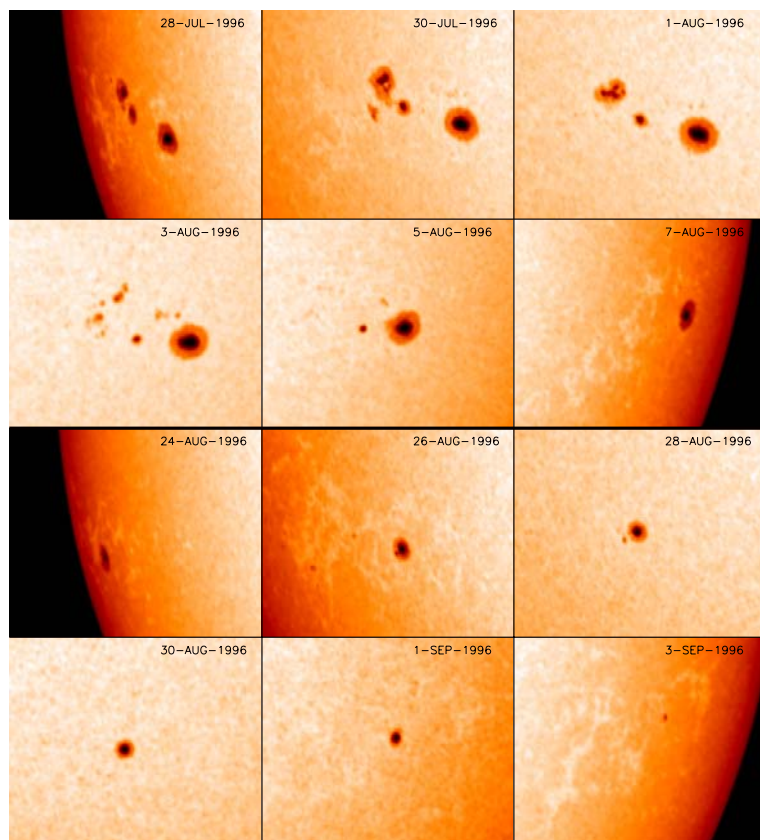


Solar irradiance variations induced by faculae and small magnetic elements in the photosphere



Memoria presentada por
Ada Ortiz Carbonell
para optar al grado de
Doctora en Física

Barcelona, julio de 2003

PROGRAMA DE DOCTORADO DE ASTRONOMÍA Y METEOROLOGÍA

BIENIO 1998–2000

Memoria presentada por **Ada Ortiz Carbonell** para optar al grado
de Doctora en Física

DIRECTORES DE LA TESIS

Dr. Blai Sanahuja Parera

Dr. Vicente Domingo Codoñer

A Jordi,
A mis padres

Agradecimientos - Agraïments - Acknowledgements

Llegados a este punto, tras casi seis largos años de trabajo, dificultades, alegrías y penas (más alegrías que penas), se hace necesario dar las gracias a diversas personas e instituciones. Cada una ha contribuido a su manera y de diferentes formas a que esta tesis llegue ahora a su fin.

En primer lugar debo dar las gracias a mis directores de tesis, los Drs. Blai Sanahuja y Vicente Domingo. Sin ellos la realización de esta tesis no hubiera sido posible, y aunque suene a tópico, en este caso es completamente cierto. Doy sinceramente las gracias a Blai por haber confiado en mí cuando Vicente quiso iniciar una nueva línea de trabajo en el Departamento, y a los dos por ayudarme de tantas maneras a llevarla adelante, con su saber hacer y su calidad humana y científica. Gracias a Vicente por aportar su increíble experiencia, su diplomacia y su modestia, y en definitiva por no dejar de sorprenderme. Muchas gracias a los dos.

My sincere thanks to Dr. Sami Solanki for contributing with your ideas and knowledge to the improvement of this Thesis. Thanks for your willingness to establish a collaboration which led to the publication of a paper, for your enlightening discussions and for your warm welcome during my visits to the ETHZ in Zürich and MPAe in Lindau. Thanks also to Dr. Marcel Fligge from the Institute für Astronomie/ETHZ for your helpful discussions, for your patience answering my questions and for providing me with the necessary routines. I still think it's a pity that you decided to leave the business. Dr. Natalie Krivova from MPAe is also acknowledged for providing necessary routines.

Gracias al Dr. Luis Sánchez Duarte por su acogida durante mi visita a GSFC/NASA y por ayudarme en mis primeros pasos con la programación en IDL.

Quiero agradecer a los compañeros del Departament d'Astronomia i Meteorologia su ayuda durante estos años, respondiendo a mis preguntas sobre LaTeX, linux, astronomía y un largo etcétera, y por hacer más entretenida la vida en el departamento con debates, discusiones, chistes, divagaciones y demás. Especialmente a Marc, Eduard, David, Teresa, Andreu, Àngels, Aina, Lola, Ignasi, Pep, Francesc, Josep Miquel y Octavi. Muchas gracias a Lola por ayudarme con la “decoración” de la tesis.

Gràcies especialment al Marc Ribó qui, en les darreres setmanes de preparació

de la seva tesi (moments prou difícils com he pogut constatar) em va explicar com funcionaven els estils per escriure aquesta tesi. Aquest agraïment és extensible a l'Óscar Morata (pare de l'estil tesi) per fer-nos la vida més fàcil en tot allò referent al linux i al LaTeX. També per explicar-me com van ser altres èpoques al departament.

Menció especial per a l'Àngels, companya de "pis" durant aquests llargs sis anys, que m'ha aguantat totes les meves manies i el meu vici per l'ordre. T'agraeixo el teu ajut, i les tertulies i discussions que hem mantingut durant aquest temps. Hem passat juntes les penes i alegries pròpies d'una tesi. A la Neus, nou fitxatge del grup, li dessitjo sort en la seva tesi. A totes dues, gràcies pels vostres ànims aquests darrers dies.

A JR (el indispensable) le agradezco su ayuda a la hora de resolver toda clase de problemas burocráticos, haciendo fáciles las (no tan sencillas) gestiones relacionadas con la tesis.

A Jaume Soley le quiero agradecer que me haya enseñado el linux suficiente para sobrevivir durante este tiempo. Gracias por tu disponibilidad para apagar fuegos en todo momento.

No quiero olvidarme de la gente que conocí en mis diversas estancias en el extranjero, y que hicieron mucho más amenos los días fuera de casa con cenas, fiestas y excursiones. En especial gracias a Lina, Nuria y Juan Manuel.

A Gonzalo Camps le quiero agradecer el haberme introducido en el arte del Budo TaiJutsu. Aunque solo he asomado la cabeza, veo un largo (interminable diría) camino por recorrer. Gracias al Budo creo que me conozco un poquito mejor. *Domo arigato Gozaimashita*. También doy las gracias a los compañeros de entreno, sobre todo a Oriol, por ayudarme siempre y animarme cuando no me sale nada. *Gambatte kudasai!*

Por último llegan los agradecimientos que para mí tienen más importancia. A mis padres les agradezco todo, desde su ayuda y soporte continuo hasta el estar siempre ahí cuando lo necesito. Aunque no se me da muy bien expresarlo, nunca se lo agradeceré suficiente. Finalmente, Jordi. No imagino los últimos diez años sin tu apoyo. Gracias por estar a mi lado, por ser así, por escucharme y animarme siempre, sobre todo cuando más lo necesito.

Esta tesis se ha realizado en el Departament d'Astronomia i Meteorologia de la

Universitat de Barcelona, al que agradezco el haberme acogido durante este tiempo y haber aportado los medios necesarios para su realización.

Agraeixo a la Generalitat de Catalunya el seu ajut econòmic mitjançant una beca per a l'acabament de tesis doctorals (2001TDOC-00021). Agradezco también al Ministerio de Ciencia y Tecnología su ayuda económica mediante un contrato a cargo del proyecto de investigación financiado AYA2001-3304 y a la Agencia Espacial Europea una beca a cargo del contrato ESA/ESTEC Contract 14098/99/NL/MM.

