:

Solo se presentan valores de las derivas en M1, con valores pico de 21-22 m/s alrededor de las 11 horas.

Octubre:

M1 presenta valores pico de 22-23 m/s alrededor de las 11 horas. M2 presenta valores pico de 18-19 m/s alrededor de las 10 horas.

Entre las 9:30 y las 16 horas, los valores de las derivas en M1 son mayores a los valores de las derivas en M2.

Entre las 8 y las 9:30 horas, los valores en M2 son mayores a los valores de las derivas en M1.

Noviembre:

M1 presenta valores pico de 18-19 m/s alrededor de las 9:30 horas, también valores pico de 15-16 m/s alrededor de las 12:30 horas.

M2 presenta valores pico de 10 m/s alrededor de las 10 horas.

Diciembre:

M1 presenta valores pico de 18-19 m/s alrededor de las 10 horas.

M2 presenta valores pico de 13-14 m/s alrededor de las 10:30 horas.

Entre las 9 y las 15 horas, M2 presenta valores de las derivas mayores que los valores en M1.

Después de las 15 horas, M1 presenta valores de las derivas mayores que en M2.

4.4 Comparación entre condiciones bajas de actividad solar

Para este estudio se consideró los modelos M2 (para condiciones de flujo solar, $f_{10.7\text{cm}} \leq 100$) y M3 ($f_{10.7\text{cm}} \leq 100$). Para esto se usó la figura 25.

Las principales diferencias entre estos modelos es el desplazamiento de los valores altos de las derivas inicialmente entre mayo y marzo en M2 hacia el mes de octubre en M3.

Enero:

M2 presenta valores pico de las derivas de 26-27 m/s alrededor de las 11 horas.

M3 presenta valores pico de 23-24 m/s alrededor de las 11 horas.

Los valores de las derivas en M2 son mayores a los valores en M3.

Febrero:

M2 presenta valores pico de las derivas de 12-13 m/s alrededor de las 12 horas.

M2 presenta valores pico de 16-17 m/s alrededor de las 11 horas.

Entre las 9 y las 14 horas, los valores de las derivas en M3 son mayores a los valores en M2.

Marzo:

M2 presenta valores pico de 19 m/s alrededor de las 11 horas.

M3 presenta valores pico de 19 m/s alrededor de las 12 horas.

Entre las 9 y las 10:30 horas, los valores de las derivas en M2 son mayores a los valores de las derivas en M3.

Después de las 10:30 horas, los valores de las derivas en M3 son mayores que las deriva en M2.

Abril:

M2 presenta valores pico de 25 m/s alrededor de las 11 horas.

M3 presenta valores pico de 18 m/s alrededor de las 11 horas.

Entre las 9 y las 14 horas, los valores de derivas en M2 son mayores que en M3.

Mayo:

M2 presenta valores pico de 20 m/s alrededor de las 11:30 horas.

M3 presenta valores pico de 16-17 m/s alrededor de las 12 horas.

Entre las 8:45 y las 14:15 horas, los valores de las derivas en M2 son mayores que los valores en M3. Después de las 14:15 horas, los valores de las derivas en M3 son mayores que los valores en M2.

Junio:

M2 presenta valores pico de 15 m/s alrededor de las 14 horas.

M3 presenta valores pico de 19 m/s alrededor de las 11 horas.

Entre las 9 y las 14 horas, M3 presenta valores de las derivas mayores que en M2.

Julio:

Entre las 9 y las 15 horas, M2 y M3 presentan valores de las derivas similares. Los valores pico de 18 m/s se presentan alrededor de las 10 horas.

Agosto:

M3 presenta valores pico de 20 m/s alrededor de las 12 horas.

M2 presenta valores pico de 17 m/s alrededor de las 12 horas.

Entre las 8:30 y las 15 horas, M3 presenta valores de las derivas mayores que en M2.

Septiembre:

M2 presenta valores pico de 19 m/s alrededor de las 11:30 horas.

M3 presenta valores pico de 20 m/s alrededor de las 11:30 horas.

Los valores de las derivas en M3 son mayores que los valores en M2.

Octubre:

M2 presenta valores pico de las derivas de 20 m/s alrededor de las 11 horas.

M3 presenta valores pico de las derivas de 17-18 m/s alrededor de las 11 horas.

Entre las 8:20 y las 15 horas, M3 presenta valores de derivas mayores que en M2.

Noviembre:

M2 presenta valores pico de 21-22 m/s alrededor de las 10 horas.

M3 presenta valores pico de 20 m/s alrededor de las 11 horas.

Entre las 8 y las 11:30 horas, M3 presenta valores de derivas mayores que los valores en M2.

Entre las 12 y las 14:30 horas, M2 presenta valores de derivas mayores que en M3.

Diciembre:

M2 presenta valores pico de 21-22 m/s alrededor de las 11 horas.

M3 presenta valores pico de 22-23 m/s alrededor de las 11 horas.

Los valores de las derivas en M2 son mayores que los valores de las derivas en M3.

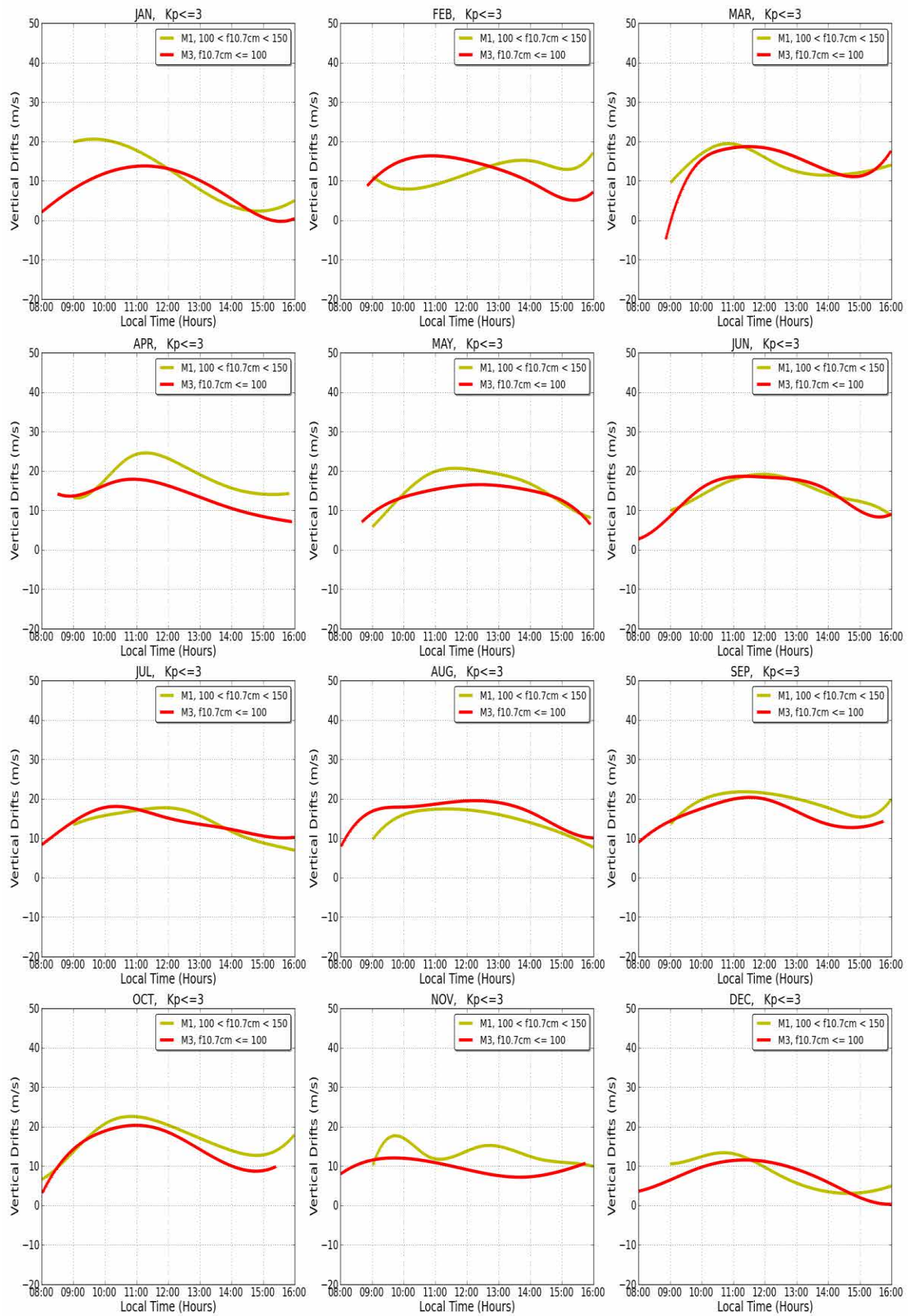


Figura 22 Comparación entre M1 (2001-2003, $K_p \leq 3$) y M3 (2007-2009, $K_p \leq 3$)

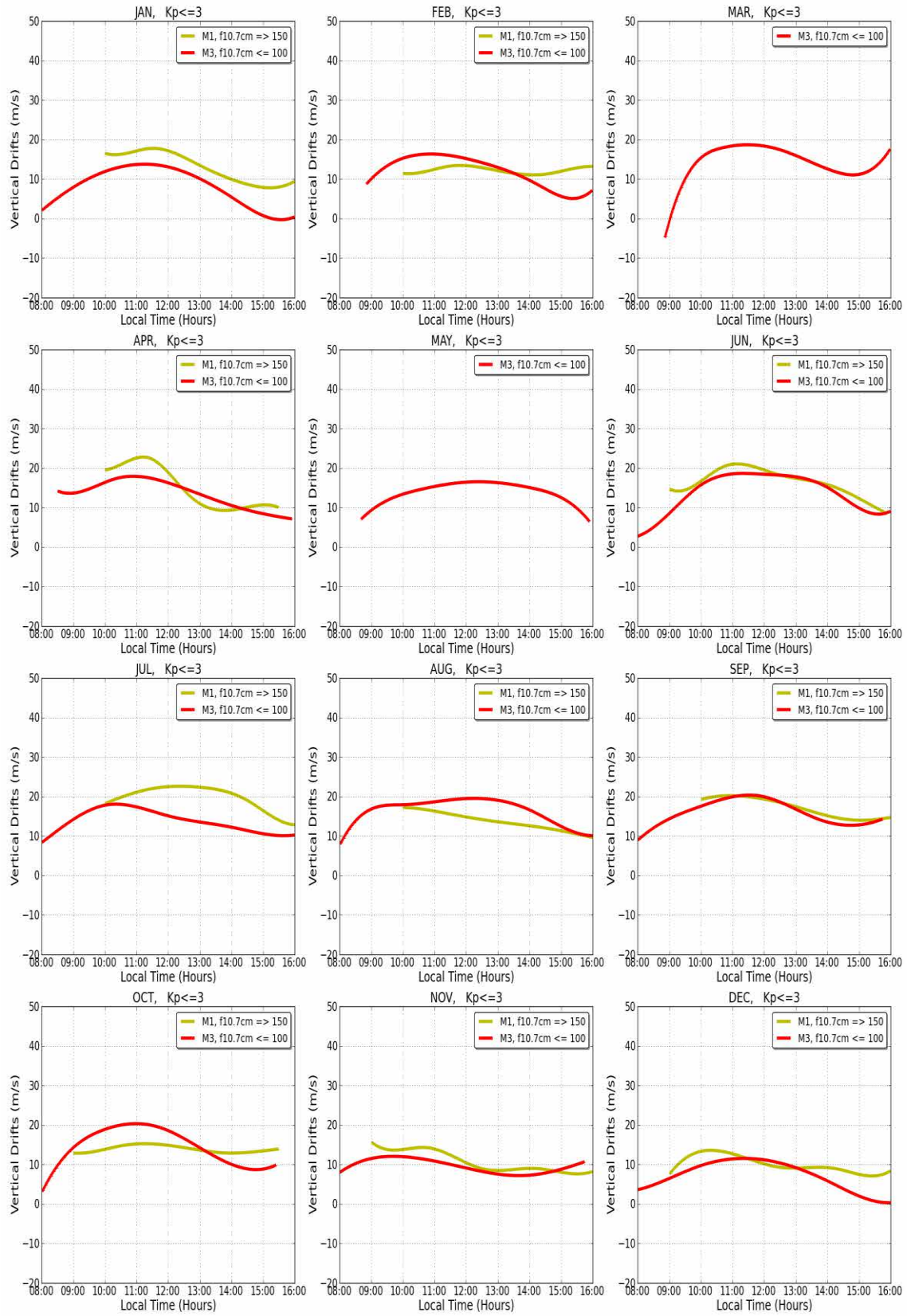


Figura 23 Comparación entre M1 (2001-2003, $K_p \leq 3$) y M3 (2007-2009, $K_p \leq 3$)

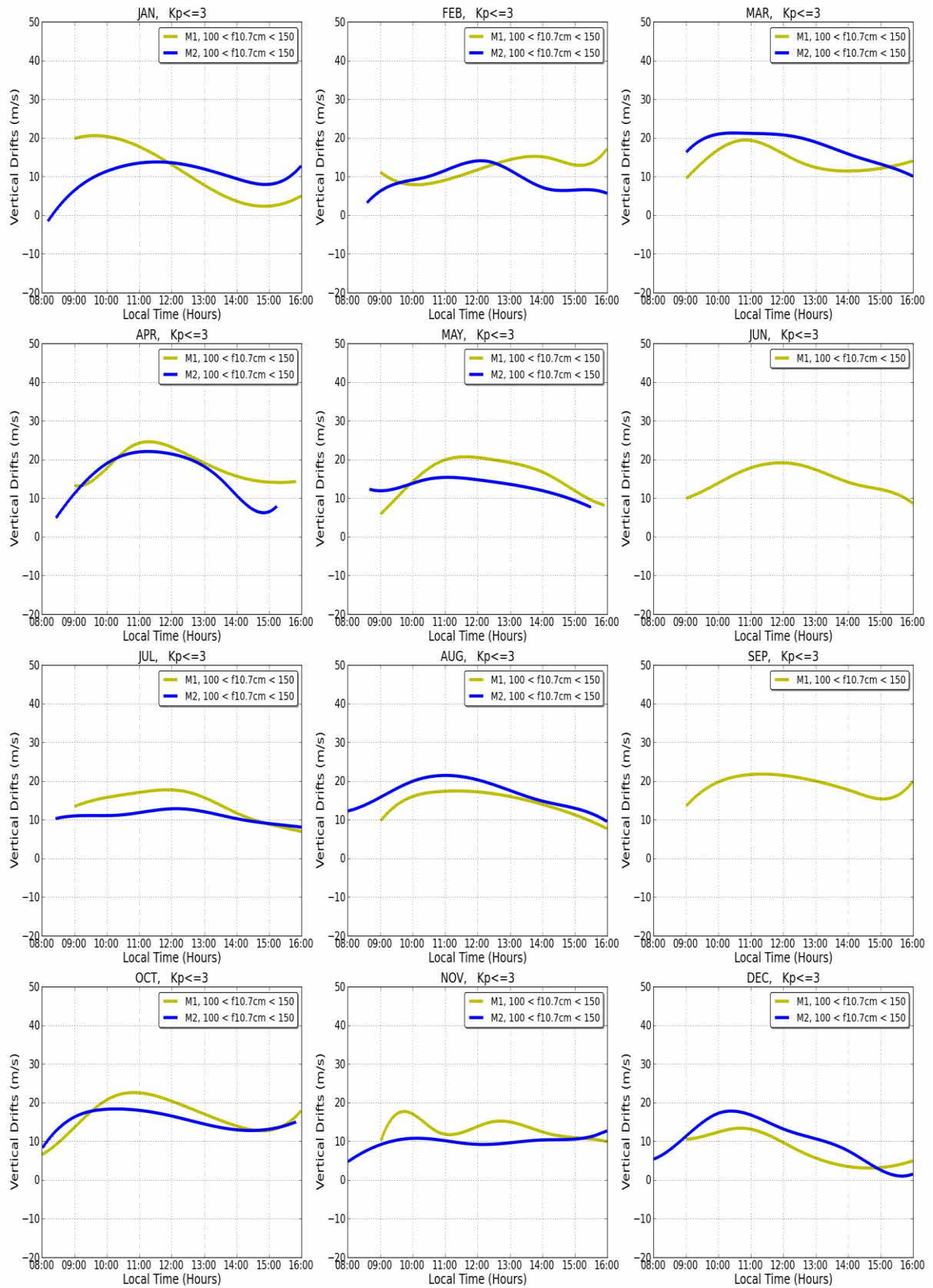


Figura 24 Comparación entre M1 (2001-2003) y M2 (2004-2006) para diferentes estaciones ($K_p \leq 3$)