I am grateful to the following research centers for their hospitality and for providing me with the necessary equipment during my research stays: Goddard Space Flight Center/NASA (Maryland, USA), ESTEC/ESA (Noordwijk, The Netherlands), Institute für Astronomie/ETHZ (Zürich, Switzerland) and the MPAe/MPG (Katlenburg-Lindau, Germany).

“Magnetic fields in astronomy are just like sex in psychology. For many years these two great forces were completely ignored in their respective subjects, but now people try to explain everything using them.”

van de Hulst, 118th meeting of the AAS, March, 1965

Contents

Resumen de la tesis	xiii
1 Introduction	1
1.1 Photospheric magnetic structures	2
1.2 A brief historical overview	6
1.2.1 The discovery of sunspots and the solar magnetic field	6
1.2.2 Changes in the Sun's brightness and its link to the Earth's climate	7
1.3 Solar irradiance variations	8
1.3.1 Sources of solar irradiance variations	11
1.3.2 Contrast of faculae and small magnetic elements	12
1.3.3 Photometric observations and theoretical flux tube models	15
1.4 Motivation of the thesis	16
2 Instrumentation and data analysis	21
2.1 The Solar and Heliospheric Observatory	21
2.1.1 The VIRGO experiment	26

2.1.2	The SOI/MDI experiment	28
2.2	Data sets	30
2.3	VIRGO data reduction	31
2.3.1	Variation of the limb darkening with distance	32
2.3.2	Instrumental degradation	34
2.3.2.1	LOI	34
2.3.2.2	The polynomial fitting, FFT and PPN algorithms	38
2.3.2.3	SPM sunphotometers	42
2.3.3	Calibration	42
2.4	MDI data analysis	44
3	Excess facular emission from an isolated active region: AR 7978	55
3.1	Introduction	55
3.2	Data sets and observations	56
3.3	Evolution of the Angular Distribution	61
3.4	Total Facular Emission	67
3.5	Comparison with MDI	70
3.6	Discussion and Conclusions	74
4	The contrast of photospheric faculae and network elements	77
4.1	Introduction	78
4.2	Data and analysis procedure	81
4.2.1	Data sets	81

4.2.2	Reduction method and analysis	82
4.3	Results	87
4.4	Discussion	95
4.4.1	Comparison with previous observations	95
4.4.2	Comparison with flux-tube models	97
4.5	Conclusions	99
5	Solar cycle evolution of small photospheric magnetic elements	101
5.1	Introduction	101
5.2	Data and analysis procedure	103
5.2.1	Data sets	103
5.2.2	Reduction method and analysis	104
5.2.3	Technical obstacles and solutions adopted	109
5.3	Results	111
5.3.1	Solar cycle evolution of the facular contrast	111
5.3.1.1	Checking the results	116
5.3.2	Magnetic field distributions	119
5.3.3	Solar surface structures: image decomposition	123
5.4	Discussion and Conclusions	132
6	Summary and future perspectives	135
A	Lost in the space	139

B Exceptions to the use of the PPN algorithm	141
C Evolution of the facular contrast with the solar cycle	145
D Contrast evolution of the AR and QS components with the solar cycle	161
Bibliography	174

Resumen de la tesis:

Variaciones de la irradiancia solar inducidas por fáculas y pequeños elementos magnéticos de la fotosfera

1. Introducción

La última interacción de los fotones generados en las reacciones termonucleares que se producen en el centro del Sol con el plasma solar tiene lugar en la fotosfera y, después, muy infrecuentemente, en la cromosfera y la corona. El estudio de la atmósfera solar es importante porque es la única atmósfera que puede ser resuelta espacialmente, y porque el plasma solar y los campos magnéticos asociados se hallan en unas condiciones imposibles de generar en los laboratorios terrestres. Sin embargo, sólo la fotosfera y la cromosfera pueden ser observadas de forma regular desde Tierra, mientras que la región de transición, la corona y el viento solar se tienen que estudiar desde el espacio; puede también añadirse que muchas propiedades de la fotosfera no han sido descubiertas o analizadas hasta el advenimiento de los observatorios espaciales. Éste es el caso de la variabilidad solar.

El disco solar es una panoplia que exhibe todo un espectro de estructuras magnéticas, caracterizadas por su tamaño, intensidad y compacidad (ver tabla 1.1), cuyas propiedades dependen del flujo magnético que contienen. Incluso las zonas de la superficie solar externas a las regiones activas – el Sol en reposo, Sol no activo o Sol

en calma – contienen débiles estructuras magnéticas. Las manchas solares son las concentraciones mayores y más compactas de campos magnéticos, y poseen umbra y penumbra; los poros, manchas pequeñas, carecen de penumbra. Las fáculas y los elementos de la red (o retículo) magnética son concentraciones de flujo magnético intenso, brillantes respecto a la fotosfera puesto que su temperatura es superior a la del plasma contiguo; las fáculas se muestran en estructuras compactas, pero los elementos que constituyen la red, en cambio, están mucho más dispersos.

Fuera de las regiones activas, los elementos brillantes dispersos conforman el retículo no activo, el cual prácticamente resigue la frontera de los supergránulos. En esta jerarquía de estructuras, los nudos o puntos magnéticos se hallan entre las manchas y poros y las fáculas, muy probablemente se corresponden con los microporos, que son estructuras menores con un núcleo oscuro. Se estima que la dimensión característica de estas estructuras de transición entre los puntos brillantes y los microporos oscuros es de unos 300 km.

Manchas y poros son estructuras compactas con un factor de llenado del 100%; el factor de llenado es la fracción de la superficie solar que hay en un píxel, cubierta por tubos de flujo magnético. En cambio, las fáculas y el retículo presentan un factor de llenado inferior al 25%, aunque localmente puede llegar al 50%. La figura 1.1 muestra una imagen de alta resolución de una porción del disco solar en la que pueden verse todas estas estructuras. Más del 90% del flujo magnético medido que emerge a la fotosfera está concentrado en regiones de campo magnético intenso (1000-2000 G). Si se quieren llegar a entender los mecanismos que subyacen y generan el ciclo solar, es imprescindible entender la física de estos elementos magnéticos fotosféricos, así como clarificar la contribución de las pequeñas estructuras a la variación de la irradiancia solar.

1.1 Variaciones de la irradiancia solar

La irradiancia solar, mal llamada “constante solar”, se define como la cantidad de energía que incide perpendicularmente sobre la unidad de área por unidad de tiempo, a 1 UA del Sol; vale $1366 \pm 3 \text{ W m}^{-2}$. La irradiancia solar presenta variabilidad en todas las escalas temporales; puede oscilar hasta un 0.3% en días o semanas, debido al paso de grandes grupos de manchas sobre el disco, y del orden de un 0.1% entre el máximo y el mínimo del ciclo solar, siendo mayor en el período de los máximos que

durante los mínimos del ciclo. La escala temporal de interés en este trabajo está entre la duración de una rotación solar y la del ciclo solar. Las observaciones realizadas estas dos últimas décadas con radiómetros embarcados en satélites y observatorios espaciales, han permitido construir series temporales de la irradiancia, a partir de las cuales es posible analizar su variabilidad. El hecho de que varíe en diversas escalas temporales y con cambios distintos en el visible, infrarrojo o ultravioleta, afecta a la temperatura de la superficie de la Tierra y de la atmósfera y, por tanto, al clima de nuestra biosfera.

La tabla 1.2 resume los mecanismos identificados que generan variaciones de la irradiancia solar; se constata que la mayor parte de las variaciones son debidas a la presencia y evolución de las estructuras magnéticas existentes sobre el disco. Es interesante resaltar que dos décadas atrás la contribución de las fáculas a la variabilidad de la irradiancia no estaba aceptada, y que aún hoy se discute si su contribución es la única relevante que debe considerarse cuando se pretende explicar las variaciones observadas a escala del ciclo solar. En la base de esta discusión está la aparente pérdida de una componente brillante, asociada a fáculas y retículo, muy posiblemente a causa de los límites de resolución de las observaciones. El brillo de estas estructuras magnéticas depende fuertemente de su propio tamaño y del ángulo heliocéntrico (ángulo bajo el cual son vistas desde la Tierra, u otro puesto de observación en el espacio). En particular, la cuantificación de la contribución del retículo a la irradiancia es difícil, y especialmente si se quiere distinguir entre retículo asociado a regiones activas y el asociado al Sol en reposo.