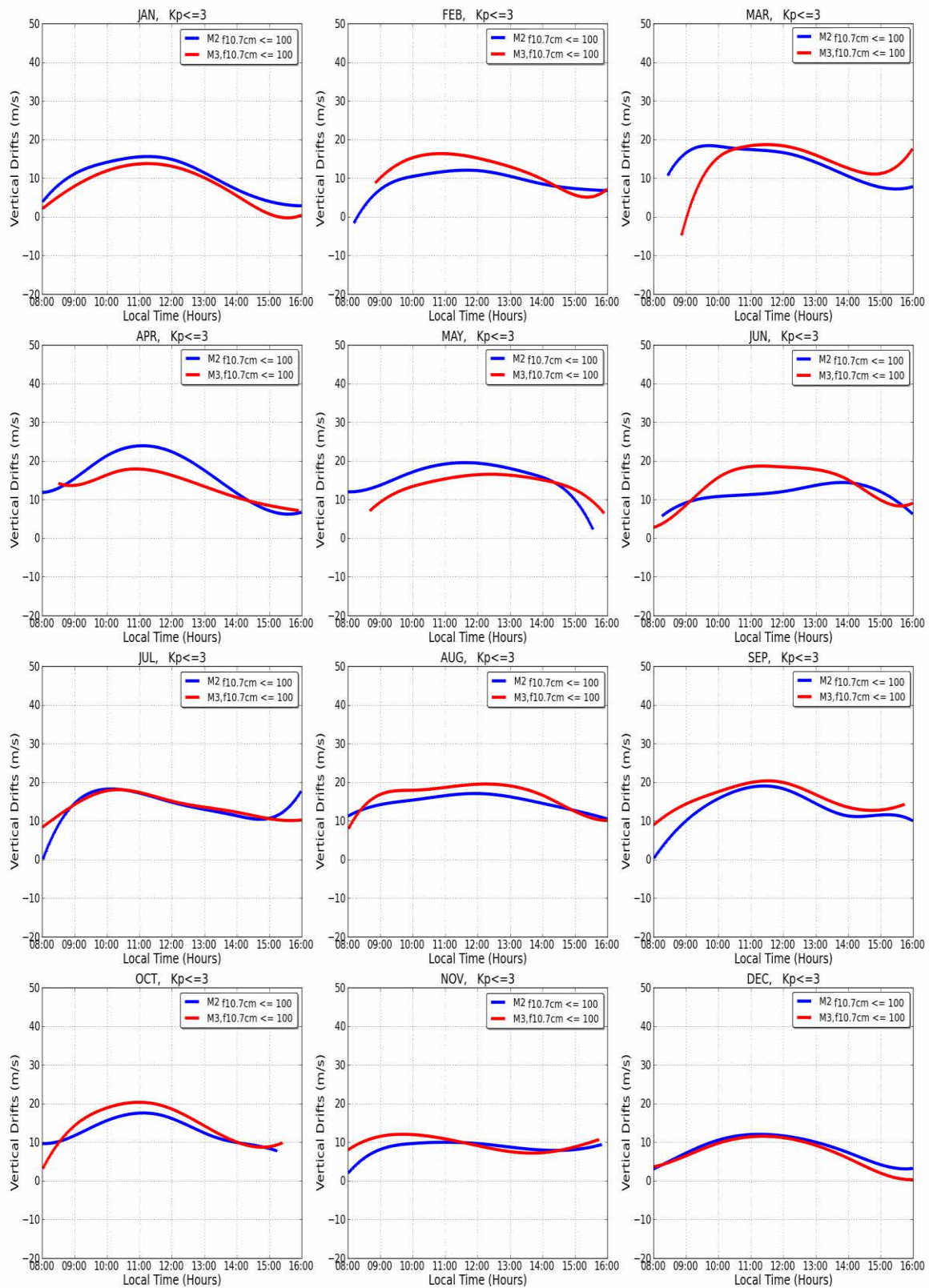


Figura 25 Comparación entre M2 (2004-2006) y Modelo 3 (2007-2009) para diferentes estaciones ($K_p \leq 3$)

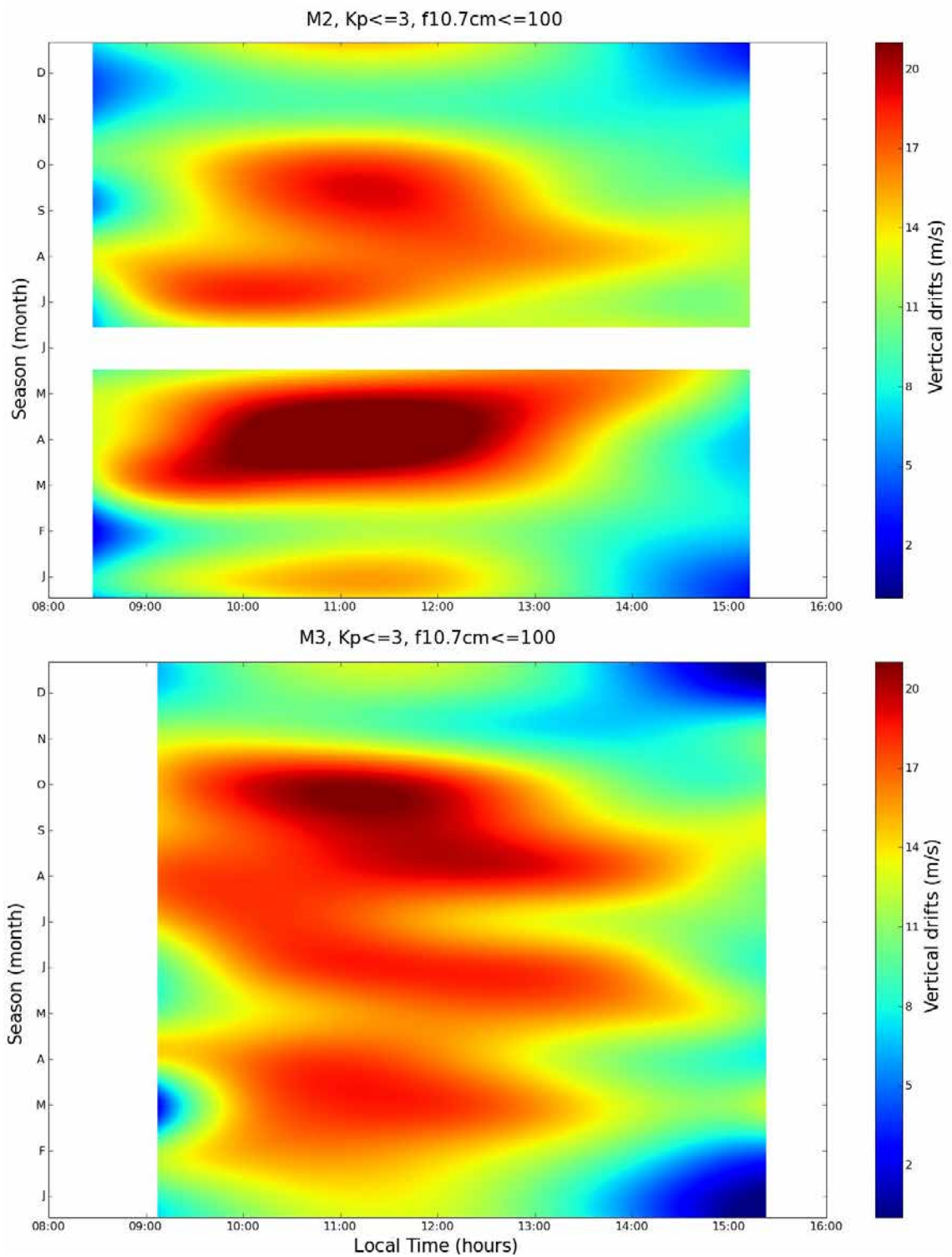


Figura 26 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y estación ($K_p \leq 3$, $f_{10.\text{cm}} \leq 100$). Para los modelos M2 (arriba) y M3 (abajo).

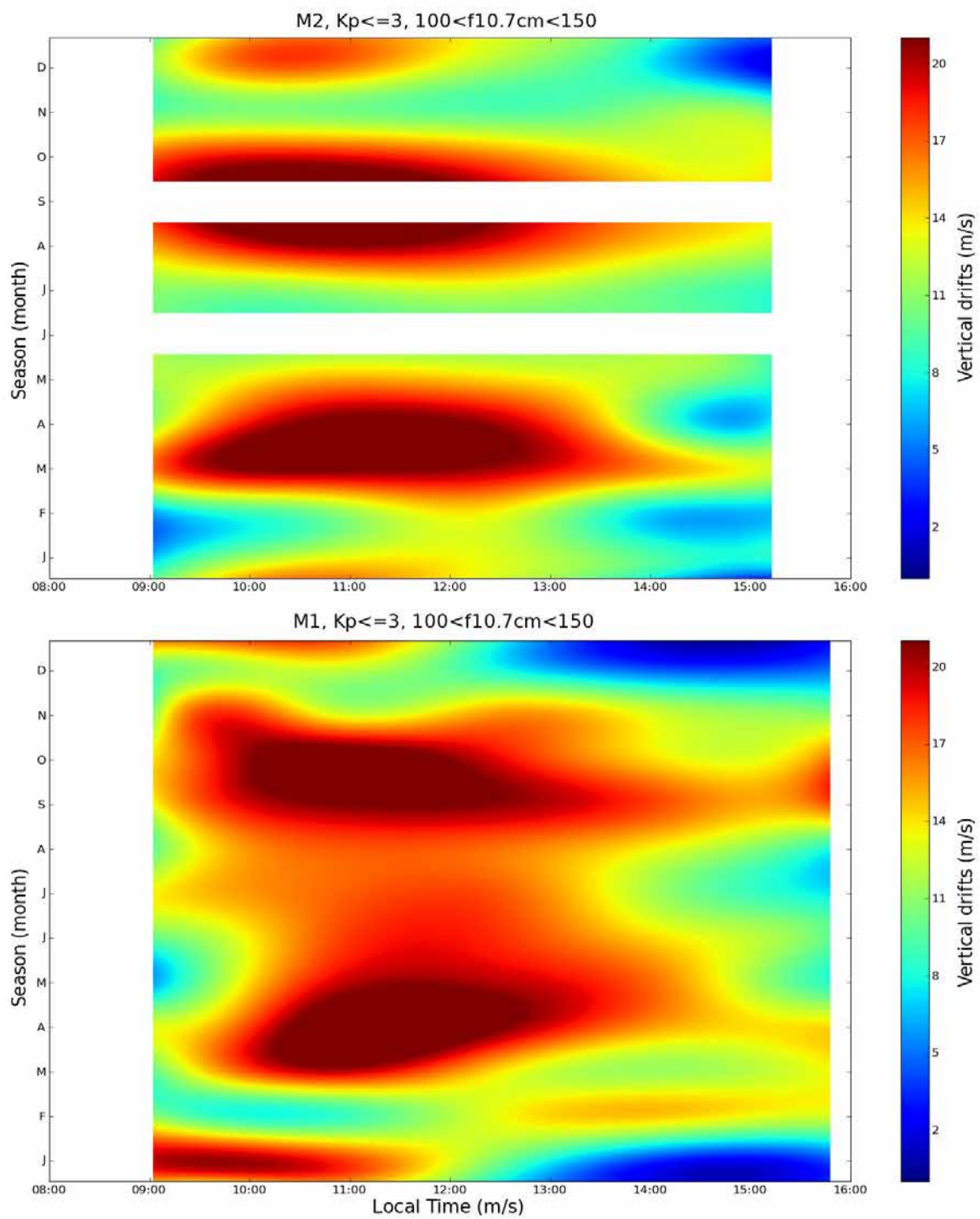


Figura 27 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y mensual para valores medios de flujo solar ($k_p \leq 3$, $100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$)

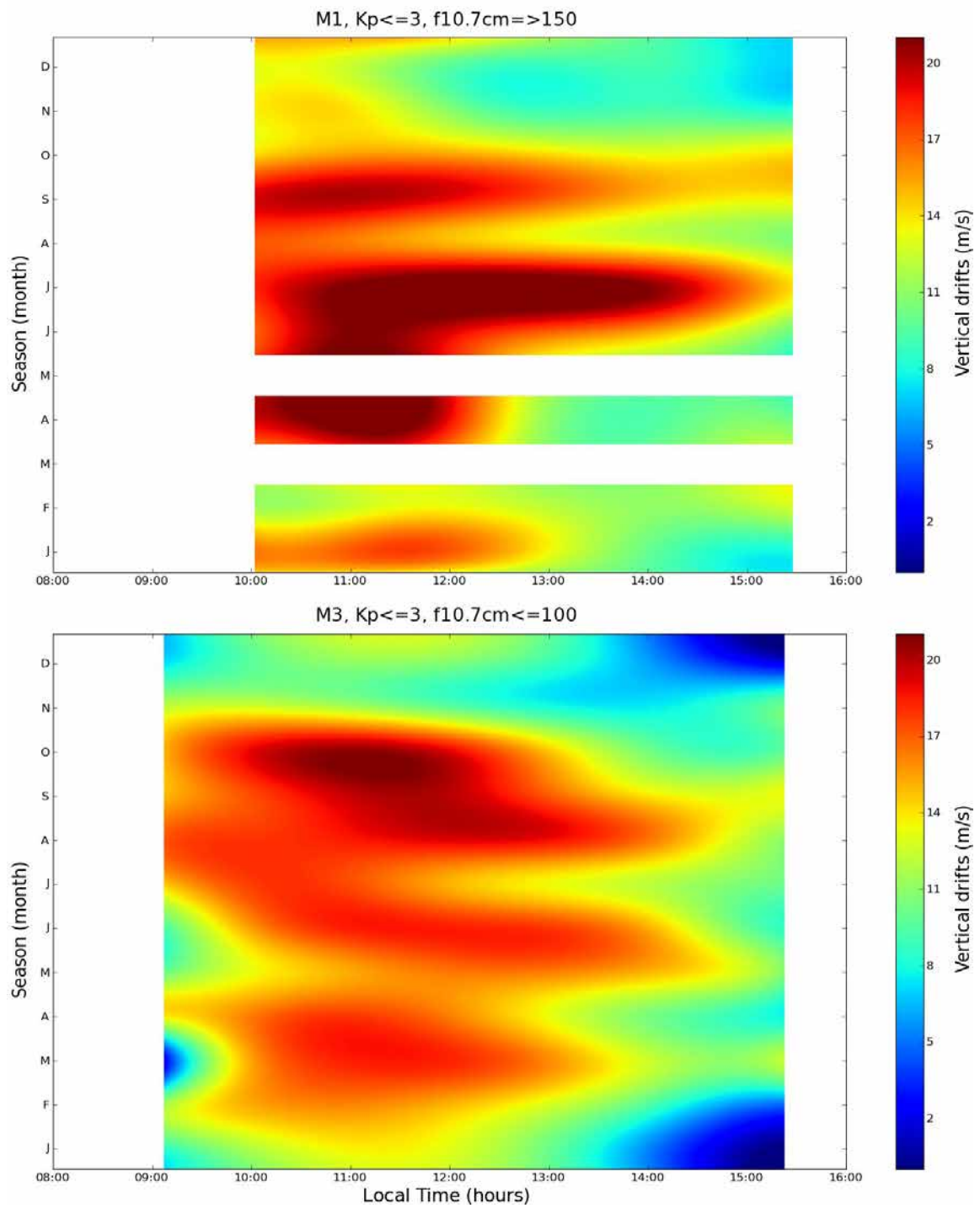


Figura 28 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y estación ($Kp \leq 3$). Para los modelos M1 (arriba) ($150 \leq f_{10.7cm}$) y M3 (abajo) ($f_{10.7cm} \leq 100$).

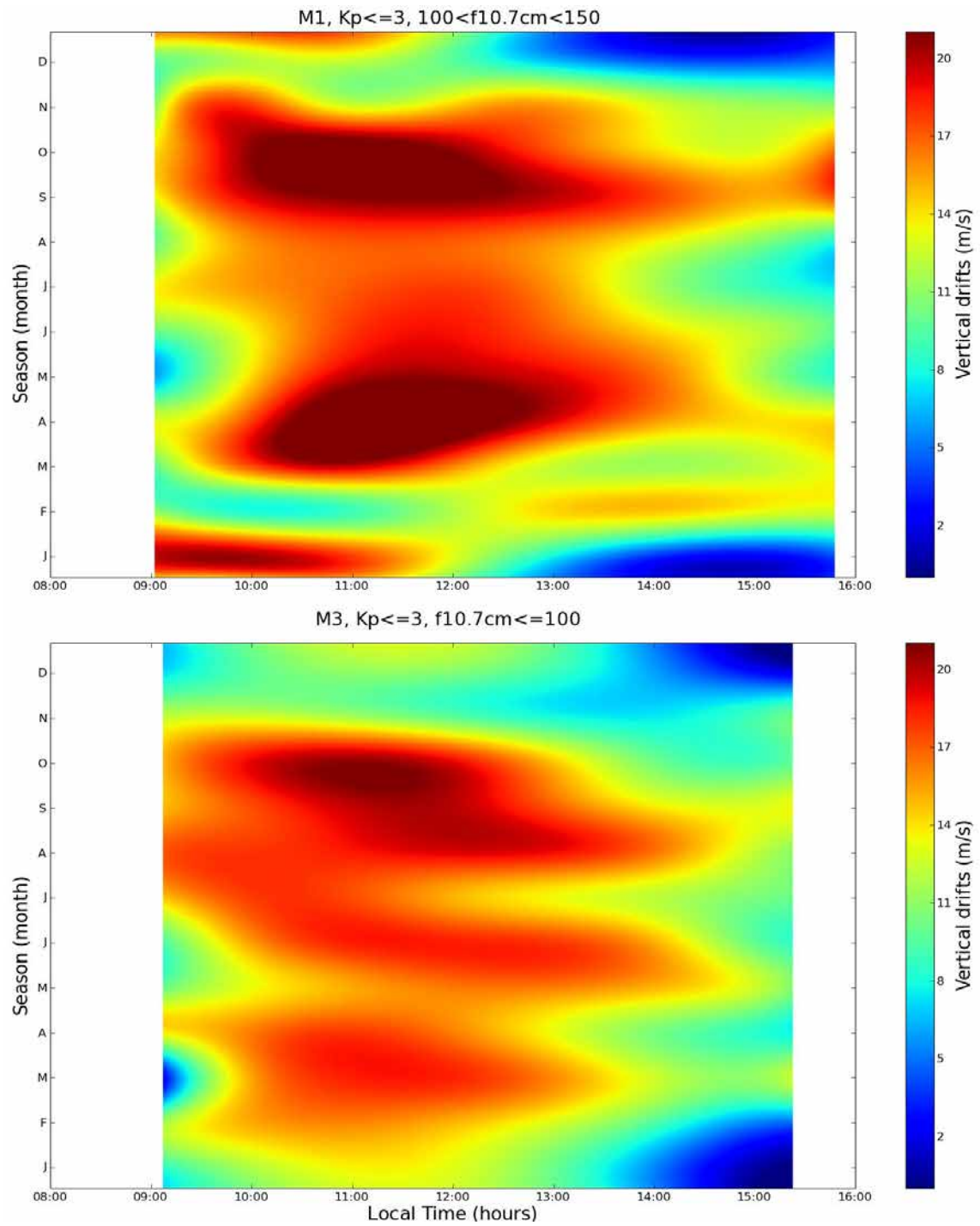


Figura 29 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y estación ($Kp \leq 3$). Para los modelos M1 (arriba) ($100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$) y M3 (abajo) ($f_{10.7\text{cm}} \leq 100$).

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo a futuro

En este capítulo final se presenta las conclusiones extraídas de este trabajo de tesis. Para una mayor claridad, las conclusiones se dividen en cuatro secciones. En primer lugar, se recogen las principales conclusiones derivados del análisis de las variaciones de las derivas verticales diurnas tanto temporales y estacionales para diferentes condiciones de flujo solar. En la segunda sección se mostraran las conclusiones del estudio individual y detallado de los modelos desarrollados. En la tercera sección se recogen las conclusiones derivados del desarrollo y comparación del modelo empírico desarrollado. Por último, se dedica un breve apartado a plantear futuras mejoras al modelo a partir de esta tesis.

5.1 Conclusiones

Este trabajo de tesis permite estudiar las derivas verticales diurnas observadas por el radar principal del Radio Observatorio de Jicamarca. Para realizar este estudio se desarrolló una serie de modelos empíricos de derivas verticales. Estos modelos están desarrollados en diferentes temporadas y clasificados para tres intervalos de flujo solar. (Véase la tabla 5). Los datos usados corresponden a la región de los 150 Km comprendidos desde 2001 hasta 2009. El principal objetivo es analizar las variaciones temporales y estacionales de las derivas verticales para diferentes condiciones de flujo solar. Como principal conclusión de este estudio, se obtiene lo siguiente:

En general las derivas verticales presentan valores pico (entre 14 m/s y 21 m/s) en cuatro temporadas del año: cerca de los equinoccios de marzo y septiembre y también cerca de los solsticios de junio y diciembre. En los años con condiciones solares mínimas y medias se observan valores pico de derivas en los solsticios (particularmente durante el solsticio de junio estos valores son comparables con los de los equinoccios), a diferencia de lo que afirman otros autores (e. g., Alken [2009], Scherliess and Fejer [1999]).

Tabla 5. Modelos desarrollados para tres intervalos de flujo solar. Comprendidos desde 2001 hasta 2009

Modelos	2001-2003	2004-2006	2007-2009
Modelo 0 (M0)			
Modelo 1 (M1)	$f10.7\text{cm} \geq 150$		
	$100 < f10.7\text{cm} < 150$		
Modelo 2 (M2)		$100 < f10.7\text{cm} < 150$	
		$f10.7\text{cm} \leq 100$	
Modelo 3 (M3)			$f10.7\text{cm} \leq 100$

5.2 Conclusiones Secundarias

Los modelos empíricos desarrollados se enfocaron en el período correspondiente al ciclo solar número 23-24 (desde 2001 hasta 2009). Las principales características de estos modelos se observan en la tabla 5. Un estudio individual de estos modelos permite un análisis más detallado para temporadas de tres años. Lo que permite concluir:

- Durante el mínimo solar correspondiente al ciclo solar número 23 (desde 2007 hasta 2009), disminuyen los valores pico de las derivas entre diciembre y enero.
- Para condiciones mínimas de flujo solar ($f_{10.7\text{cm}} \leq 100$), comprendido desde 2004 hasta 2006, (véase el modelo M2 en la tabla 1) las derivas presentan valores bajos (1-4 m/s) solamente entre diciembre y febrero después de las 14:00.
- Para condiciones solares medias ($100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$), comprendido desde 2001 hasta 2006 (véase los modelos M1 y M2 en la tabla 1), los valores pico de las derivas tienen una duración temporal mayor en comparación con los demás modelos.
- Durante el solar máximo ($f_{10.7\text{cm}} \geq 150$), comprendido desde 2001 hasta 2003 (véase el modelo M1 en la tabla 1), se muestra que los valores pico de las derivas se presentan por mas horas durante el día (de 10:00 hasta las 15:30).

5.3 Conclusiones del Desarrollo y Comparación

El desarrollo consistió en modelar aproximadamente el comportamiento de las derivas verticales mediante una función matemática. Estas funciones deben cumplir ciertos criterios de continuidad para ganar suavidad. El desarrollo y uso de este método permite concluir lo siguiente:

- El método de interpolación basado en polinomios cúbicos por tramos se ajusta muy bien al comportamiento de las derivas verticales, tanto desde el punto de vista estadístico como visual (para más detalles revise el Capítulo 2).

Finalmente, para la comparación del modelo desarrollado se hicieron estudios comparativos entre el modelo comprendido desde 2001 hasta 2009 (Véase el modelo M0 en la tabla 5) y los modelos empíricos de Alken [2009] y Scherliess and Fejer [1999]. Como resultado de estos estudios se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El modelo se comparó con el modelo de Alken [2009] mostrando que se encuentra en un grado muy bueno de concordancia (error cuadrático medio ~ 1.8 m/s equivale al 14.34% respecto del promedio del modelo M0).
- Se presenta un ligero desplazamiento mensual respecto al modelo de Alken [2009]. Probablemente debido al uso de los promedios mensuales (para más detalles revise el capítulo 3).
- Al calcular el error cuadrático medio entre el modelo y el modelo de Scherliess and Fejer [1999], obtenemos valores relativamente altos (~ 5 m/s equivale al 45.14% respecto del promedio del modelo M0), producto del tratamiento temporal diferente para cada modelo.

5.4 Trabajo a Futuro

Los resultados mostrados en el presente trabajo de tesis muestran gran semejanza con otros modelos empíricos. Sin embargo, aún quedan algunas mejoras y trabajos por desarrollar. A continuación se sugieren algunas actividades como trabajo futuro:

Usar una interpolación cubica por tramos en dos dimensiones, para modelar las derivas y así mejorar la resolución temporal del modelo. Esta nueva interpolación permitiría introducir el flujo solar $f_{10.7\text{cm}}$ como un parámetro de entrada continuo.

Hacer uso de los datos tomados con el radar principal del Radio Observatorio de Jicamarca, en el modo de dispersión incoherente. Así disponer de una mayor cantidad de datos y mejorar nuestras estimaciones de las derivas verticales ecuatoriales.

APENDICE A: Gráficas

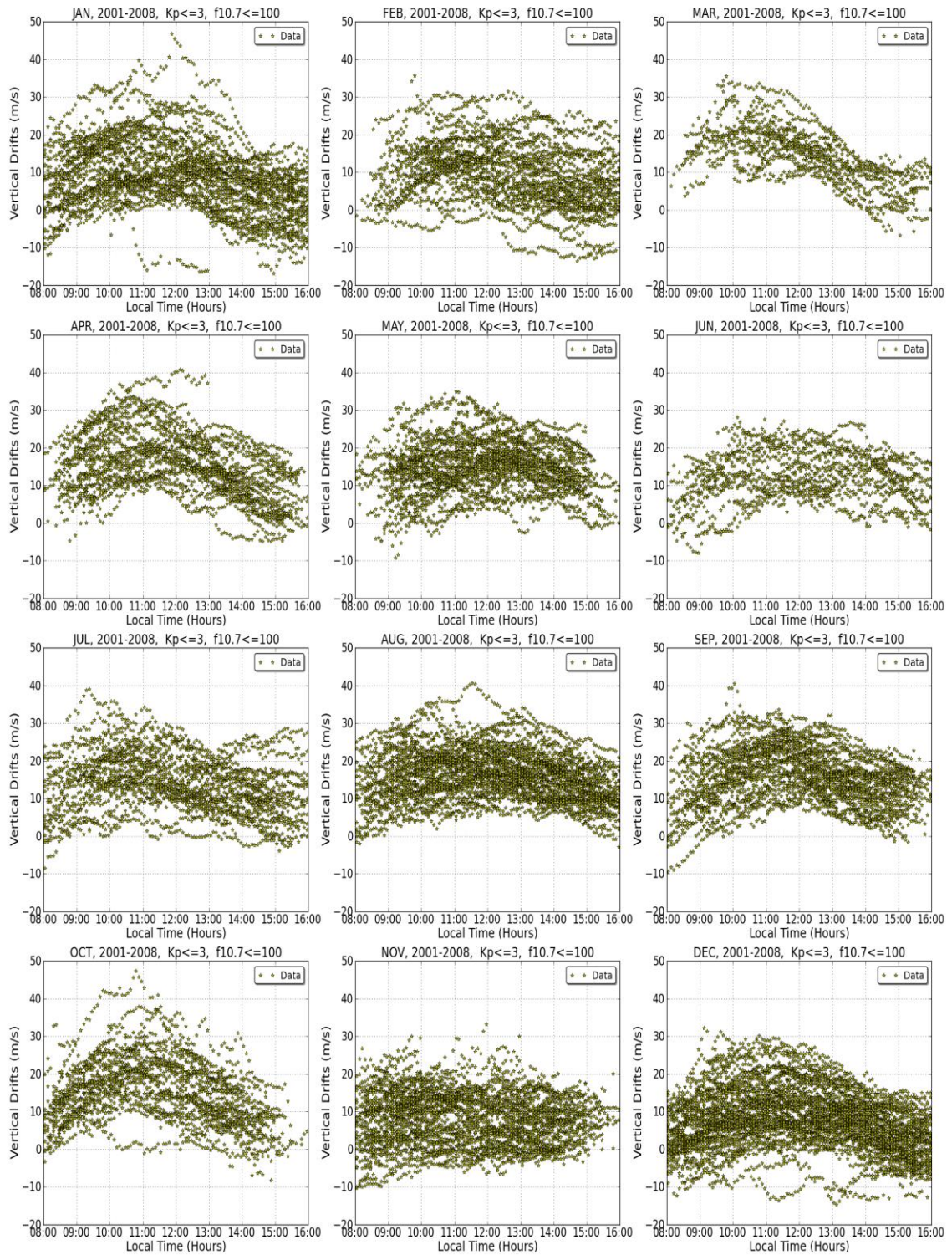


Figura 30 Derivas verticales de JULIA en función del tiempo para temporadas tranquilas ($K_p \leq 3$), para valores bajos de flujo solar ($f_{10.7cm} \leq 100$)

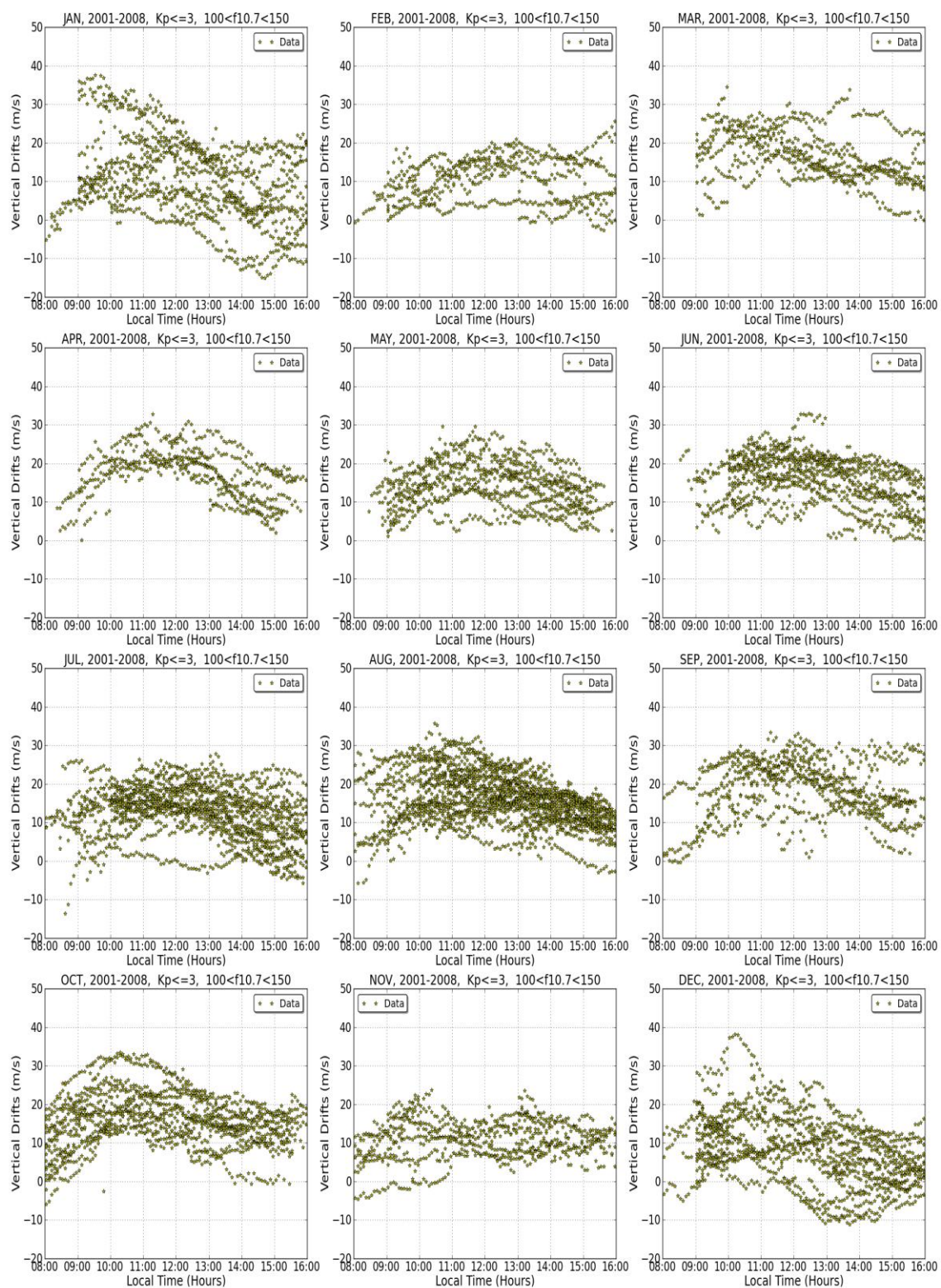


Figura 31 Derivas verticales de JULIA en función del tiempo para temporadas tranquilas ($K_p \leq 3$), para valores medios de flujo solar ($100 < f_{10.7} < 150$)

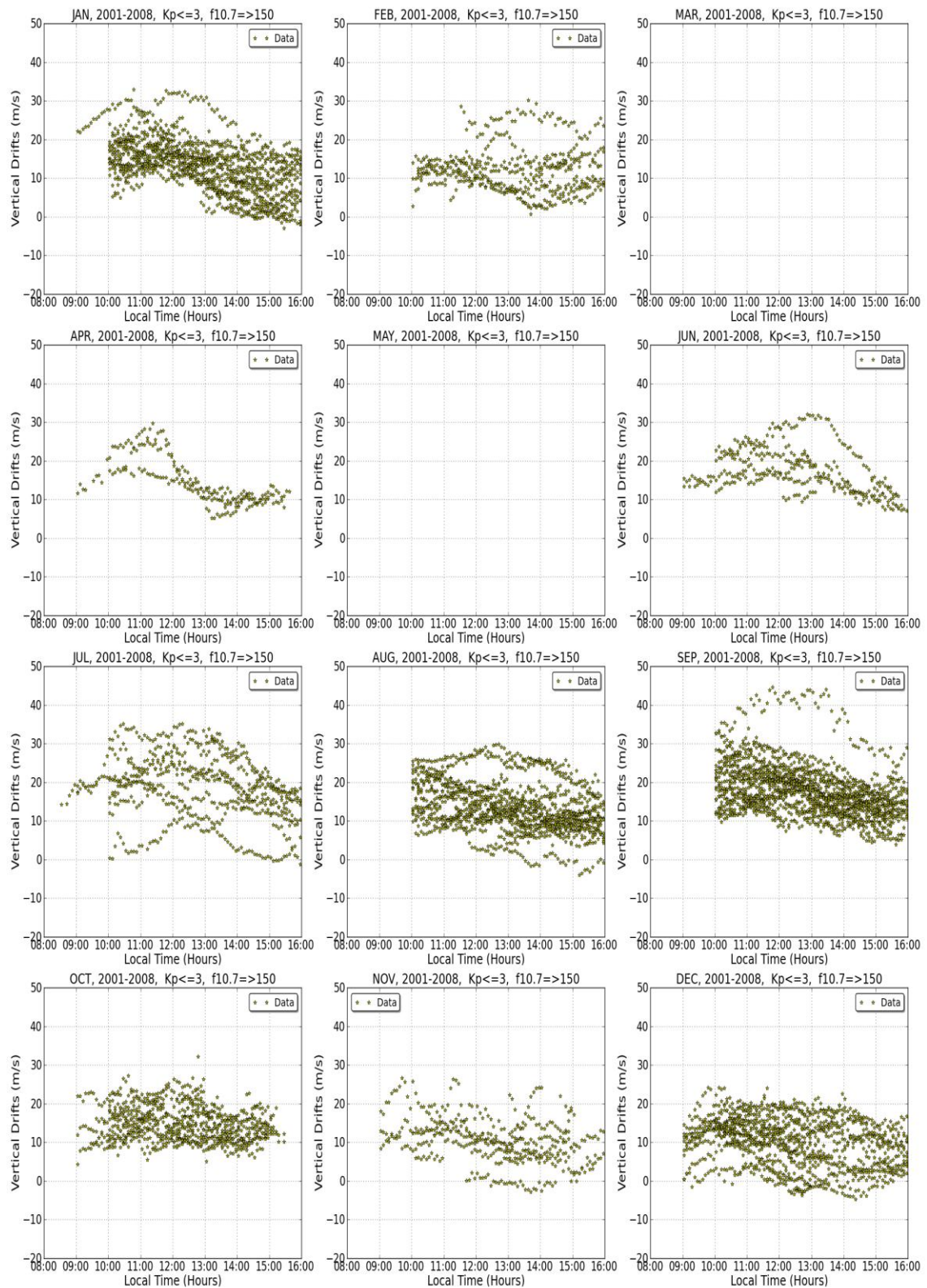


Figura 32 Derivas verticales de JULIA en función del tiempo para temporadas tranquilas ($K_p \leq 3$), para valores altos de flujo solar ($150 \leq f_{10.7} \text{ cm}$)