1.2 Contraste, observaciones fotométricas y modelos teóricos

Los primeros modelos para describir las fluctuaciones de la irradiancia, basados en las observaciones, se desarrollaron en los años 80. El PSI (Photometric Sunspot Index, fórmula 1.1), aplicado al contraste en manchas, ha sido una herramienta fundamental en su desarrollo. La contribución de las fáculas puede estimarse a partir del PFI (Photometric Facular Index, fórmula 1.2). Este índice requiere conocer las variaciones del contraste facular entre el centro y el limbo — la CLV o *center-to-limb variation* —, así como la función de oscurecimiento hacia los limbos (LD, *limb darkening*). La forma funcional de la CLV para el contraste facular está muy mal definida, y es una de las mayores fuentes de error en la evaluación de estos índices, esencialmente porque el contraste facular se debe a estructuras no resueltas de bajo

contraste. Ello ha dado lugar a una extensión de este tipo de indicadores según la longitud de onda a la cual se realizan las observaciones.

La dificultad en las observaciones de fáculas y pequeños elementos magnéticos, y el hecho de haber sido realizadas a diferentes longitudes de onda, con distintas resoluciones y para una diversidad de intensidades de campo magnético, se traduce en una gran discrepancia en los resultados de las medidas derivados y publicados en la literatura. En consecuencia, también existen diferentes modelos teóricos para explicar y predecir las propiedades físicas de las pequeñas estructuras magnéticas, aunque ninguno de ellos consigue explicar totalmente aquellas, aceptando que sean correctas.

Por lo que se refiere a los modelos geométricos, forma gráfica simplificada de explicar los modelos de transporte e interacción microscópica materia-campo de radiación, el modelo genérico actualmente más aceptado es el de “pared caliente”. En este modelo (ver figura 1.4), la emisión facular proviene de las paredes más calientes de los tubos cilíndricos de flujo magnético de la fotosfera, parcialmente evacuados a causa de la presión magnética interior. Cuando la estructura está en el centro del disco, su fondo más oscuro (debido a que el campo magnético inhibe la convección) es directamente visible, si su diámetro transversal es mayor que el mínimo característico que distingue los microporos de los nudos brillantes. A medida que la estructura se desplaza hacia el limbo, las paredes calientes van sustituyendo al fondo oscuro en la línea de visión; en consecuencia, aumenta el brillo de la fácula y su contraste. Al aproximarse más al limbo, las paredes laterales más calientes devienen menos visibles, la estructura se vuelve menos brillante y ofrece un menor contraste respecto a su entorno; en el limbo las paredes dejan de ser visibles y la estructura facular se desvanece. Las observaciones del CLV para el contraste facular favorecen claramente al modelo de pared caliente frente a otros, como el de “colina-nube caliente” y, por tanto, será el que básicamente se considerará en este trabajo.

1.3 Objetivos de la tesis

Pretendemos analizar en detalle el contraste de los pequeños elementos magnéticos que aparecen en la superficie del disco solar y su contribución a la variabilidad de la irradiancia, tanto para escalas temporales cortas (rotación solar) como largas (ciclo solar). Concretamente, pretendemos estudiar la dependencia del contraste facular y

del retículo magnético respecto al ángulo heliocéntrico y al campo magnético asociado. Es importante hacerlo porque: (1) permitirá mejorar los modelos que intentan reproducir las variaciones de la irradiancia solar, teniendo en cuenta que la contribución de las fáculas asociadas a regiones activas y la del retículo pueden ser diferentes; (2) se podrá evaluar la importancia de las fáculas en el balance energético; (3) proporcionará nuevas restricciones observacionales a los modelos existentes, puesto que las características de la CLV del contraste dependen de las propiedades de los tubos; y (4) eliminará incertidumbres.

Las medidas previas existentes del contraste facular corresponden esencialmente a observaciones fotométricas que no distinguen las distintas estructuras presentes en el disco por su flujo magnético; muy pocos estudios incluyen el campo magnético y, en todo caso, se refieren a sucesos individuales o aislados. El gran elemento diferenciador de este trabajo es la utilización de los datos proporcionados por los instrumentos MDI y VIRGO embarcados en el observatorio solar espacial SOHO. Aunque la resolución de MDI en modo disco global es inferior a observaciones hechas desde tierra en modo de alta resolución, la calidad, continuidad, estabilidad y extensión temporal de los datos que SOHO proporciona compensan ampliamente su inferior resolución.

En esta tesis intentaremos dar respuesta a parte de las cuestiones listadas anteriormente, a partir de la gran ventaja que supone poder combinar simultáneamente datos fotométricos y magnéticos para todo el disco solar, durante un período de seis años (1996-2001), coincidiendo con la parte ascendente del ciclo solar 23. Se estudiará una región activa aislada para comprender mejor la contribución de las diversas estructuras a la irradiancia. Se espera obtener una función bidimensional que describa el contraste en función de la posición y el campo magnético promediado; hasta donde sabemos, no existe hasta el momento ninguna determinación similar. Se procederá asimismo, y también por primera vez, a analizar la evolución del contraste de las estructuras faculares y del retículo con el ciclo solar.

2. Instrumentación y análisis de los datos

El observatorio SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) es una plataforma espacial estabilizada en sus tres ejes dedicada a la observación del Sol; lanzado en 1995, es operativo desde febrero de 1996. SOHO se halla en una órbita halo en torno al punto lagrangiano interno del sistema Sol-Tierra, a un millón y medio de kilómetros por delante de la Tierra en dirección al Sol, en la línea Sol-Tierra (figura 1.2). Su carga científica consta de 12 instrumentos (descritos sucintamente en la tabla 2.2) dedicados a la investigación heliosismológica y al estudio de la corona y del viento solar; de todos ellos, utilizaremos los datos recogidos por los experimentos VIRGO y SOI/MDI.

2.1 Los experimentos VIRGO y SOI/MDI embarcados en SOHO. Los datos

El experimento VIRGO (Variability of solar IRradiance and Gravity Oscilations) proporciona de manera continua datos sobre la irradiancia total y espectral, la irradiancia espectral, medidas de los diámetros polar y ecuatorial del Sol, así como frecuencias, amplitudes y fase de los modos de oscilación de la fotosfera solar. Este instrumento está formado por tres detectores integrados: dos radiómetros absolutos (DIARAD y dos PMO6-V), un fotómetro solar espectral (SPM) y fotómetro solar que resuelve el disco (LOI). Los radiómetros se utilizan para medir la irradiancia total y sus variaciones con mucha precisión. El fotómetro SPM dispone de tres canales espectrales, a 402, 500 y 862 nm, con los que mide las oscilaciones solares; este detector está doblado en uno de repuesto, utilizado para medidas de alta precisión de la irradiancia espectral y para corregir la degradación instrumental causada por el flujo de radiación corpuscular solar. LOI es un telescopio Ritchey-Chrétien que resuelve el disco solar en doce píxeles, a 500 nm, y que permite visualizar las oscilaciones de luminosidad sobre el disco.

El experimento SOI/MDI (Solar Oscillations Investigation/Michelson Doppler Imager) se utiliza para medir las manifestaciones fotométricas de las oscilaciones solares. Su principal objetivo es medir la estratificación interna y la dinámica del Sol, pero también realiza medidas del campo magnético solar y de intensidad en el continuo. Estos dos últimos observables son los que interesan para nuestro trabajo.

MDI puede trabajar en modo de disco completo a baja resolución, o a alta resolución sobre regiones reducidas del disco; su modo habitual de trabajo es el de baja resolución.