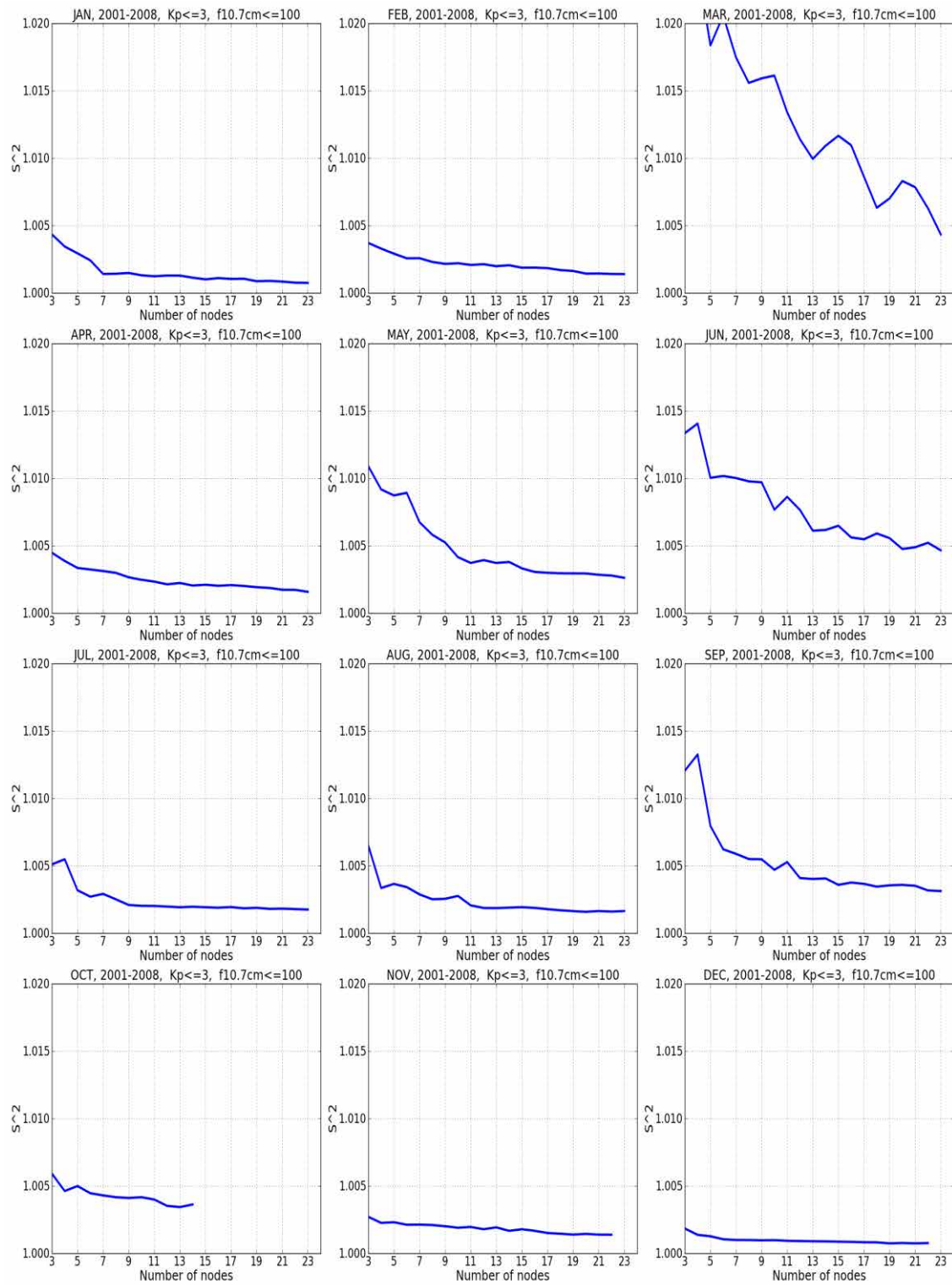


Figura 33 Error cuadrático medio (s^2) en función del número de nodos para valores bajos de flujo solar ($f10.7cm \leq 100$).

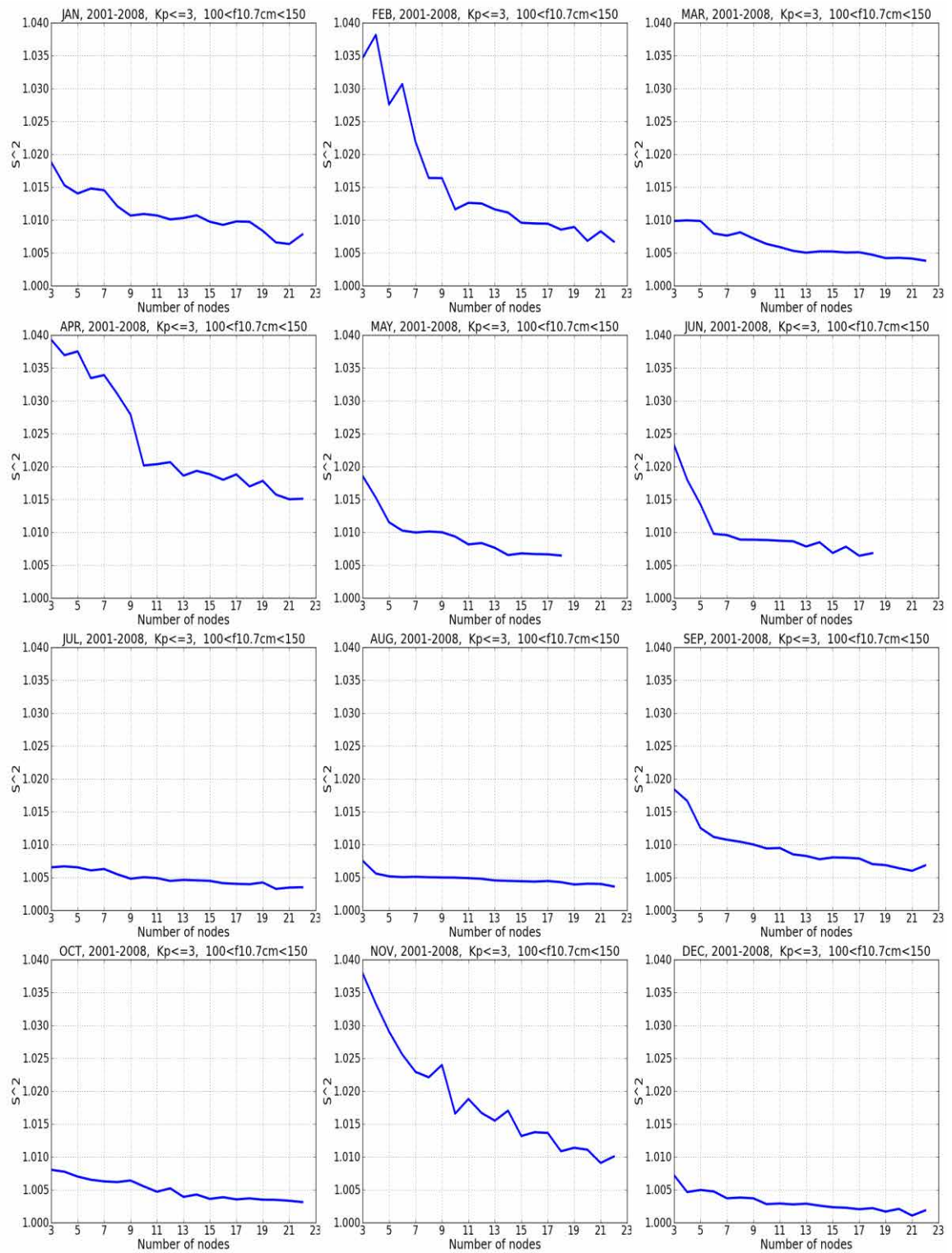


Figura 34 Error cuadrático medio (s^2) en función del número de nodos para valores medios de flujo solar ($100 < f_{10.7cm} < 150$).

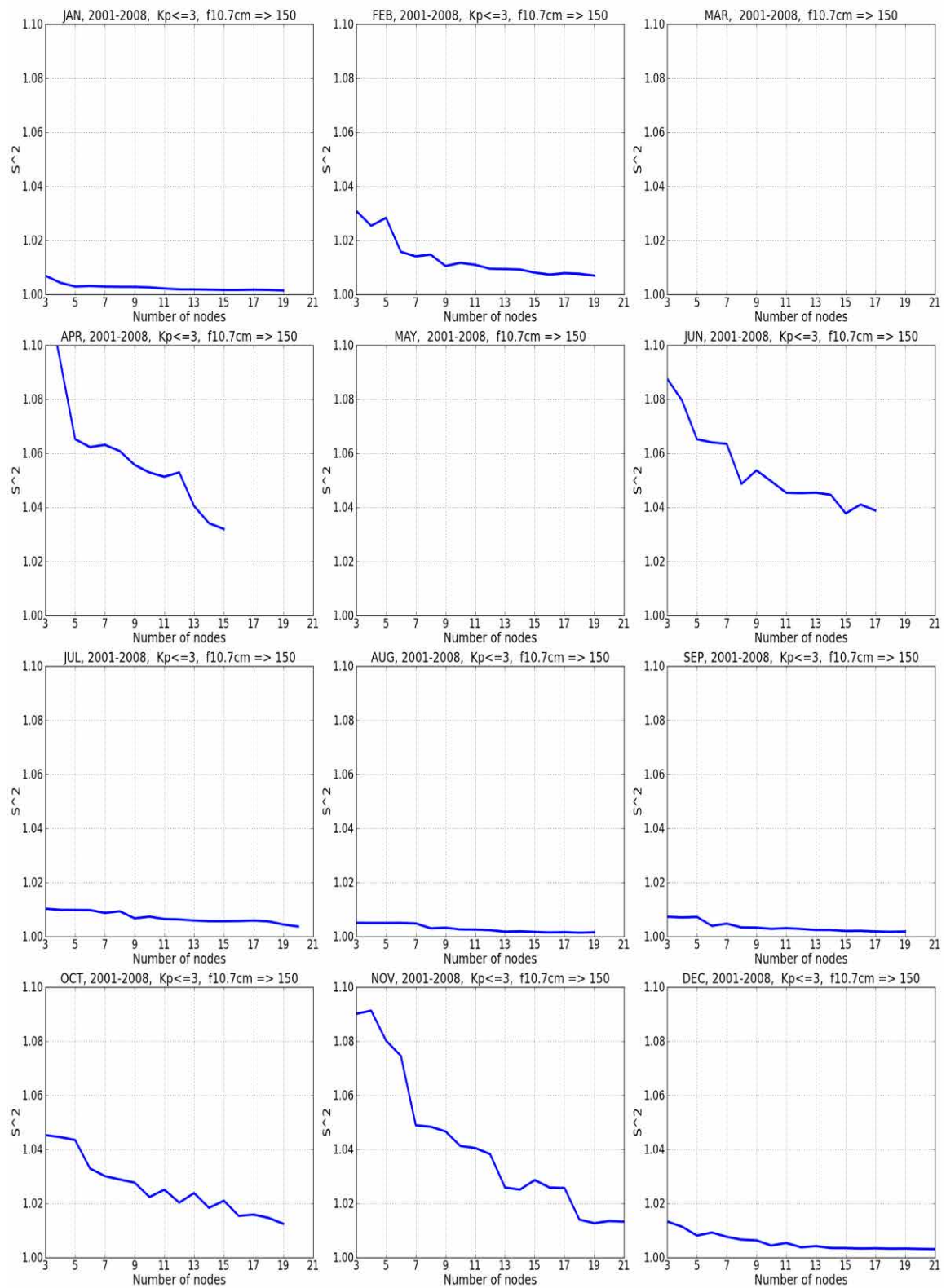


Figura 35 Error cuadrático medio (s^2) en función del número de nodos para valores altos de flujo solar ($f10.7cm \geq 150$).

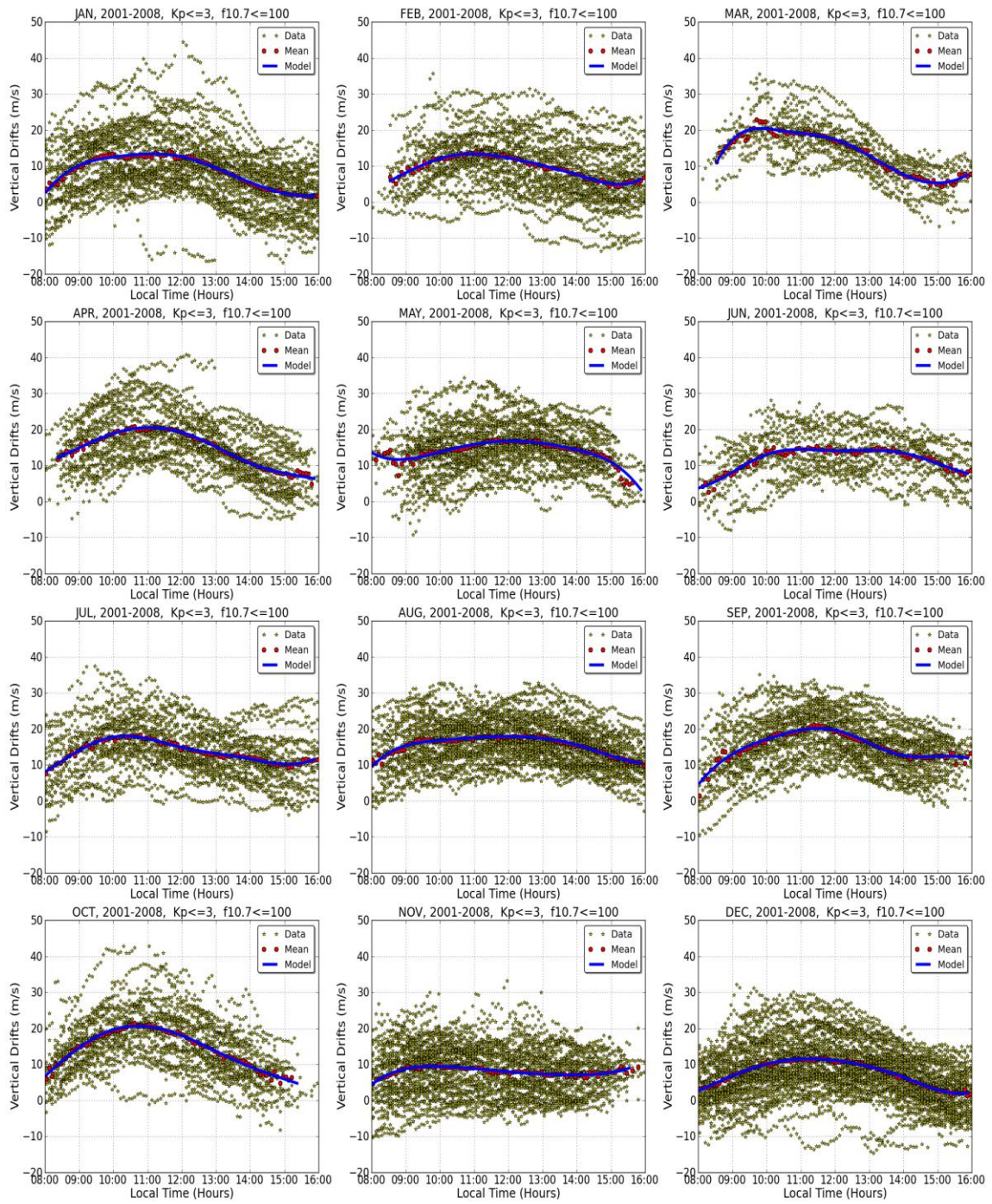


Figura 36 (verde) datos de *ExB* JULIA, (rojo) promedio mensual, (azul) Modelo implementado. Para valores bajos de flujo solar ($f_{10.7} \leq 100$)

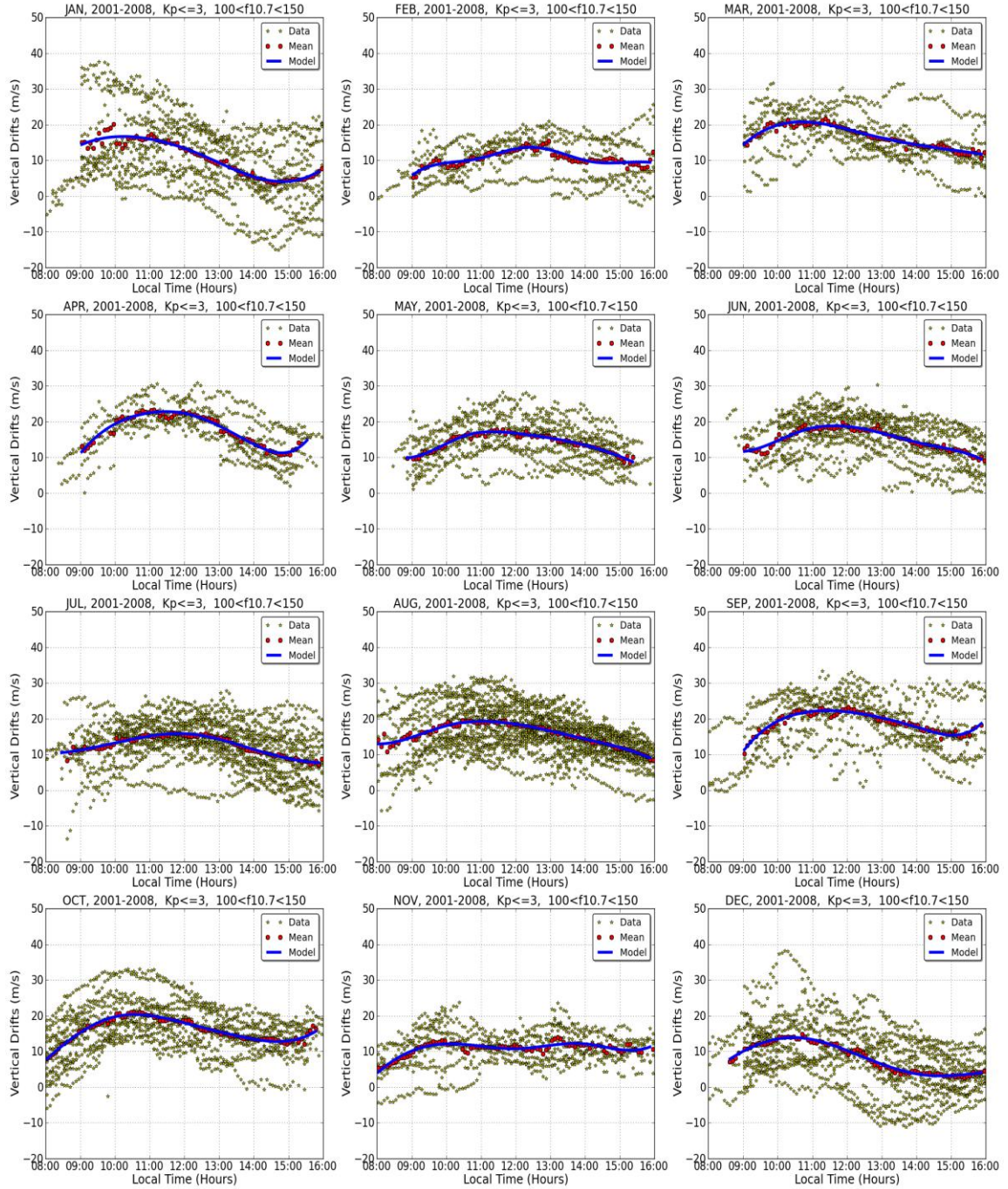


Figura 37 (verde) datos de *ExB* JULIA, (rojo) promedio mensual, (azul) Modelo implementado. Para valores medios de flujo solar ($100 < f_{10.7} < 150$)

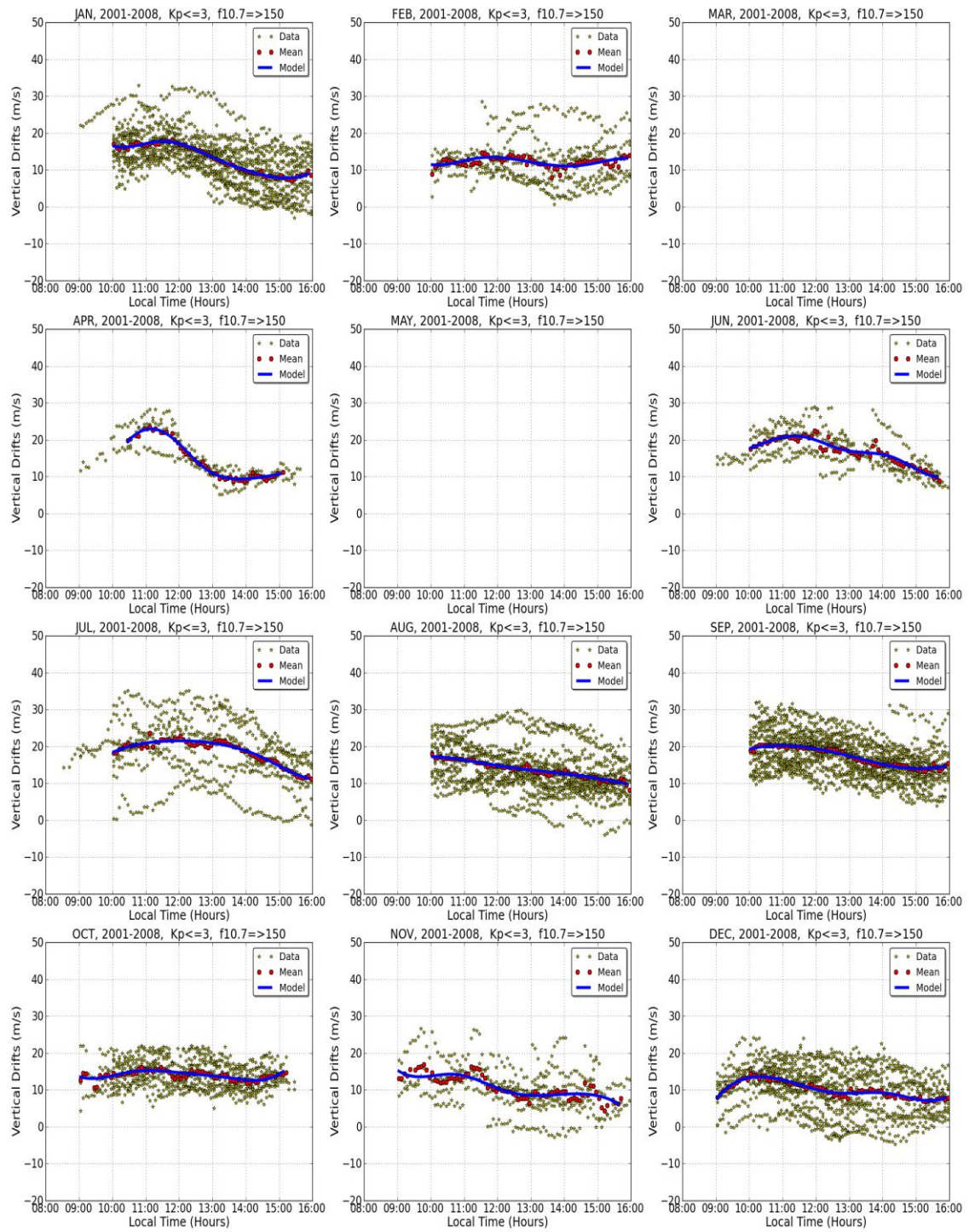


Figura 38 (verde) datos de *ExB* JULIA, (rojo) promedio mensual, (azul) Modelo implementado. Para valores altos de flujo solar ($f_{10.7cm} \geq 150$).

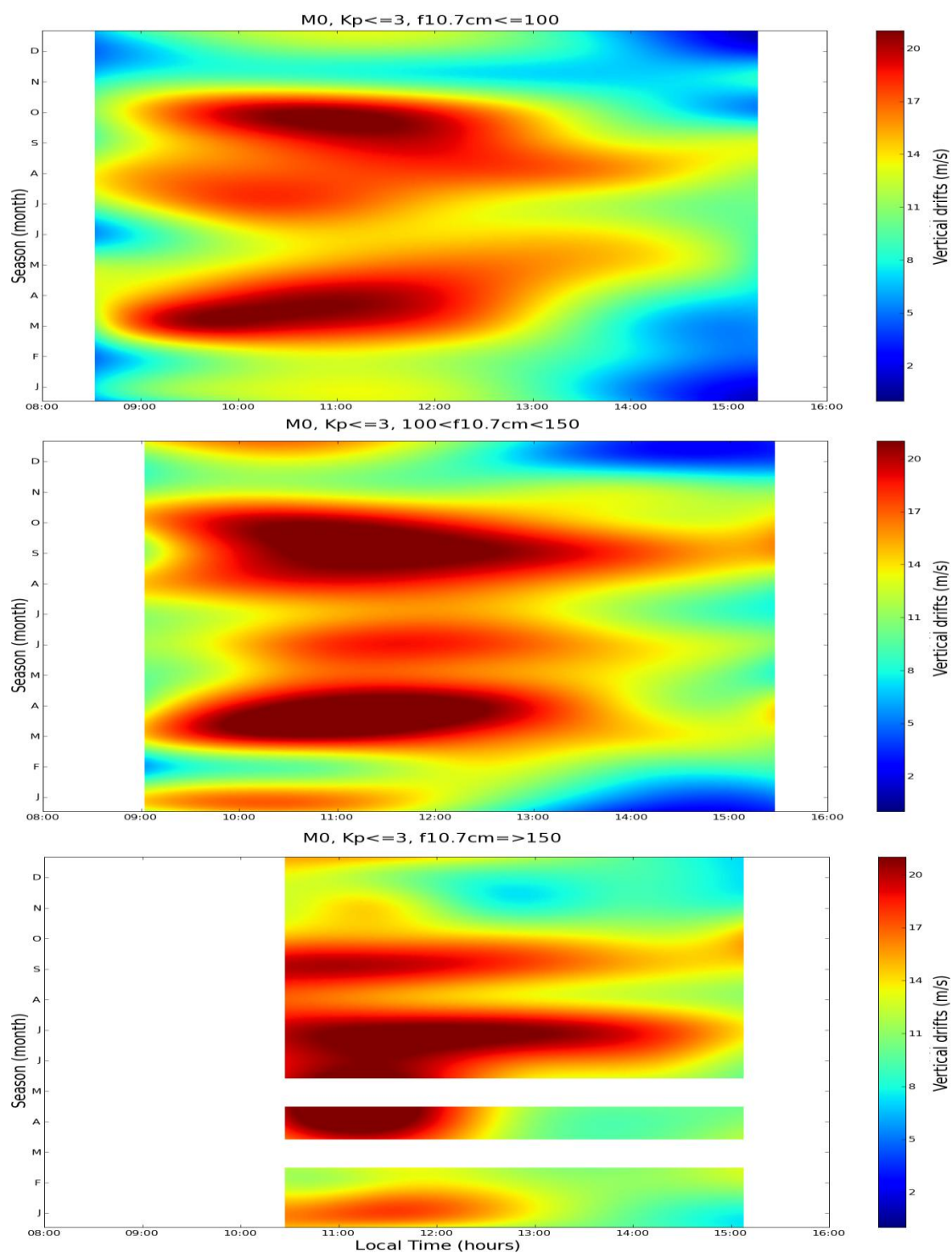


Figura 39 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y estación ($Kp \leq 3$) en $M0$ (arriba) flujo solar $f_{10.7cm} < 100$, (medio) flujo solar $100 < f_{10.7cm} < 150$ y (abajo) flujo solar $f_{10.7cm} > 150$.

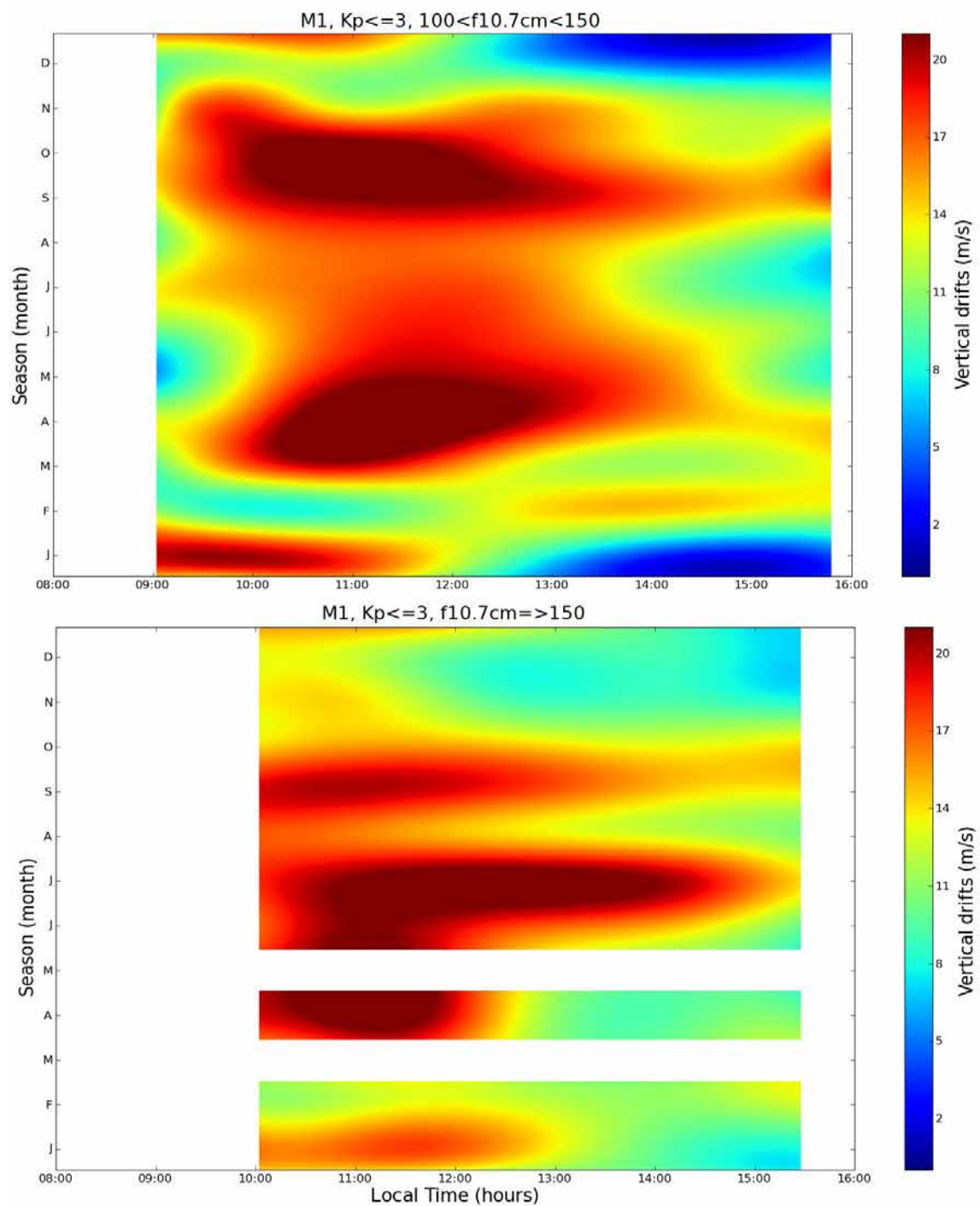


Figura 40 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y estación ($K_p \leq 3$) en M1 (arriba) flujo solar $100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$ y (abajo) flujo solar $f_{10.7\text{cm}} \geq 150$.