Los datos de VIRGO y MDI se clasifican en diversos niveles según su grado de procesamiento. En el nivel cero se tiene los datos en bruto y las calibraciones y correcciones asociadas a los efectos instrumentales conocidos a priori. El nivel superior incluye correcciones que consideran la distancia de SOHO al Sol, el tamaño real de los píxeles de los detectores, el efecto LD y los efectos de la velocidad de SOHO sobre las imágenes, entre otros. Sucesivos niveles consideran la calibración en unidades físicas o la descomposición de los observables, por ejemplo, en armónicos esféricos; las tablas 2.4 y 2.5 resumen las características de estos niveles para cada instrumento. Sucintamente, puede decirse que hemos partido de datos poco tratados (niveles bajos) pues muchas de las correcciones a tomar en consideración no están definidas, o si lo están, no están estandarizadas y no se puede garantizar el conocimiento exacto del proceso seguido con los datos originales y aplicarlo coherentemente a otras cohortes.

2.2 Reducción de datos de VIRGO

Se han utilizado datos de nivel 0 de VIRGO promediados cada 96 minutos para simular la cadencia de los magnetogramas proporcionados por MDI. Los valores de la irradiancia solar se utilizan promediados cada 60 minutos, corregidos de todos los efectos que los distorsionan. El objetivo del proceso de reducción es transformarlos en datos de nivel 2 tras corregir el efecto LD (variable con la distancia, véase la figura 2.4); ello implica disponer de un modelo que contemple la falta de linealidad de la respuesta del detector frente al efecto LD. Se ha aplicado un método original y se ha comparado con el propuesto por el protocolo de reducción de SOHO, viendo que los resultados obtenidos son muy similares. Estas correcciones sólo se aplican a los datos de LOI pues es el único detector de VIRGO que produce imágenes del Sol. Seguidamente, todas las medidas de la irradiancia y de la radiancia se normalizan a 1 UA.

La sensibilidad instrumental se reduce con el tiempo a causa de la radiación ultravioleta y el flujo de partículas que penetran por las ventanas y filtros de los detectores. La figura 2.5 muestra este efecto para dos píxeles de LOI; como no

se puede acceder al instrumento, no es posible calibrar in situ los efectos de la degradación. Para eliminar este sesgo instrumental en LOI y SPM se han realizado ajustes polinómicos a cohortes de datos de la irradiancia solar para periodos extensos entre los años 1996 y 1997; previamente se ha tenido que extraer del conjunto de datos, aquéllos que no son atribuibles a la degradación instrumental, sino que están asociados al paso de regiones activas. La figura 2.6 muestra ejemplos de las radiancias relativas obtenidas al final de este proceso, para algunos píxeles.

La degradación instrumental se ajusta bien a una ley polinómica, pero este hecho no tiene un significado físico claro, por tanto se han desarrollado dos protocolos alternativos con el mismo objetivo. El primero utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para crear un filtro con una frecuencia de corte igual al inverso del período de rotación solar. El segundo, parte de la hipótesis que los píxeles polares de LOI casi nunca detectan actividad solar – se discute la verosimilitud de esta hipótesis – y se utilizan para medir la degradación temporal bajo ciertas condiciones. Los resultados y ventajas de cada método se contrastan, concluyéndose que el FFT no es útil, y que el método de los píxeles polares es más fiable que el del ajuste polinómico, siendo los resultados similares en ambos casos. La figura 2.10 muestra ejemplos de los resultados obtenidos, siguiendo la misma metodología, para datos de SPM; se puede claramente apreciar los signos de la actividad solar superpuestos a un fondo plano correspondiente al Sol en reposo.

Los valores de las irradiancias espectrales no son directamente comparables puesto que el Sol no emite el mismo flujo de energía a cada longitud de onda. Es necesario, por tanto, calibrar los datos respecto al espectro solar de referencia (ver tabla 2.8); se consigue así que los datos de SPM y LOI queden convertidos en medidas relativas respecto al fondo del Sol en calma. Una última corrección a aplicar a los datos de LOI debe corregir la intensidad de las diferentes señales, según el tamaño del píxel y de su posición sobre la matriz detectora del CCD; la señal de cada píxel ha de ser recalibrada considerando la relación original entre las señales de los diversos píxeles. La figura 2.11 muestra el resultado final para un conjunto de datos de LOI, durante las rotaciones Carrington 1912, 1913 y 1914. A partir de este punto, los datos pueden ser analizados e interpretados físicamente.

2.3 Análisis de datos de MDI

Los datos de MDI utilizados han sido previamente reducidos y son de nivel 1, por tanto, no hace falta corregirlos de efectos instrumentales. Sin embargo, la determinación del contraste de pequeñas estructuras magnéticas requiere un protocolo que permita identificar la distribución de aquellos elementos que dan lugar a una contribución positiva a las variaciones de la irradiancia. Esto implica calcular el nivel de ruido de cada magnetograma empleando magnetogramas que muestren la menor actividad solar posible en ellos (o eliminándola con máscaras). La tabla 2.9 es una lista de los 16 magnetogramas utilizados; una vez derivado el ruido para cada uno de ellos, se ha determinado la mediana de las desviaciones estándar calculadas para eliminar cualquier posible fluctuación diaria asociada a la actividad solar; el resultado puede verse en la figura 3.2.

Todas las imágenes de intensidad han sido corregidas del efecto LD y rotadas para co-alinearlas al mismo tiempo (de observación) que su correspondiente magnetograma. Se trata de un paso muy delicado pues si la superposición no está bien hecha, dentro de la resolución de las imágenes, las imágenes de la intensidad y los magnetogramas no pueden compararse píxel a píxel. Este procedimiento de rotación también se utiliza para promediar magnetogramas (para los píxeles comunes) y crear un magnetograma promediado con una relación señal-ruido menor; de esta forma podremos observar estructuras del retículo más débiles.

También es necesario derivar el valor medio y la desviación estándar de la intensidad del continuo del Sol en reposo, para cada imagen. El método empleado es similar al utilizado para derivar el ruido instrumental de los magnetogramas, sólo que excluyendo aquellos píxeles que se consideren del Sol en reposo; estos píxeles son aquéllos cuya señal magnética absoluta esté 0.5 veces por debajo del ruido instrumental. El mapa de los píxeles que cumplen esta condición constituye el mapa del Sol en reposo, el cual se utiliza como intensidad de fondo cuando no hay actividad presente en el disco solar. La figura 2.14 muestra uno de estos mapas, las fluctuaciones presentes son inferiores al 2%, y muy probablemente están asociadas a la bondad de la corrección del efecto LD.

El último paso en el proceso de reducción requiere seleccionar los píxeles que presentan actividad magnética y que están asociados a contribuciones brillantes (positivas) de las variaciones de la irradiancia. Estos puntos se identifican fijando

dos umbrales en cada par magnetograma-imagen de intensidad. Un píxel se considera magnéticamente activo cuando su señal tiene un valor superior a tres veces la desviación estándar. El segundo umbral se emplea para eliminar (enmascarar) las manchas y poros, descartando los píxeles cuya intensidad sea inferior al triple de la desviación estándar de la intensidad en el continuo. Para excluir tanto en cuanto sea posible falsas detecciones, también se han eliminado los píxeles aislados por encima de estos umbrales asumiendo que se trata de ruido, aún a riesgo de eliminar algunos píxeles que podrían ser válidos. Por último, se han eliminado todos los píxeles cercanos a los limbos para evitar señales espurias.

A partir de este momento ya es posible determinar el contraste para cada píxel y construir una máscara de contraste de estructuras brillantes. Estas máscaras representan la distribución superficial de la actividad magnética presente en el disco solar en un momento dado y su contraste asociado. La figura 2.15 muestra tres ejemplos que incluyen magnetogramas (fila superior), intensidades fotosféricas en el continuo (fila intermedia) y las máscaras de contraste obtenidas (fila inferior), para tres días en distintos momentos de la fase ascendente del ciclo solar 23 (cerca del mínimo, período intermedio y cerca del máximo, respectivamente). Debe notarse que las manchas no aparecen en las máscaras, pero sí que están identificadas las fáculas que las rodean.