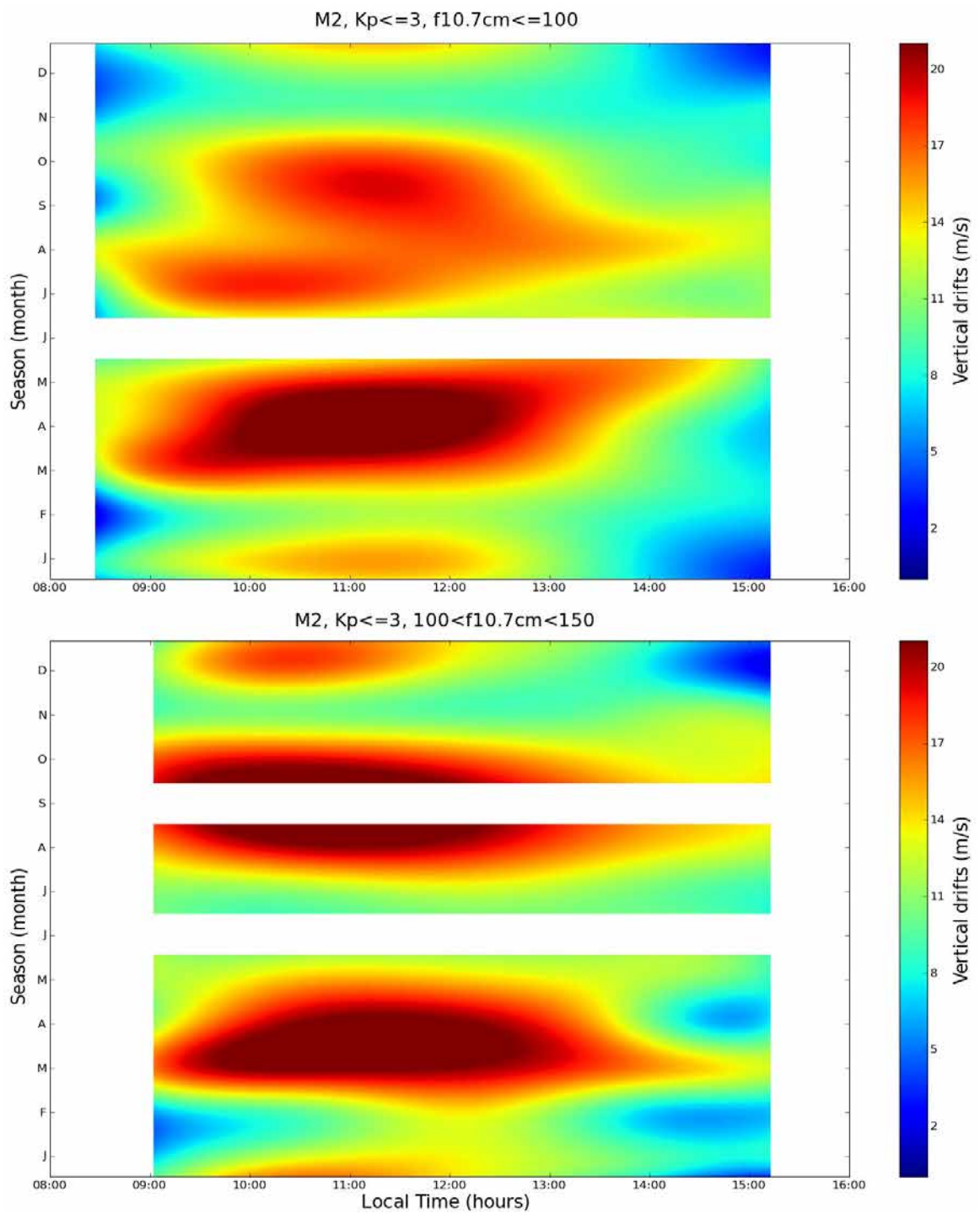


Figura 41 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y estación ($K_p \leq 3$) en M2 (arriba) flujo solar $f_{10.7cm} \leq 100$ y (abajo) flujo solar $100 < f_{10.7cm} < 150$

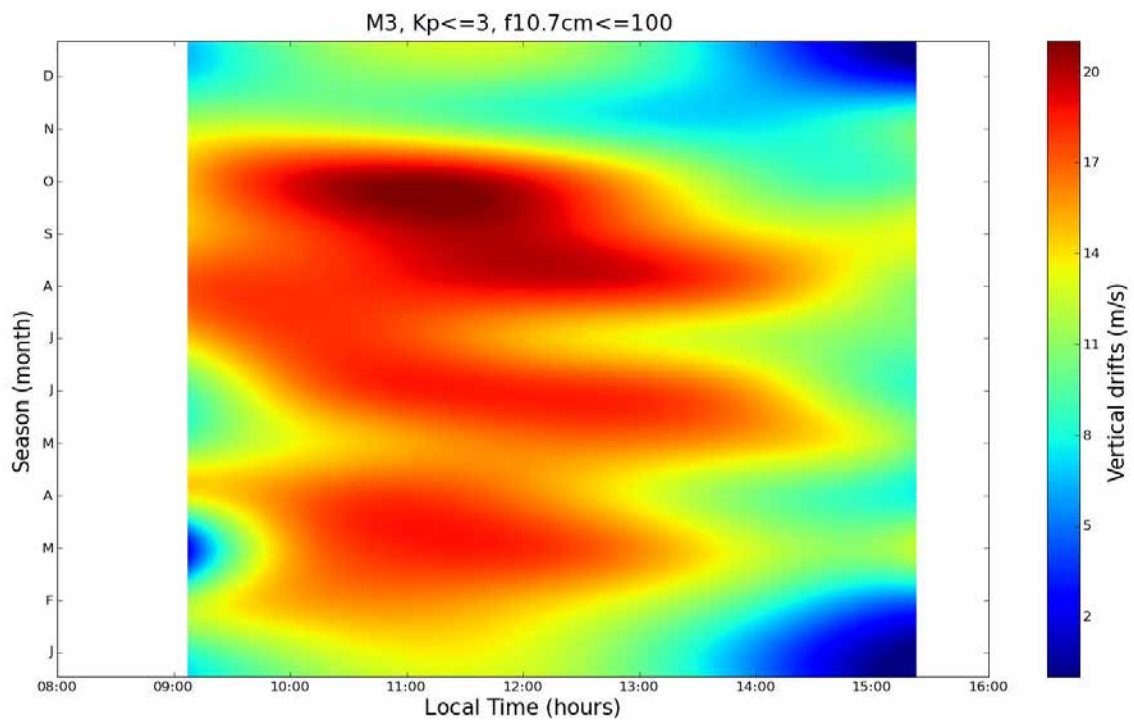


Figura 42 Variación de las derivas verticales en función del tiempo local y estación ($K_p \leq 3$) en M3 flujo solar $f_{10.7cm} \leq 100$

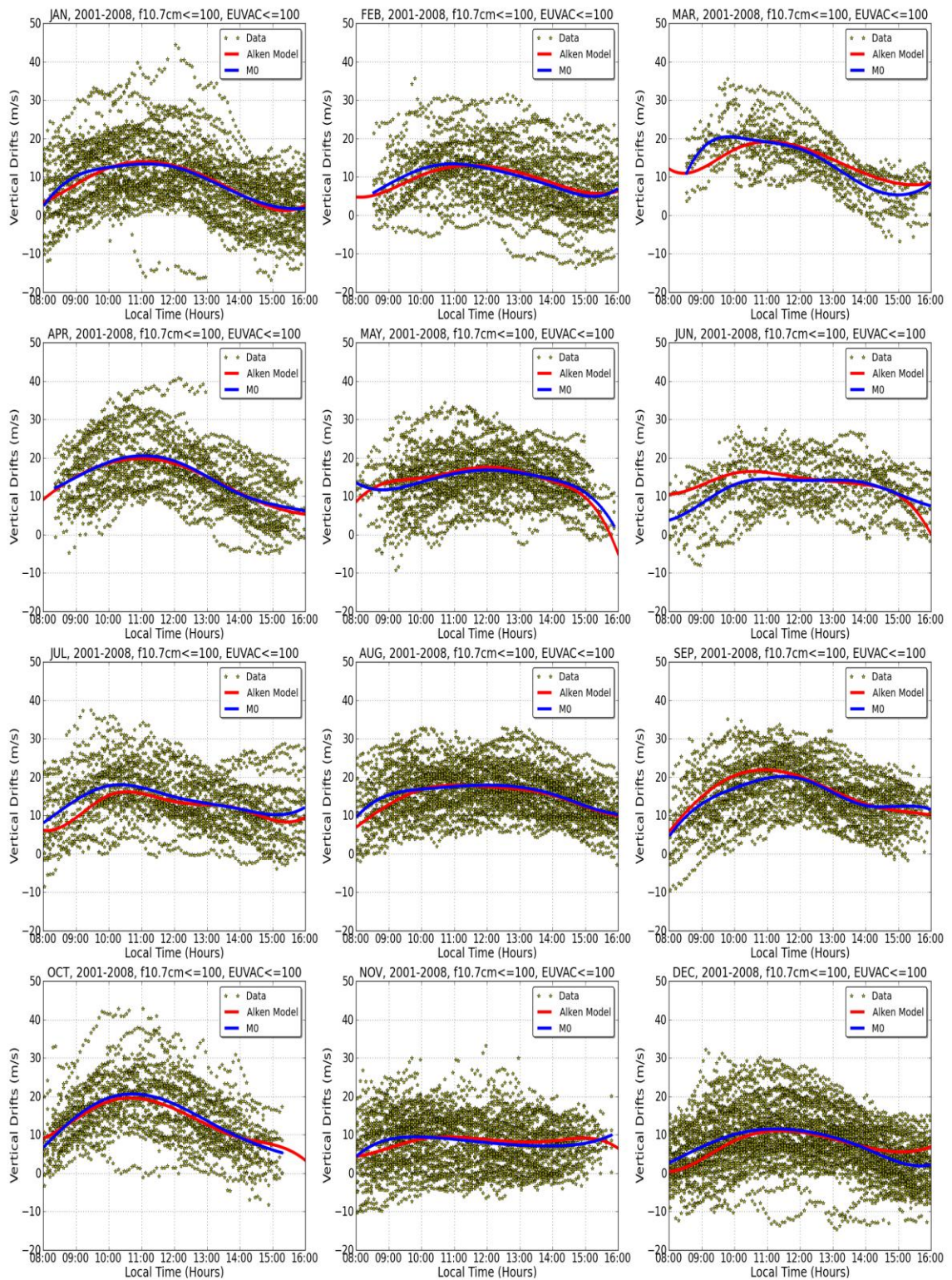


Figura 43 (verde) series de tiempo para las derivas verticales de JULIA ($K_p \leq 3$) para valores bajos de flujo solar ($f_{10.7\text{cm}} \leq 100$), (rojo) promedios mensuales de estimaciones del modelo de Alken para flujo solar ($\text{EUVAC} \leq 100$) y (azul) el modelo desarrollado.

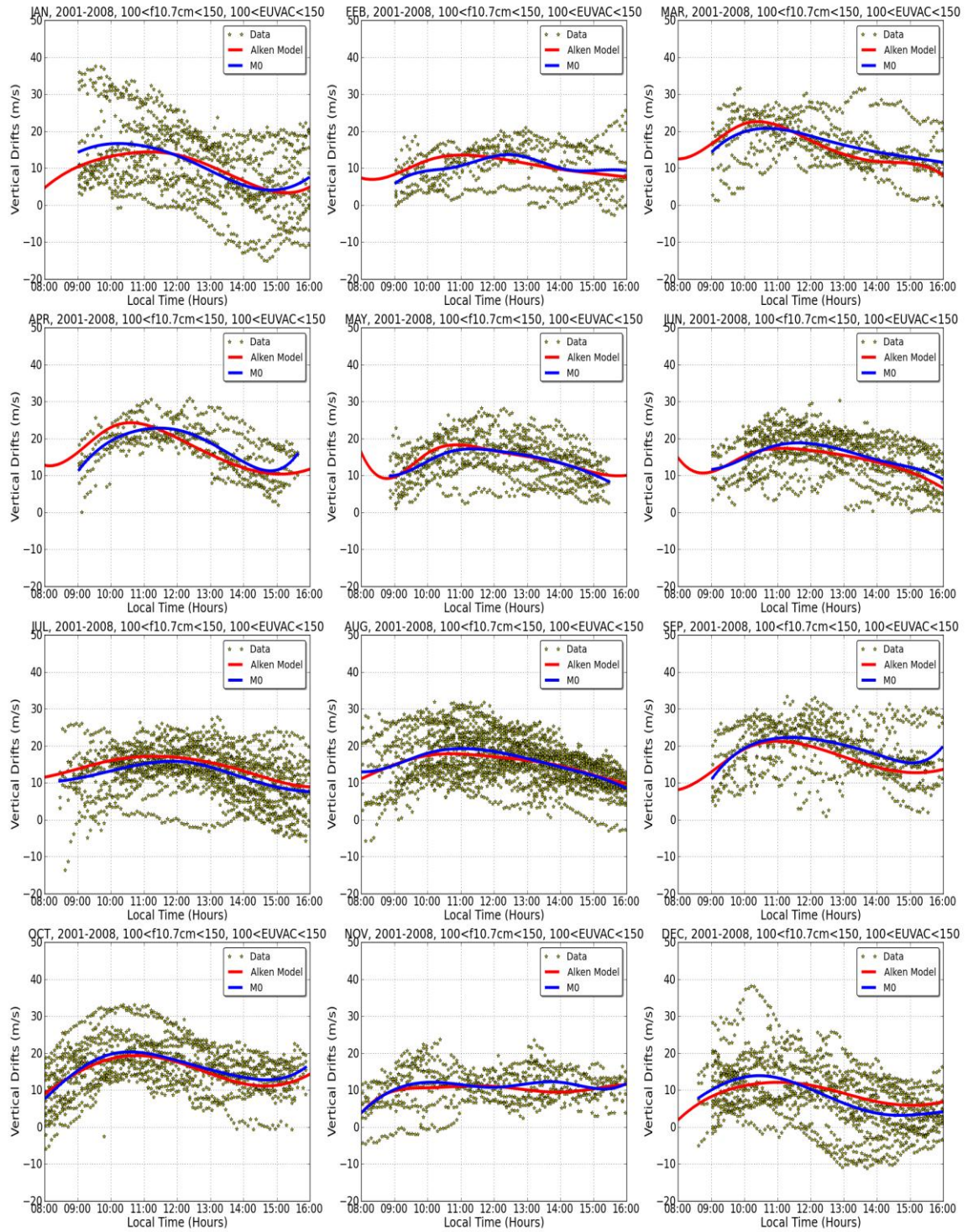


Figura 44 (verde) series de tiempo para las derivas verticales de JULIA ($K_p \leq 3$) para valores medios de flujo ($100 < f_{10.7} \text{cm} < 150$), (rojo) promedios mensuales de estimaciones del modelo de Alken para flujo solar ($100 < \text{EUVAC} < 150$) y (azul) el modelo desarrollado.

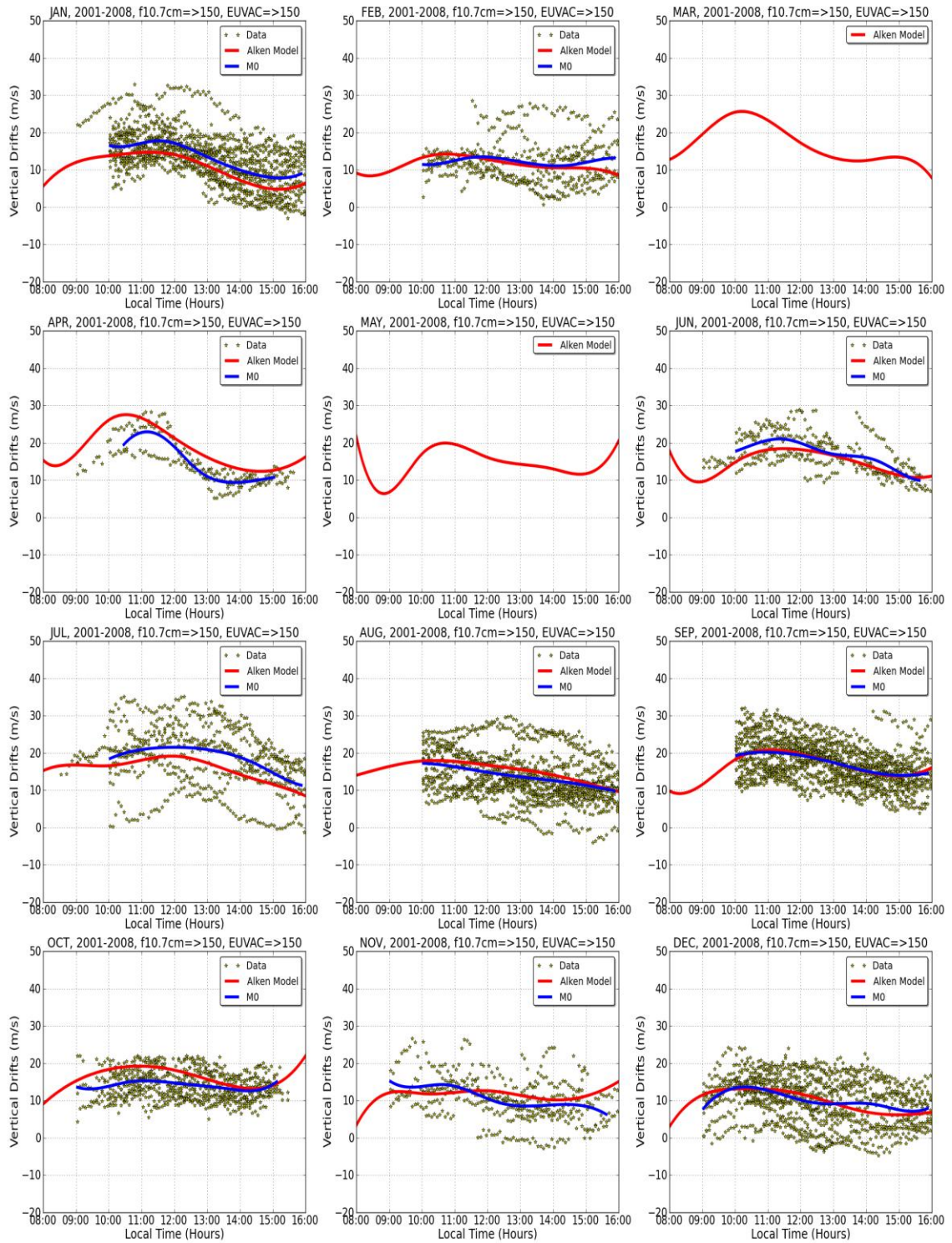


Figura 45 (verde) series de tiempo para las derivas verticales de JULIA ($K_p \leq 3$) para valores altos de flujo solar ($f_{10.7\text{cm}} \geq 150$), (rojo) promedios mensuales de estimaciones del modelo de Alken para flujo solar ($\text{EUVAC} \geq 150$) y (azul) el modelo desarrollado.

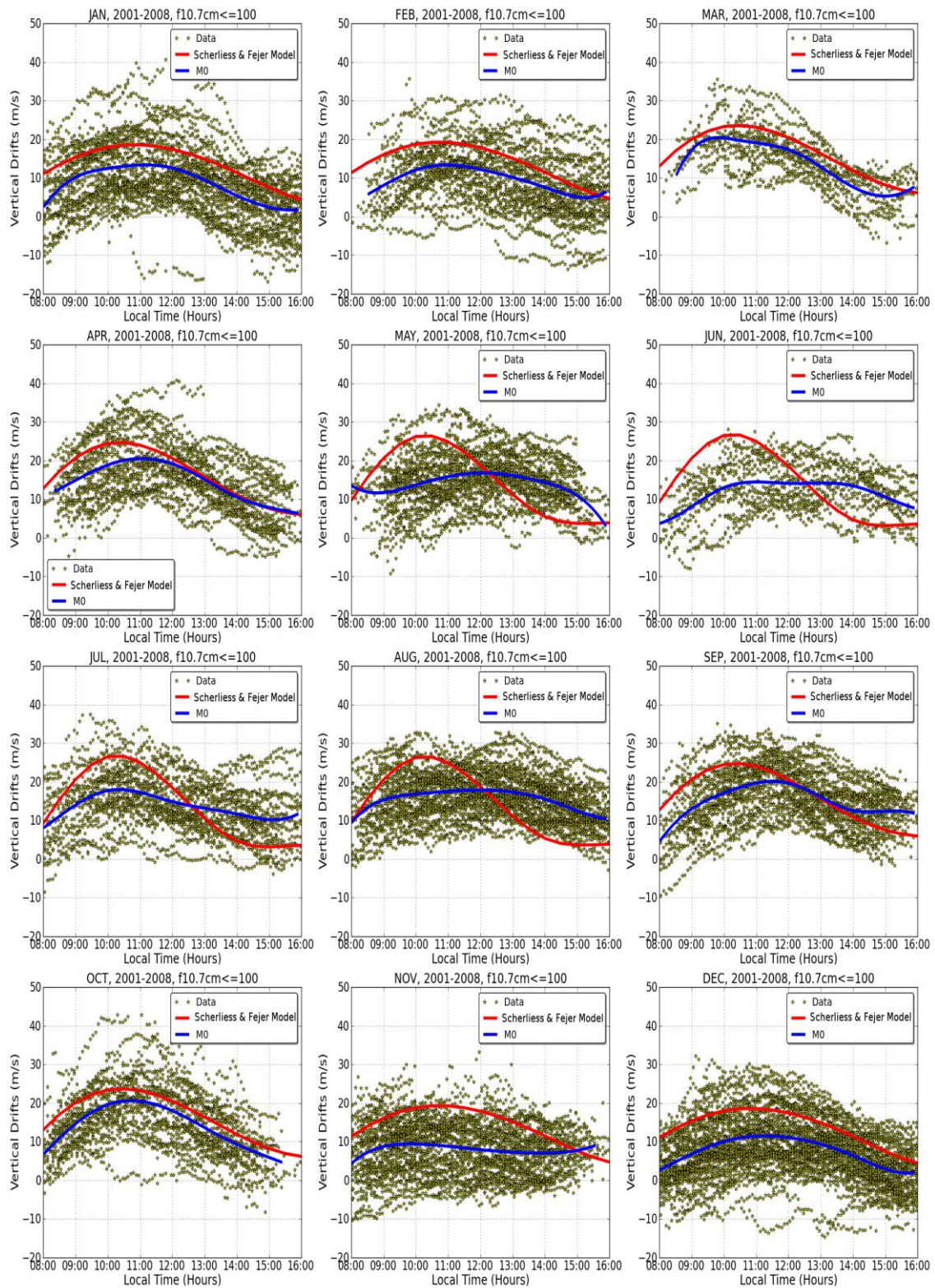


Figura 46 (verde) series de tiempo para derivas verticales de JULIA ($K_p \leq 3$) para valores bajos de flujo solar ($f_{10.7cm} \leq 100$), (rojo) promedios mensuales de estimaciones del modelo de Scherliess and Fejer y (azul) el modelo desarrollado.

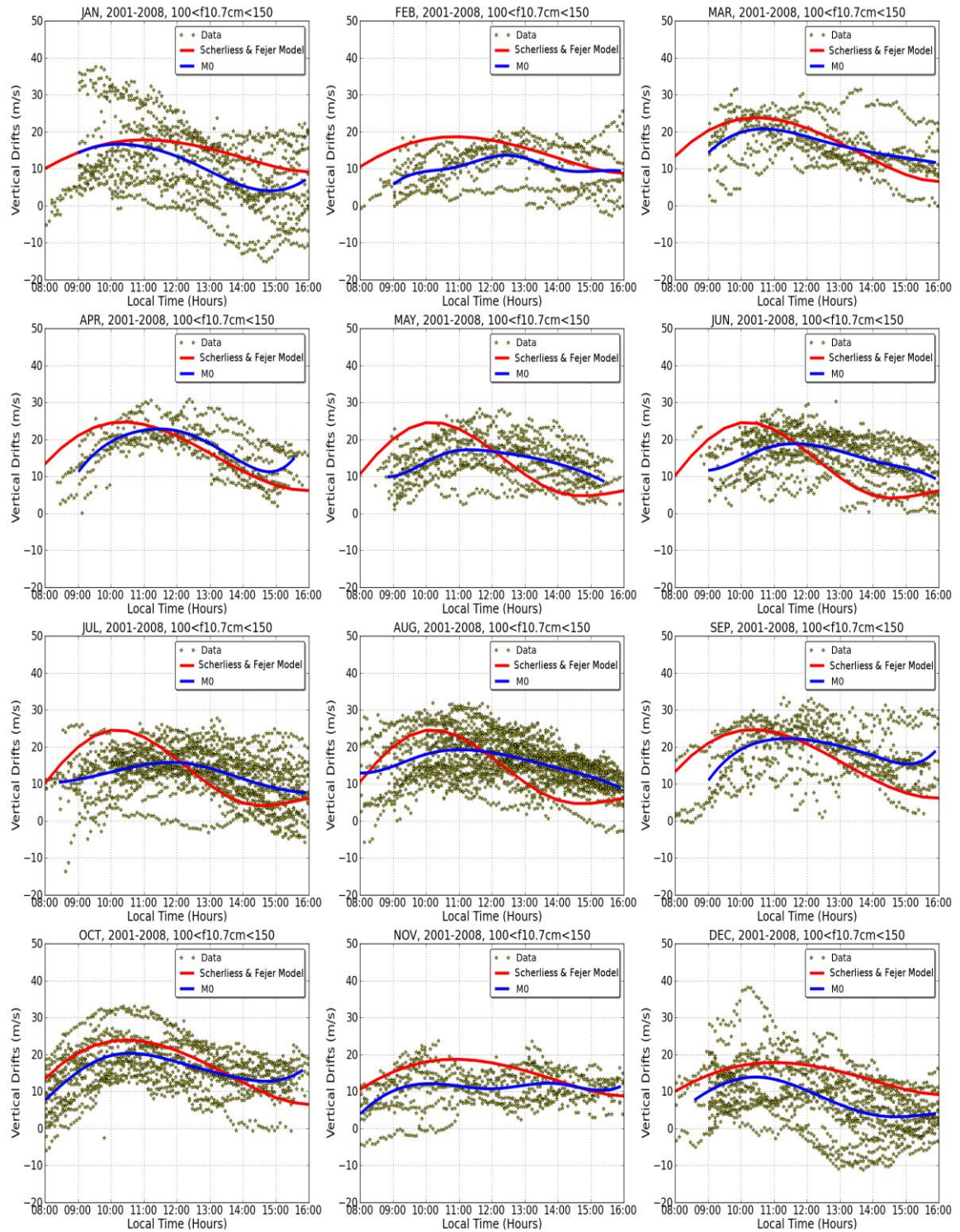


Figura 47 (verde) series de tiempo para derivas verticales de JULIA ($K_p \leq 3$) para flujo solar ($100 < f_{10.7\text{cm}} < 150$), (rojo) promedios mensuales de estimaciones del modelo de Scherliess and Fejer y (azul) el modelo desarrollado.

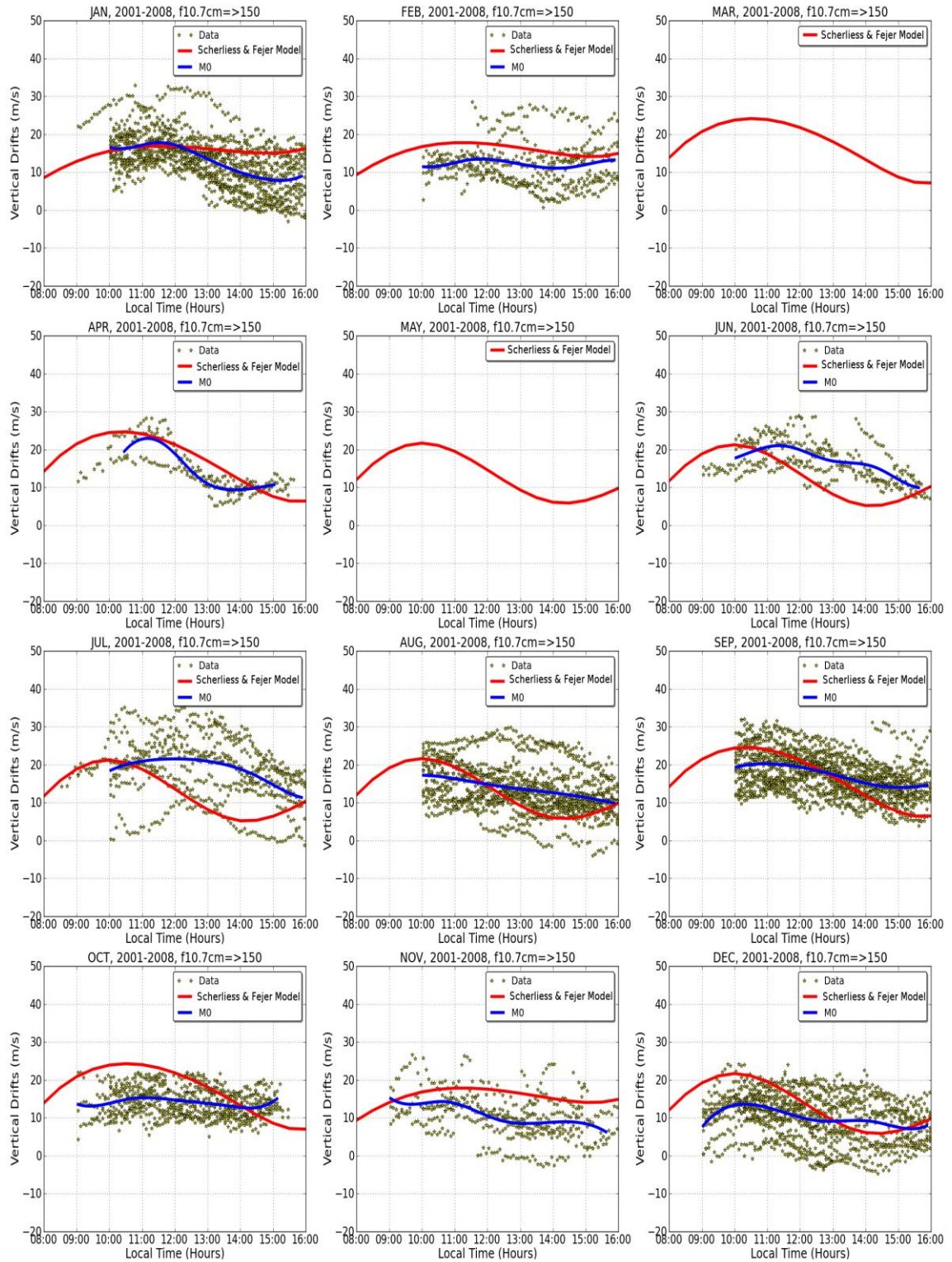


Figura 48 (verde) series de tiempo para derivas verticales de JULIA ($K_p \leq 3$) para flujo solar ($f_{10.7cm} \geq 150$), (rojo) promedios mensuales de estimaciones del modelo de Scherliess and Fejer y (azul) el modelo desarrollado.

APENDICE B: Tablas

Tabla 6: coeficientes del modelo entre 2001-2008 ($f_{10.7\text{cm}} \leq 100$)

Jan:([28950., 36075., 36075., 43200., 43200., 50325., 50325., 57450.] ,[[2.7575251283922233, 0.0033202780672778372, -8.0993499748336843e-07, 1.1004836159627514e-10],[],\n [12.490253384223688, 0.00034282813853938856, -2.5840421109941667e-08, -2.8213314709585772e-11],[],\n [12.576184773831738, -0.00055741813914505361, -2.2686028841561852e-07, 4.4069016190471555e-11],[],\n [5.5028928585510997, -0.0010552021190840661, 8.7131451941555414e-08, 2.685671157782953e-11],[],3)\n ,Feb:([30150., 36975., 36975., 43800., 43800., 50625., 50625., 57450.] ,[[3.9292931989967479, 0.0020118599831782983, -1.926593250182288e-07, -8.2334614307911924e-12],[],\n [12.736887949454697, 0.00050520020024964849, -2.488526992833752e-07, 2.9221558558491804e-11],[],\n [11.93733932917677, -0.00051264024179377573, -4.9415562121420191e-08, 1.5533453960296928e-12],[],\n [7.3699711203062783, -0.00081372355357883167, -3.8813979793548384e-08, 1.0900082929404177e-10],[],3)\n ,Mar:([30750., 37425., 37425., 44100., 44100., 50775., 50775., 57450.] ,[[10.974382017793239, 0.0050892354758552303, -1.739643778714668e-06, 2.7509836492650218e-10],[],\n [19.825683189312187, -0.00039429695417424188, 9.663780717015257e-08, -5.7970284691734676e-11],[],\n [16.47315119797317, -0.0010406907242458787, -2.9031384314678422e-07, 8.4057360579659344e-11],[],\n [7.2255496629324929, -0.0011059215090126972, 2.7076903872233396e-07, 4.3265876242512276e-11],[],3)\n ,Apr:([30150., 36975., 36975., 43800., 43800., 50625., 50625., 57450.] ,[[12.129740223029572, 0.0011578254606688604, 8.9030798419683259e-08, -4.7512058902397915e-11],[],\n [19.5880057683774, 0.00065888996052760294, -2.3523900358943161e-07, 1.0438427541362895e-12],[],\n [18.661448332670304, -0.0009223048150243839, -2.2811477679224705e-07, 6.2612699929706591e-11],[],\n [10.37141629908588, -0.0010209188188002468, 1.9921690022785542e-07, -3.4092898430785796e-11],[],3)\n ,May:([28950., 36000., 36000., 43050., 43050., 50100., 50100., 57150.] ,[[13.328595837723613, -0.0013222140762638186, 5.9851047935015322e-07, -8.8914703295551892e-11],[],\n [13.688062577358602, 0.00068764328287774503, -2.8338178883981715e-08, -1.7609381389283632e-11],[],\n [16.80331297641683, 5.0243982494818162e-05, -1.5248431767868082e-07, 1.9400464435883562e-11],[],\n [14.50110276405487, -0.0005426446653264941, -1.571104340556558e-08, -1.3620668098362772e-10],[],3)\n ,Jun:([28950., 36075., 36075., 43200., 43200., 50325., 50325., 57450.] ,[[3.8249323806141908, 0.00070260320869995987, 4.395956831413139e-07, -1.1484395381337558e-10],[],\n [13.065881495876555, 0.00091965990467735915, -3.786674877792462e-07, 6.7709003882451817e-11],[],\n [14.088594231065281, -5.9700995640472168e-05, 1.0375916488304256e-07, -4.670932414553069e-11],[],\n [13.481090774636105, -0.00050603096263710401, -2.2904476965382426e-07, 5.8002888561675159e-11],[],3)\n ,Jul:([28950., 36075., 36075., 43200., 43200., 50325., 50325., 57450.] ,[[8.2657678752754897, 0.0016851274544318784, 5.4735537011759943e-08, -6.4885385866081366e-11],[],\n [17.750080600509943, 0.00042814457220975716, -4.0757283728459048e-07, 7.3094538487205916e-11],[],\n [14.86171006095663, -0.00062046692824736641, 1.1322574943691266e-07, -2.6487539251390827e-11],[],\n [11.718091589610401, -0.00048606170591452305, -7.5497967729397122e-08, 9.2976004293003961e-11],[],3)\n ,Aug:([28950., 36075., 36075., 43200., 43200., 50325., 50325., 57450.] ,[[9.8703082481561175, 0.002530972404989844, -6.5848693519893634e-07, 9.3433804936494759e-11],[],\n [16.821816509530571, 0.00021086574356202859, 7.228924973846597e-09, -1.0453853686689247e-11],[],\n [17.87752338551628, -2.9763740330004732e-06, -6.7254782544126321e-08, -9.2429007292747258e-12],[],\n [15.592000497085719, -0.00071677751582826122, -1.3311045024038292e-07, 5.423421907715013e-11],[],3)\n ,Sep:([28950., 36075., 36075., 43200., 43200., 50325., 50325., 57450.] ,[[4.9295101766243734, 0.0032494517697736931, -6.2783824735303432e-07, 8.2865622043747605e-11],[],\n [17.141039572575043, 0.00087946680441633896, -3.7420690291116511e-08, -4.6557337909175368e-11],[],\n [19.65072726447865, -0.00056891179255336198, -3.6914172289344631e-07, 1.0600523346925979e-10],[],\n [12.617814146675315, -0.00050833560300187267, 3.8614556557478381e-07, -1.1805939750859597e-10],[],3)\n ,Oct:([28950., 35475., 35475., 42000., 42000., 48525., 48525., 55050.] ,[[6.9840911473051301, 0.0024697974618997733, -1.0863717128523586e-07, -3.6485754994325877e-11],[],\n [19.097545196400841, 0.0009842380080230446, -3.4670672262296847e-07, 2.1441958016548251e-11],[],\n [19.131854425666322, -0.00082157097520447293, -2.0679794656547444e-07, 4.488554736414063e-11],[],\n [11.447073278427606, -0.0012154124602957695, 8.6080249985535133e-08, -1.0019646260988143e-12],[],3)\n ,Nov:([28950., 35925., 35925., 42900., 42900., 49875., 49875., 56850.] ,[[4.6198729021469767, 0.001958550381885867, -5.1319162913230849e-07, 6.3852695331740826e-11],[],\n [9.4084905501689047, -6.7724463399958736e-05, -6.7819079193405351e-08, 1.2700696858143682e-11],[],\n