3. Exceso de emisión facular en una región activa aislada: AR 7978

Para avanzar en la comprensión del balance energético en una región activa, hace falta estudiar las componentes radiativas asociadas a las estructuras magnéticas fotosféricas en las regiones activas y fuera de ellas. En general este tipo de estudios son complicados porque acostumbran a coexistir diversas regiones activas, en diversos grados de evolución, sobre el disco solar. Sin embargo, cuando rara vez aparecen regiones aisladas y solitarias es factible interpretar de forma más sencilla la variación de la irradiancia solar en función de la evolución de dicha región activa, a la cual cabe considerar agente inductor de todas las variaciones observadas. En el año 1996, en el mínimo entre los ciclos 22 y 23, se dio uno de esos casos.

3.1 Análisis de datos y evolución de AR 7978

La región activa NOAA AR 7978 apareció sobre el disco solar en julio de 1996 (rotación Carrington, CR, 1911) y se dispersó en diciembre del mismo año (CR 1917). Entre las rotaciones 1911 y 1915 fue la única región activa importante sobre el disco, apareciendo otras pequeñas estructuras en la 1916; la emergencia de estructuras mayores en la CR 1917 complica la interpretación de las observaciones de VIRGO, por lo que este estudio sólo se extiende hasta la CR 1916. La figura 3.1 muestra la evolución de AR 7978 en los magnetogramas solares (intensidad del campo magnético en la línea de la visual, o señal magnética) obtenidos por MDI, centrados en la región activa.

La figura 3.2 muestra una secuencia de imágenes de la intensidad en el continuo obtenidas por MDI para las CR 1912 y 1913; en estas rotaciones la región activa contiene manchas y fáculas, pero las manchas ya han desaparecido en las CR 1914 y 1915, dando lugar a rotaciones totalmente dominadas por las fáculas. El análisis de los histogramas de la intensidad del campo magnético para las diferentes rotaciones y las figuras 3.1 y 3.2 permiten concluir que: (1) la región activa tiene un área menor cuando es joven y está dominada por las manchas; y (2) al envejecer el campo magnético se debilita, las fáculas dominan la emisión y la región activa aumenta de tamaño, en resumen se dispersa (ver figura 3.3).

Hemos centrado el análisis en las regiones faculares y en el exceso de irradiancia asociado a ellas, en consecuencia, la presencia de manchas se interpreta como una distorsión en las observaciones. La distribución angular de las variaciones de la irradiancia (intensidad frente a ángulo heliocéntrico), proporciona información sobre las características de los tubos de flujo e impone restricciones al modelo de pared caliente. La figuras 3.4 a 3.8 muestran el exceso de irradiancia (normalizada a 1 UA) emitida por AR 7978, medida por LOI, SPM para los tres canales espectrales, y los valores bolométricos correspondientes a los radiómetros DIARAD y PMO6-V, respectivamente. Para representar estas variaciones de la irradiancia del centro al limbo se ha supuesto que la intensidad de la emisión facular es constante durante la media rotación solar en que es visible sobre el disco, y que la región facular no tiene extensión física (se supone puntual). La primera de estas hipótesis puede contrastarse comparando los valores que se detectan cuando la región activa está en la zona este u oeste del disco solar; la segunda influye en los resultados, tal como se comentará más adelante.

Un resultado obvio que se constata es que el envejecimiento de la región está relacionado directamente con una distribución angular más amplia. Comparando los valores derivados para las distintas rotaciones, se concluye que el máximo brillo (contribución positiva a la irradiancia o radiancia) se da a 60 grados inicialmente (CR 1913), desplazándose paulatinamente hasta 45° (CR 1915). También es evidente que la variación de la irradiancia espectral es mayor para longitudes de onda corta que para las largas.

3.2 Emisión facular total y evolución temporal

Se ha reproducido la CLV de la contribución facular a las variaciones de la irradiancia solar ajustando modelos fenomenológicos a las distribuciones angulares deducidas. Rotando las curvas que representan esa variación se ha conseguido obtener una representación del exceso de emisión facular en todas direcciones, suponiendo que la región emite la radiación con simetría cilíndrica alrededor de la vertical a la superficie de la estructura. Tal como puede verse en la figura 3.9, la distribución angular deviene menos brillante hacia el limbo a medida que envejece y se dispersa. Para evaluar el efecto del envejecimiento hemos caracterizado la región activa por dos parámetros: el número de píxeles con intensidad superior a 80 G (NB) y la superficie del disco (en millonésimas de hemisferio solar) que incluye el 90% de los píxeles con una señal magnética superior a 80 G (SAR), y hemos calculado estos dos valores para la región activa 7978 durante las seis rotaciones Carrington 1911-1916.

Para poder comparar estas medidas con las observaciones de fáculas en alta resolución, se ha supuesto que la región facular tiene forma rectangular cuyo tamaño viene fijado por las observaciones y que la emisión de cada fácula individual viene dada por una dependencia funcional con el ángulo heliocéntrico según la ecuación 3.1. Esta emisión se debe integrar sobre todo el rectángulo que representa la región activa para poderlo comparar con las observaciones de VIRGO de la región facular. El resultado puede verse en la figura 3.11, siendo la conclusión más importante que la fácula extensa (rectangular) da lugar a una distribución angular más amplia que la correspondiente a una fácula individual; resultado lógico, si se considera que se emite radiación desde todos los puntos de la región rectangular y no tan sólo desde un único punto.

A partir de los resultados obtenidos para el exceso total (en todas direcciones)

de emisión facular en función del ángulo heliocéntrico, puede evaluarse la evolución temporal y espectral de dicho exceso, repitiendo el análisis para la región activa en cada rotación Carrington. La figura 3.12 visualiza esta evolución y permite concluir que el exceso de luminosidad se mantiene constante en las tres primeras rotaciones y luego decrece. Además el mayor exceso se da a la longitud más corta 402 nm y la dependencia espectral no cambia mucho con el envejecimiento de la región.

Utilizando la ecuación (4.3), que da el contraste facular en función de la señal magnética y el ángulo heliocéntrico, es posible predecir la intensidad para cualquier campo magnético (dentro del rango de validez de la ecuación) corrigiendo del efecto LD. Si se integra esta intensidad por píxel sobre todo el disco solar se obtiene una predicción de la irradiancia espectral (expresión 3.3). Esta aproximación es muy simple, pero permite visualizar una aplicación de la ecuación (4.3) en el caso de una región facular aislada como la NOAA AR 7978 para unas rotaciones libres o casi libres de manchas. Los resultados derivados para la irradiancia espectral (figura 3.14) se comparan con las observaciones de VIRGO y se discuten los resultados; cabe destacar la similitud entre observaciones y predicciones para las rotaciones totalmente libres de manchas (CR 1914 y 1915), a pesar de la simplicidad del modelo usado.

4. El contraste de las fáculas fotosféricas y los elementos del retículo

A alta resolución se observa que las fáculas están formadas por un continuo no resuelto de puntos brillantes (de unos 100 km de diámetro), denominados puntos faculares. Para predecir sus propiedades se han construido diversos modelos para pequeños tubos de flujo; ya se ha comentado que el más aceptado es el de paredes calientes, el cual considera que las fáculas son conglomerados de tubos de flujo evacuados con paredes calientes y fondo caliente o frío, según la evacuación y el diámetro del tubo de flujo. Este modelo predice una cierta CLV para el contraste en función del diámetro de los tubos subyacentes. Las observaciones proporcionan evidencias de que el contraste, así como la estructura térmica subyacente, depende del tamaño de los tubos; por consiguiente es posible verificar la validez del modelo de pared caliente. Sin embargo, puesto que la mayor parte de los tubos no puede resolverse, es necesario disponer de una resolución espacial constante y bien definida

de las observaciones para realizar una buena comparación. Este criterio es difícil de alcanzar en observaciones del contraste facular hechas desde tierra; el seeing, las diferentes longitudes de onda de observación y los factores de llenado para las diversas estructuras magnéticas son factores difíciles de definir y controlar en períodos de tiempo dilatados.

El problema del seeing puede resolverse desde el espacio, analizando las observaciones de SOHO. Otras ventajas del instrumento SOI/MDI embarcado en SOHO son: (1) las medidas se toman de manera continuada y bajo condiciones homogéneas durante largos periodos de tiempo; (2) las características del instrumento son conocidas y estables, lo que da lugar a medidas en el continuo que adecuadamente promediadas tienen un nivel bajo de ruido; y (3) que los magnetogramas e imágenes de intensidad se obtienen con la misma resolución espacial, lo que permite identificar píxel a píxel las estructuras brillantes y las estructuras magnéticas.

En este capítulo se presentan medidas de alta calidad del contraste de elementos fotosféricos brillantes en función del ángulo heliocéntrico (su coseno) y de la señal magnética asociada. La calidad del análisis permite derivar una función analítica que predice el contraste en cualquier posición del disco y para un rango de señales magnéticas. Se consigue así imponer nuevas restricciones a los modelos teóricos y proporcionar una expresión que puede ser directamente usada para mejorar los modelos que intentan explicar la variabilidad de la irradiancia, puesto que una de las mayores fuentes de error en la modelización de estas variaciones es precisamente el deficiente conocimiento que se tiene del contraste facular.

4.1 Datos y método de análisis

De los datos que proporciona SOI/MDI nos interesan los magnetogramas de todo el disco y las imágenes de intensidad en el continuo. Los magnetogramas sólo miden el flujo magnético por elemento de resolución, por lo tanto la señal magnética no es verdaderamente la intensidad del campo magnético del tubo de flujo, sino su componente longitudinal promediada sobre el píxel; la intensidad de la señal del magnetograma proporciona información sobre el factor de llenado. Los datos analizados corresponden a una cohorte de magnetogramas e imágenes en el continuo obtenidas en un periodo de diez días, entre febrero y octubre de 1999 (ver tabla 4.1). La muestra contiene regiones activas esparcidas sobre el disco y cada

submuestra está separada de las restantes para evitar duplicaciones.

Empleamos promedios sobre 20 magnetogramas, tomados con una cadencia de 1 por minuto, para reducir notablemente el ruido y poder identificar el retículo en calma. Los magnetogramas individuales han sido rotados para compensar las diferencias temporales entre ellos y promediar correctamente los píxeles. Las imágenes de la intensidad se han tomado con una cadencia de una por minuto, han sido corregidas del efecto LD, y también han sido rotadas para quedar co-alineadas con los correspondientes magnetogramas promediados.

Se ha determinado el nivel de ruido de los magnetogramas y de las imágenes en el continuo en función de la posición sobre la matriz del CCD. Este protocolo se ha aplicado a diversos magnetogramas del año 1996 que muestran poca actividad y se han calculado sus correspondientes medianas para evitar sesgos no deseados debidos a la actividad solar remanente. A continuación se ha ajustado una superficie de segundo orden que se ha extrapolado hasta los limbos para cubrir todo el disco solar. La figura 3.2 muestra el mapa de la desviación estándar para los magnetogramas promediados; el aplicarlo a toda la cohorte de datos, supone aceptar que el nivel de ruido no ha cambiado entre 1996 y 1999. De forma parecida, se ha procedido a determinar el valor medio y la desviación estándar de la intensidad del continuo para el Sol en reposo; se ha considerado que un píxel con una señal magnética absoluta por debajo del 50% del correspondiente nivel de ruido es un píxel del Sol en reposo.

La distribución superficial de las estructuras magnéticas que dan lugar a una contribución positiva a las variaciones de la irradiancia se han identificado estableciendo dos umbrales para cada par magnetograma-intensidad, tal como se ha comentado en la sección 2.3. Siguiendo el criterio descrito en esa sección se han eliminado los píxeles que pueden corresponder a falsas detecciones (un 3% del total, aproximadamente). Usando esos dos umbrales se ha construido una máscara de contraste de los elementos brillantes para cada día seleccionado. La figura 4.1 muestra un ejemplo de estos resultados para el magnetograma (superior) y la imagen de intensidad (medio). Finalmente se ha calculado el contraste para cada píxel de la cohorte resultante, definido como la diferencia entre su intensidad y la intensidad del Sol en reposo relativo a ésta última (ecuación 4.1).

4.2 Resultados y discusión

Hemos compactado los datos de la señal magnética en 8 cajas cuyo intervalo de valores va desde el umbral (unos 15 G, variable) hasta 600 G; los intervalos han sido seleccionados de forma que contenga cada uno de ellos un número parecido de píxeles, salvo para la señal más intensa. De esta forma es posible distinguir la CLV de las estructuras magnéticas presentes con diferentes factores de llenado. En las figuras que se presentan a continuación se incluye un ajuste polinómico de segundo grado a cada cohorte de datos, como guía visual, y se ha marcado la línea que representa un contraste nulo para mayor claridad.

La figura 4.3 muestra la evolución del contraste en función del coseno del ángulo heliocéntrico para distintas estructuras, desde el retículo hasta los microporos. Para señales magnéticas pequeñas el contraste es bajo, para valores intermedios (200 G) muestra un máximo para el coseno del ángulo heliocéntrico alrededor de 0.5, para señales altas ese máximo se desplaza hacia valores menores del coseno y deviene negativo en el centro del disco. Las fluctuaciones cerca de los limbos se deben a la distribución de las regiones activas en los días seleccionados. La figura 4.4 muestra el contraste en función de la señal magnética, para diferentes posiciones sobre el disco (i.e. el coseno del ángulo heliocéntrico). El disco solar se ha dividido en 8 cajas respecto a este coseno, entre 0.96 (centro del disco) y 0.3 (limbo), de forma que el número de puntos en cada caja sea aproximadamente el mismo.

Dado el comportamiento regular del contraste con la señal magnética y el ángulo heliocéntrico, hemos procedido a un análisis multivariante de los datos para determinar una función analítica que ajuste esos datos. El resultado es la función bidimensional del contraste que se da en la expresión 4.3 (y la figura 4.5), cuadrática en el coseno del ángulo heliocéntrico y cúbica respecto a la señal magnética. A continuación hemos efectuado diversas pruebas para verificar la bondad del ajuste, y pueden verse algunos resultados en las figuras 4.6 y 4.7. A partir de este ajuste hemos podido establecer una dependencia funcional de los valores máximos del contraste facular respecto a la señal magnética (ecuación 4.4) y determinar el contraste específico por unidad de señal magnética (figura 4.8). Este contraste relativo representa una cantidad que es aproximadamente proporcional al brillo intrínseco de los tubos de flujo.

Las medidas previas del contraste facular daban con frecuencia, en el centro

del disco, resultados positivos (aunque cercanos a cero), pero en todos los casos el análisis era simplemente fotométrico. En algún trabajo, sin embargo, se obtenían valores negativos del contraste cerca del centro del disco, independientemente de la señal magnética asociada, posiblemente porque distinguían entre estructuras en regiones activas y en el Sol en reposo; nuestros resultados son más parecidos a los obtenidos en estos trabajos. Nuestros resultados indican que cuanto mayor es la señal magnética, menor es el valor del coseno del ángulo heliocéntrico para el cual el contraste es máximo. Por consiguiente, las estructuras asociadas al retículo dominan en el centro del disco, y en cambio las mayores (con mayor señal magnética) dominan en los limbos.

Nuestros resultados están en buen acuerdo con la física de los tubos de flujo propuesta por el modelo de pared caliente, si se acepta que (1) el retículo y las estructuras faculares están formadas por una mezcla no resuelta de tubos de flujo de diferentes tamaños, y (2) el tamaño medio de los tubos de flujo aumenta con la señal magnética o el factor de llenado. Existen, sin embargo, claras diferencias entre estructuras con pequeña señal magnética (retículo) y las identificadas alrededor de las regiones activas. Esto lleva a concluir que los tubos asociados al retículo son más brillantes que los asociados a las regiones activas, lo cual refleja —parcialmente— el hecho que los tubos del retículo son más calientes que los correspondientes asociados a regiones activas.

A partir de la figura 3.8 pueden determinarse los ángulos heliocéntricos para los cuales el contraste es máximo y, aceptando una hipótesis suplementaria sobre el valor de la depresión Wilson, determinar el diámetro promedio de los tubos de flujo para cada rango de señales magnéticas. Los valores obtenidos para cada caja tienen longitudes características entre 290 km (menor señal magnética) y 650 km (mayor señal), con un factor dos de incertidumbre, muy probablemente debido a la incertidumbre en el valor asignado a la depresión Wilson.