Tabla 7: coeficientes del modelo entre 2001-2008 ($100 < f10.7\text{cm} < 150$)

```

Jan:([ 32550., 38775., 38775., 45000., 45000., 51225., 51225., 57450.])\
,[14.409819208089893, 0.0011179955327954524, -3.1307827552336047e-07, 2.4872830392897297e-11],[,]\
[16.303333612382733, -0.00034899787071487605, -1.5824490632745015e-07, 1.0028606566623489e-11],[,]\
[11.467965181852986, -0.0011397650264355966, -9.5816830450314448e-08, 5.6398086749944711e-11],[,]\
[4.7838627615596598, -0.0006434942408065084, 2.552612595680837e-07, 4.0880934872585262e-11],[,],3)\
,'Feb':([ 32550., 38775., 38775., 45000., 45000., 51225., 51225., 57450.])\
,[15.9852501589819971, 0.0018629559935203592, -7.0458470789217091e-07, 1.5494810570843757e-10],[,]\
[10.160100856985078, 0.00047908415627524932, 2.5996725014288667e-07, -1.1285484956986671e-10],[,]\
[13.642155637652737, -8.9217689141696518e-05, -4.4255418842949875e-07, 1.2520134243789208e-10],[,]\
[9.5457162291877413, -0.00041830237696052384, 3.3682416824667177e-07, -1.024265529979399e-10],[,],3)\
,'Mar':([ 32550., 38775., 38775., 45000., 45000., 51225., 51225., 57450.])\
,[14.547764586207167, 0.0023690239944534576, -5.4103467951826812e-07, 4.7755783725325043e-11],[,]\
[20.732185671898609, -7.3633652186823147e-05, -2.4375492582797489e-07, 4.6769303445057926e-11],[,]\
[17.431290805238575, -0.00068483819581066153, 4.7383988117638747e-08, -1.9878398661552861e-12],[,]\
[14.006333949986411, -0.00042838788838447136, 3.5009684950802331e-08, -1.0182115267799497e-11],[,],3)\
,'Apr':([ 32550., 38475., 38475., 44400., 44400., 50325., 50325., 56250.])\
,[11.517439159298503, 0.0032336574199658551, -6.42004279238892e-07, 7.0440987413051694e-11],[,]\
[21.849842587557873, 0.00066621950985025892, -2.2464142881684686e-07, -1.012791929204221e-11],[,]\
[21.503001703676123, -0.00084255442423914872, -2.8464935062271149e-07, 6.6064285344935648e-11],[,]\
[13.80470773721076, -0.0013694878130706435, 1.0678154004643724e-07, 2.3621056929256703e-10],[,],3)\
,'May':([ 31950., 37875., 37875., 43800., 43800., 49725., 49725., 55650.])\
,[9.8764161954283747, 0.00012572586306688394, 6.5639460946005642e-07, -1.7771081399299861e-10],[,]\
[15.98224760411591, 0.00089553932687644485, -3.9654196344861131e-07, 6.3669821419387878e-11],[,]\
[16.535120402995616, -0.000336387369272686, -1.9298271538549009e-08, -1.0520984538947099e-11],[,]\
[13.83855738203356, -0.00063540249706604422, -8.1635104931780363e-08, -7.5022249762459723e-12],[,],3)\
,'Jun':([ 32550., 38775., 38775., 45000., 45000., 51225., 51225., 57450.])\
,[11.648916041981666, 0.00030125633137535079, 4.7071471469952402e-07, -1.249481124223384e-10],[,]\
[17.62109579717092, 0.00081054670591131203, -3.0708728512956759e-07, 2.9604042419117178e-11],[,]\
[17.907031141560324, -0.0005274840708856083, -1.2280212107033704e-07, 3.6638272617824579e-11],[,]\
[13.717110140365808, -0.0005820492931174091, 1.0527112597569546e-07, -7.6060742577588448e-11],[,],3)\
,'Jul':([ 30450., 37200., 37200., 43950., 43950., 50700., 50700., 57450.])\
,[10.475173804057722, 0.00026190292743037376, 1.2625346315035028e-07, -2.3769656417427701e-11],[,]\
[13.900849679770065, 0.00057261131843459943, -3.4191717667572638e-08, -2.5925570311920926e-11],[,]\
[15.658157989081035, -0.00024879967449179658, -2.0918931727352753e-07, 3.7696417733219618e-11],[,]\
[11.145401964215342, -0.00080205604960305885, 4.5261502425765451e-08, 1.6894341661741447e-11],[,],3)\
,'Aug':([ 28950., 36075., 36075., 43200., 43200., 50325., 50325., 57450.])\
,[12.944484785897288, -2.8368635067505907e-05, 4.2522470673502588e-07, -9.1065154272213206e-11],[,]\
[18.045969139049951, 0.00068986766424489622, -2.2361451745435761e-07, 1.9497040063273101e-11],[,]\
[18.460673944518515, -0.00040849606038734514, -8.4698107003745579e-08, 1.5311971784328263e-11],[,]\
[14.323333003499394, -0.00062330916398070407, 2.4399691959874082e-08, -3.0743812521609689e-11],[,],3)\
,'Sep':([ 32550., 38775., 38775., 45000., 45000., 51225., 51225., 57450.])\
,[11.263912642036003, 0.0034196674819317744, -7.267594211699786e-07, 8.0896050942791751e-11],[,]\
[21.722478323669179, 0.00046297635218218688, -2.23181504050719e-07, 2.2969439763722097e-11],[,]\
[21.203752883047621, -0.00048128843716108843, -8.0196741521627982e-08, 8.8502738223024778e-12],[,]\
[17.009709836873107, -0.00080903633211332215, -2.5103786977510666e-08, 1.9890542338289112e-10],[,],3)\
,'Oct':([ 28950., 36000., 36000., 43050., 43050., 50100., 50100., 57150.])\
,[7.8882835149428656, 0.002454432145496903, -1.5018998118653694e-07, -3.0262032232474107e-11],[,]\
[19.692305448715576, 0.0006435434496132519, -3.6353730842579352e-07, 4.9518153842212424e-11],[,]\
[18.086812081049857, -0.00068880655411726588, -1.4434323838101502e-08, 1.2192564081855666e-11],[,]\
[13.584065960866143, -0.00048756807903756639, 7.152325293874078e-08, 7.2473154898890536e-11],[,],3)\
,'Nov':([ 28950., 36075., 36075., 43200., 43200., 50325., 50325., 57450.])\
,[4.1842568256830805, 0.0024142619692320614, -4.4047157719020557e-07, 3.152367579602963e-11],[,]\
[12.105844837154114, 7.6061533791183688e-05, -2.1586538714396644e-07, 5.9233904084838232e-11],[,]\

```

Tabla 8: coeficientes del modelo entre 2001-2008 ($f_{10.7cm} \geq 150$)

```

\
Jan':([ 36150., 41475., 41475., 46800., 46800., 52125., 52125., 57450.]\
,[[16.458234003023453, -0.00062413684538291587, 7.4326260015151546e-07, -2.3399525815731182e-10],[,]\
[17.783907994090224, 1.6195604379905704e-05, -5.0276214953628959e-07, 1.0824985923133284e-10],[,]\
[13.466256617208431, -0.0011262666345669056, 7.3668350870621075e-08, 8.766375563946345e-12],[,]\
[8.7339541055322698, -0.0006096946371302634, 1.2034930074876748e-07, 8.2710093217823564e-11],[,],3)\
,'Feb':([ 36750., 41925., 41925., 47100., 47100., 52275., 52275., 57450.]\
,[[12.631533829731692, -0.0014574175952450914, 1.1842403641344454e-06, -3.214047011000616e-10],[,]\
[13.522847633154996, 0.00036731690245063892, -4.7902896405870121e-07, 1.2289632242439666e-10],[,]\
[11.84805985811675, -0.00046603782418964739, 1.5695950448763586e-07, -6.8717651961270507e-12],[,]\
[11.379324914000728, 0.00025421252813151104, 1.2139811959778897e-07, -4.1434962564325763e-11],[,],3)\
,'Apr':([ 37650., 41850., 41850., 46050., 46050., 50250., 50250., 54450.]\
,[[19.487463568348112, 0.0027617695296013522, -1.1697838953761732e-06, 6.8744675547711223e-11],[,]\
[21.618260889119028, -0.0015449947926482876, -8.8105625807609655e-07, 3.8754025995112573e-10],[,]\
[12.14371369364309, -0.0018273259837978696, 7.4661283371920916e-07, -1.3542786232483598e-10],[,]\
[9.3818065111079179, 0.000113974172117417, 1.7781581195465315e-07, -4.4875354106396931e-11],[,],3)\
,'Jun':([ 36150., 41250., 41250., 46350., 46350., 51450., 51450., 56550.]\
,[[17.796880667030837, 0.00086277376035884192, 1.2497224822965026e-07, -1.2806754442106852e-10],[,]\
[20.99090962725613, -0.00016538618886502727, -5.2817222831739069e-07, 1.7590110082423592e-10],[,]\
[17.167469722344119, -0.00057147073706637064, 3.6892338588571598e-07, -1.6936391831054244e-10],[,]\
[15.306435408782248, -0.0008925392266766098, -4.948325974976437e-07, 2.4846529241681157e-10],[,],3)\
,'Jul':([ 36150., 41475., 41475., 46800., 46800., 52125., 52125., 57450.]\
,[[18.503289838208339, 0.001092258626199453, -2.702371479054744e-07, 3.5277478702619243e-11],[,]\
[21.375974933548665, 0.00015340329211972336, -8.2384573814562607e-08, -4.6159132489351864e-12],[,]\
[20.908652117855652, -0.00035073811600304112, -1.0696431186529684e-07, -1.7151330075117369e-11],[,]\
[17.092827885391095, -0.0011634914186180272, -1.9829514451560916e-07, 1.2268977630470601e-10],[,],3)\
,'Aug':([ 36150., 41475., 41475., 46800., 46800., 52125., 52125., 57450.]\
,[[17.20920778509883, -6.7229194095950578e-05, -1.497233725109119e-07, 3.1463429509105054e-11],[,]\
[15.520259046642597, -0.00041842354852860553, 1.7819389625398843e-08, 1.883203502226382e-12],[,]\
[13.592185594128354, -0.00029683559261756213, 2.7847448275246263e-08, -1.4125987799654314e-11],[,]\
[12.050862762326055, -0.0003488235369530087, -4.7373436757992874e-08, 7.5537854156477418e-12],[,],3)\
,'Sep':([ 36150., 41475., 41475., 46800., 46800., 52125., 52125., 57450.]\
,[[19.322019312906257, 0.00060118459160198425, -2.2783570946065186e-07, 2.4927219730239958e-11],[,]\
[19.920424162928299, -0.00025862711379486404, -9.5098264397638929e-08, 9.1358238323181952e-12],[,]\
[17.424858065520741, -0.00063549937438493373, -4.6450002490252144e-08, 3.8739489538941291e-11],[,]\
[14.357167634763725, -0.00033360441861819337, 1.598377793041929e-07, -6.5825586625300893e-12],[,],3)\
,'Oct':([ 32550., 38100., 38100., 43650., 43650., 49200., 49200., 54750.]\
,[[13.523306185544993, -0.00072242891980468088, 6.5607089512572345e-07, -1.643488729837817e-10],[,]\
[14.935458106095892, 0.00038758646809763572, -2.5606534993487996e-07, 5.0188275283241443e-11],[,]\
[14.572816556557001, -0.00026061404933552226, 2.2479577887054788e-08, -1.2771298112667507e-11],[,]\
[13.108738364822717, -0.00033254634711975495, -4.8401126638335568e-08, 1.7984355215926277e-10],[,],3)\
,'Nov':([ 36150., 40725., 40725., 45300., 45300., 49875., 49875., 54450.]\
,[[13.226588688952939, -0.001279299258111059, 1.5211945108825513e-06, -5.7329663862287911e-10],[,]\
[14.143984583222398, -0.00031956284921183032, -1.1016376108171996e-06, 4.3790609341688825e-10],[,]\
[8.1418094618492525, -0.00077673080543799169, 9.0178276656516891e-07, -2.9761062943454314e-10],[,],3)\

```

BIBLIOGRAFÍA

Alken P.: *A quiet time empirical model of equatorial vertical plasma drift in the Peruvian sector based on 150 km echoes*, Journal of Geophysical Research, Vol. 114, A02308, doi:10.1029/2008JA013751, 2009.

Anderson D. and Anghel A, Chau J. and Veliz O.: *Daytime vertical ExB drift velocities inferred from ground-based magnetometer observations at low latitudes*, Space Weather, Vol. 2, S11001, doi: 10.1029/2004SW000095, 2004.

Bothmer, V. And Daglis, I. A.: *Space Weather-Physics and Effects*, Springer Praxis Books, Chichester, UK, 2007.

Chau J. L. and Woodman Ronald F.: *Daytime vertical and zonal velocities from 150km echoes: Their relevance to F-region dynamics*, Geophysical Research Letters, Vol. 31, doi: 10.1029/2004GL020800, 2004.

Chau J. L. and Kudeki E.: *Statistics of 150-km echoes over Jicamarca based on low-power VHF observations*, Ann Geophysics., 24, pages 1305-1310, 2006.

Chau J. L., Fejer B. G., and Goncharenko L. P.: *Quiet variability of equatorial ExB drifts during a sudden stratospheric warming event*, Geophysical Research Letters, Vol. 36, doi: 10.1029/2008GL036785, 2009.

Condori L., Pinedo H., Cordova D., y Kuyeng K.: *JULIA Report*, Radio Observatorio de Jicamarca, 2008.

Da Silveira Rodrigues Fabiano: *Incoherent and coherent scatter radar studies of the equatorial F region*, A dissertation presented to the Faculty of the Graduate School of

Cornell University in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy, Cornell University, 2008.

Draper N. And Smith H., *Applied Regression Analysis*, 2nd Ed, John Wiley & Sons, USA, 1981.

Ezquer Rodolfo G. y Radicella Sandro M.: *Ionosfera de bajas latitudes: efectos sobre señales de satélites recibidas de Tucumán*, Física de la tierra, Vol. 20, paginas 61-81, 2008.

Fawcett C. D.: *An investigation of equatorial 150km irregularities*, Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering in the Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign, 1999.

Fejer B. G. and Farley D. T., Woodman R. F. and Calderon C.: *Dependence of equatorial F region vertical drifts on season and solar cycle*, Journal of Geophysical Research, Vol. 84, NO. A10, pages 5792-5794, 1979.

Fejer B. G. and Scherliess L.: *Empirical models of storm time equatorial zonal electrical fields*, Journal of Geophysical Research, Vol. 102, NO. A11, pages 24,047-24,056, 1997.

Fejer B. G., Scherliess L.: *On the variability of equatorial F-region vertical plasma drifts*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 63, pages 893-897, 2001.

Fejer B. G., Souza J. R., Santos A. S., and Costa Pereira A. E.: *Climatology of F region zonal plasma drifts over Jicamarca*, Journal of Geophysical Research, Vol. 110, A123 10, doi: 10.1029/2005JA011324, 2005.

Fejer B. G., Jensen J. W., and Su Shin-Yi: *Quiet time equatorial F region vertical plasma drift model derived from ROCSAT-1 observations*, Journal of Geophysical Research, Vol. 113, A05304, doi: 10.1029, 2008.

Kelley Michael C.: *The Earth's Ionosphere Plasma Physics and Electrodynamics*, Second Edition, Elsevier, USA, 2009.

Kudeki E. and Fawcett C. D.: *High resolution observations of 150km echoes at Jicamarca*, Geophysical Research Letters, Vol. 20, NO. 18, pages 1987-1990, 1993.

Maus Stefan: *Conductivity of the ionosphere*, CIRES, University of Colorado, 2006.

Richard L. Burden, J. Douglas Faires, *Numerical Analysis*, Ninth Edition, Brooks/Cole, Boston, USA, 2011.

Richards P. G., Fennelly J. A., Torr D. G.: *EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations*, Journal of Geophysical Research, Vol. 99, NO. A5, pages 8981-8992, 1994.

Rishbeth H. and Garrioth O. K.,: *Introduction to Ionospheric Physics*, Academic Press, London/New York, 1969.

Scherliess L. and Fejer B. G.: *Storm time dependence of equatorial disturbance dynamo zonal electric fields*, Journal of Geophysical Research, Vol. 102, NO. A11, pages 24,037-24,046, 1997.

Scherliess L. and Fejer B. G.: *Radar and satellite global equatorial F region vertical drift model*, Journal of Geophysical Research, Vol. 104, NO. A4, pages 6829-6842, 1999.

Schmahl E. J. and Kundu M. R.: *Synoptic radio observations*, Synoptic Solar Physics ASP Conference Series, Vol. 140, pages 387-399, 1998.

Tapping K. F.: *Recent solar radio astronomy at centimeter wavelengths: The temporal variability of the 10.7cm flux*, Journal of Geophysical Research, Vol. 92, NO. D1, pages 829-838, 1987.

Woodman R. F., Rastogi R. G., Calderon C.: *Solar cycle effects on the electrical fields in the equatorial ionosphere*, Journal of Geophysical Research, Vol. 82, NO. 32, pages 5257-5261, 1977.

Zhao J. and Han Yan-Ben: *Historical Dataset Reconstruction and a Prediction Method of Solar 10.7cm Radio Flux*, Chin J. Astron. Astrophys., Vol. 8, No. 4, 472-476., 2008.