5. Evolución de los pequeños elementos magnéticos fotosféricos con el ciclo solar

En el capítulo anterior se ha estudiado el contraste de las pequeñas estructuras magnéticas en función del ángulo heliocéntrico y de la señal magnética. Este estudio

sólo consideraba un corto periodo de tiempo, que ahora va a extenderse a toda la fase ascendente del ciclo solar 23, para estudiar las características de la evolución de esos elementos con el tiempo. Los datos de SOHO utilizados son del mismo tipo que los descritos en el capítulo cuarto, pero ahora la base es mucho más extensa puesto que incluye imágenes casi simultáneas de magnetogramas de todo el disco y de la intensidad en el continuo para sesenta días distribuidos entre los años 1996 y 2001 (diez por año). La Figura 5.1 muestra las variaciones de la irradiancia solar para este periodo y la ubicación de los días seleccionados en el análisis; la tabla 5.1 resume sus características individuales, según los criterios de selección adoptados.

5.1 Análisis de los datos

Inicialmente se toman promedios sobre cinco imágenes consecutivas de la intensidad (obtenidas a un ritmo de una por minuto) para eliminar la posible contribución de los modos p de oscilación. Las imágenes se corrigen del efecto LD y se rotan para que estén co-alineadas con los correspondientes magnetogramas. Los magnetogramas pueden ser promedios de uno o cinco minutos puesto que se ha primado la cercanía temporal sobre la calidad del ruido. Siguiendo el protocolo descrito en el capítulo anterior, se ha calculado el nivel de ruido de los magnetogramas y de las imágenes del continuo en función de la posición sobre el CCD, a lo largo de los seis años. Para eliminar los efectos de la actividad solar en el ruido se han construido doce series temporales de imágenes de una hora (rotadas para compensar la rotación diferencial) y se ha promediado estos datos en dos grupos intercalados; a continuación se ha eliminado cualquier signo de actividad de más de 40 G. El resultado final del proceso son mapas de ruido similares al obtenido en el capítulo 4 (figura 4.2), que prácticamente no muestran — si es que la hay — indicio alguno de contribución de la actividad solar al ruido en los seis años (figura 5.2).

El siguiente paso ha sido analizar la evolución temporal de la media y la desviación estándar de la intensidad del Sol en reposo, tal como se hizo en el capítulo 4. La figura 5.3 muestra los valores normalizados de esta intensidad. La distribución sobre el disco de las estructuras magnéticas brillantes se ha determinado fijando dos umbrales en cada par magnetograma-imagen de intensidad, al igual que en el anterior capítulo, pero ahora los valores de la intensidad y su desviación se calculan usando el ruido diario derivado, no suponiendo el mismo para todo el periodo analizado. Una vez construidas las correspondientes máscaras, se obtiene el contraste y la intensidad

del campo magnético para cada píxel seleccionado en esas máscaras.

5.2 Resultados. Evolución del contraste facular y de las estructuras magnéticas con el ciclo solar

El análisis del contraste facular es similar al desarrollado en el capítulo anterior, pero extendido en el tiempo. Las figuras 5.4 y 5.5 muestran dicho contraste en función del coseno del ángulo heliocéntrico, para diversos rangos de la señal magnética; los números incluidos indican el número de píxeles en cada caja. La primera figura corresponde a un periodo cercano al mínimo del ciclo 23 (1996), la segunda a otro próximo del máximo del ciclo (2001); en los apéndices puede encontrarse las restantes figuras de la serie completa 1996-2001, así como las representaciones del contraste en función de la señal magnética, para diversos rangos del ángulo heliocéntrico (equivalentes a la figura 4.4).

Estas figuras, por ejemplo la figura 5.5, muestran claramente la evolución del contraste respecto a la señal magnética, entre los diferentes intervalos; tal como ya se comentó para el caso descrito en el capítulo 4: el retículo muestra un contraste muy bajo, mientras que el correspondiente a las regiones faculares depende fuertemente del CLV. Además, las estructuras menores siempre presentan un contraste positivo, mientras que las mayores tienen un contraste negativo en las regiones centrales del disco. Comparando los resultados para los diversos años analizados, se concluye que el contraste de las estructuras magnéticas brillantes no cambia con el tiempo. Puesto que la dependencia del contraste con la CLV está directamente relacionada con las propiedades físicas de los tubos de flujo que integran dichas estructuras, la conclusión es que las características físicas de los tubos de flujo no cambian durante el ciclo solar.

La contribución de los elementos magnéticos brillantes aumenta al acercarse el máximo del ciclo solar, pero lo hace porque el número de estos elementos crece, no porque varíen sus propiedades físicas. Sin embargo, la evolución temporal de la contribución de estos elementos a las variaciones (positiva, esencialmente) de la irradiancia es diferente para los elementos del retículo o aquellos asociados a fáculas. El número de elementos del retículo, siempre presentes, aumenta en un factor 2.5 entre 1996 y 2001, mientras que el de los asociados a las fáculas lo hace en un factor 70 y, además, su evolución es menos suave y más rápida en la fase ascendente del

ciclo. Estas conclusiones se cuantifican y analizan con más detalle; las figuras 5.7 y 5.8 son ejemplos de la invariancia temporal del contraste, y en ellas se muestra la evolución del máximo del contraste facular y del ángulo heliocéntrico para el cual se da dicho máximo, en función del tiempo, para diversos rangos de la señal magnética. No puede detectarse en ellas ninguna tendencia temporal.

La dependencia del contraste respecto de la posición es similar a la derivada en el capítulo 4; no obstante, aparece alguna diferencia, para las señales magnéticas más bajas aparentemente no trivial que debe comentarse. Se explica y justifica esta discrepancia en un análisis detallado y comparativo de los protocolos de reducción empleados en este capítulo y en el capítulo anterior; la conclusión es que la determinación de las características del Sol en calma es crucial, lo cual era esperable puesto que se está intentando identificar elementos magnéticos con una señal pequeña respecto al fondo tranquilo. El trabajo de reducción del capítulo quinto es aún más sofisticado que el del anterior, pues no supone a priori constancia temporal, aunque se pierde un poco de profundidad en la identificación de estructuras magnéticas con señal muy débil.

5.3 Resultados. Distribución de los campos magnéticos y descomposición de los mapas de estructuras magnéticas. Evolución con el ciclo solar

Se han derivado seis histogramas promediados de la señal magnética. Estos histogramas se han promediado en grupos de diez, para cada año entre 1996 y 2001, de manera que se han derivado la distribución de las intensidades durante diferentes fases del ciclo solar. Estas distribuciones muestran un codo hacia 250 G por lo que no es posible ajustar una ley de potencias; se ha procedido a un ajuste potencial doble, para las intensidades más débiles entre 20 y 250 G, y entre 250 y 600 G, para las fuertes. Los valores del índice para cada ley de potencias, según el año, pueden verse en la tabla 5.2; para intensidades débiles, éste índice varía entre 2,5 (para el mínimo solar) y 2,0 (cerca del máximo solar), mientras que para señales magnéticas intensas es prácticamente igual a 2,8 durante todo el ciclo. La figura 5.10 presenta estas distribuciones, divididas en intervalos de la señal magnética, según se atribuyan al retículo (< 60 G), a las fáculas (entre 60 y 200 G) o a los microporos (> 200 G). La población dominante es la que integra el retículo, tres veces mayor

que la componente facular; además, retículo y fáculas están siempre presentes en el disco, mientras que los microporos aparecen en la fase ascendente del ciclo solar (ver figura 5.11).

Para poder analizar la contribución a la variabilidad solar de cada tipo de pequeña estructura magnética se han descompuesto los sesenta magnetogramas solares en dos componentes: regiones activas (AR) y Sol en calma (QS). Para ello se ha cuantificado la contribución relativa del retículo respecto a las fáculas a lo largo del ciclo solar, según se hallen contenidos en una de esas dos regiones. El método empleado se basa en identificar en los magnetogramas la amplitud de las variaciones de la señal magnética en un subconjunto de puntos. Para cada píxel de un subconjunto finito (40×40 píxeles) se calcula su desviación cuadrática media respecto al resto de los píxeles del subconjunto y se itera el proceso para cada píxel del conjunto. A continuación se construye un mapa de diferencias rms, el cual (después de un suavizado para eliminar puntos singulares) permite identificar las regiones activas fijando un umbral de actividad magnética que represente un compromiso entre valores que den lugar a regiones demasiado fragmentadas y aquéllos que no pueden identificar en el disco regiones activas importantes. La figura 5.12 muestra un ejemplo de uno de estos magnetogramas descompuesto en las componentes AR y QS. Esta descomposición permite estudiar la evolución del contraste para cada componente, en función de la posición y de la señal magnética (tal como se ha hecho en el capítulo anterior) y, por tanto, identificar pequeñas estructuras magnéticas brillantes en las componentes AR y QS. Hemos dividido el período de seis años en tres períodos, etiquetados como “Mínimo” (1996 y 1997), “Medio” (1998 y 1999) y “Máximo” (2000 y 2001). Para cada uno de estos subperíodos se han elegido cuatro días (ver tabla 5.3) a los que se ha aplicado el método descrito anteriormente, separándose la componente del retículo y la facular, para las regiones AR y QS. Las figuras 5.13 y 5.14 muestran el contraste en función de la posición para la componente de Sol en calma (QS), durante el período Mínimo, y para la componente de regiones activas (AR), durante el período Máximo; todos los restantes casos pueden verse en el apéndice D.

La evolución del contraste derivado para las componentes AR y QS sigue el mismo comportamiento que el derivado para el contraste descrito en la Sección 5.3.1. No hay diferencias cualitativas relevantes salvo el hecho de que el número de puntos en cada intervalo aumenta del mínimo al máximo del ciclo solar. Debe destacarse que la componente QS muestra una fracción mayor de píxeles o puntos con una baja

señal magnética que la componente AR, y lo contrario ocurre con la fracción de píxeles con una señal más intensa: su fracción es mayor en la componente AR que en la QS. También se ha comprobado que el contraste no depende del período del ciclo analizado, tanto para la componente AR como para la QS. En otras palabras: los mecanismos físicos que gobiernen las características de los tubos de flujo que generan estas poblaciones no dependen del tiempo.

Finalmente, se ha utilizado la técnica de descomposición de los magnetogramas para cuantificar la evolución de la población del retículo y de las fáculas con el ciclo solar. Para ello se ha superpuesto la máscara que identifica las pequeñas estructuras magnéticas brillantes con el resultado de la descomposición del correspondiente magnetograma, para los sesenta días analizados. En consecuencia, se ha separado la población reticular y la facular para la componente AR y para la componente QS, independientemente; se ha considerado como retículo, todos los elementos de QS y aquéllos de AR con una señal magnética inferior a 90 G, los restantes elementos de la componente AR se han considerado como fáculas. La figura 5.16 representa la evolución de la fracción del retículo y de las fáculas, para los sesenta días analizados; la figura 5.17 muestra el número absoluto de estas dos poblaciones (y un promedio deslizante de su evolución) en función del ciclo solar. Se concluye que la fracción de fáculas está en correlación con el ciclo solar, la de retículo, sin embargo, está en anticorrelación. Además, la población reticular está siempre presente en el disco, mientras que la facular sólo aparece en la fase ascendente del ciclo solar, aunque se desarrolla aun ritmo más rápido que el retículo.

6. Conclusiones

Se ha analizado el contraste de pequeños elementos magnéticos fotosféricos y su contribución a la irradiancia solar. Nuestro interés se ha centrado en la dependencia del contraste de las fáculas y del retículo, respecto al ángulo heliocéntrico y a su evolución con el ciclo solar. Para ello hemos utilizado datos fotométricos y magnetogramas recogidos por diversos instrumentos embarcados en el observatorio espacial SOHO entre los años 1996 y 2001, durante la fase ascendente del ciclo solar. Ha sido necesario desarrollar nuevos métodos de reducción de datos, teniendo en cuenta que los instrumentos no son accesibles y que se están degradando continuamente, a causa del bombardeo por radiación.

Se han reducido los datos proporcionados por los detectores LOI y SPM de VIRGO y de SOI/MDI aplicando protocolos propios de reducción. Destacar el algoritmo de corrección del oscurecimiento hacia el limbo con la distancia, el algoritmo PPN para corregir la degradación instrumental y los algoritmos para producir mapas de desviación estándar para los magnetogramas y para la intensidad solar en el continuo.

Se ha evaluado el envejecimiento de la región activa aislada AR 7978 durante seis rotaciones solares, estudiando su extensión equivalente y el número de elementos magnéticos por encima de un umbral. La distribución angular del exceso de radiancia refleja la dispersión de la región magnética activa, la cual deviene menos brillante hacia el limbo a medida que envejece. Se ha derivado el exceso global de emisión en esta región para longitudes de onda entre 402 nm y 862 nm, y es del orden de 10^{-4} veces la luminosidad solar a la correspondiente longitud de onda.

Se ha aplicado la función $C_{\text{fac}}(\mu, B/\mu)$ para predecir el contraste de las estructuras magnéticas brillantes de la fotosfera, debidas a AR 7978. Se ha reconstruido la irradiancia espectral relativa para toda esa región; los resultados obtenidos están de acuerdo con las observaciones cuando no hay manchas solares presentes.

Se han construido diez pares de magnetogramas y imágenes del continuo casi simultáneos, entre febrero y octubre de 1999, para analizar la dependencia del contraste con el ángulo heliocéntrico y con la señal magnética de las estructuras faculares y del retículo en regiones activas. Los resultados indican que la CLV del contraste varía gradualmente con la señal magnética y que dicha variación es distinta para fáculas y retículo.

Se ha realizado un análisis estadístico multivariante para derivar una expresión analítica para el contraste facular, $C_{\text{fac}}(\mu, B/\mu)$ ecuación (3.3). Es la primera vez que se deriva una expresión de estas características, y su importancia radica en que impone restricciones a los modelos de tubos de flujo y que se está utilizando para mejorar los modelos de la irradiancia solar.

Otro importante resultado derivado de este análisis que ahora podemos afirmar que las estructuras reticulares dominan en el centro del disco, mientras que en el limbo lo hacen aquellas con mayor señal magnética. Ello es consecuencia del hecho que cuanto mayor es la señal magnética, menor es el valor del ángulo heliocéntrico para el cual el contraste es máximo.

Se han analizado sesenta pares de magnetogramas e imágenes en el continuo casi simultáneas, distribuidos entre 1996 y 2001; en este estudio se demuestra que la dependencia funcional del contraste, respecto al ángulo heliocéntrico y la señal magnética, no depende del tiempo. Una consecuencia importante es que ello implica que las propiedades físicas de los tubos de flujo asociados a fáculas y al retículo no varían con el tiempo. Una hipótesis asumida pero hasta ahora no demostrada.

Se ha constatado que para poder llegar a conclusiones sólidas sobre la contribución de las pequeñas estructuras magnéticas fotosféricas a la variabilidad solar, es crítico disponer de una muy precisa determinación de la intensidad de fondo del Sol en calma.

La distribución del retículo, fáculas y microporos puede ajustarse con dos leyes de potencia, una para señales magnéticas débiles (inferiores a 250 G), y otra para señales más intensas. Se ha comprobado que la forma de esta ley no cambia con el ciclo solar para señales intensas, pero que para señales débiles el índice que define la potencia disminuye a medida que aumenta la actividad solar.

Se han descompuesto sesenta magnetogramas en dos componentes: regiones activas y Sol en calma. Ello ha permitido confirmar la invariancia temporal de los procesos físicos que gobiernan los tubos de flujo y, además, que dichos tubos muestran el mismo CLV independientemente de si se hallan en regiones activas o en la región de Sol en calma.

Finalmente, indicar que se ha comprobado que la fracción de fáculas respecto al total de pequeños elementos magnéticos identificados, está en correlación con el ciclo solar (máxima en el máximo). La fracción equivalente de elementos reticulares, en cambio, está en anticorrelación con el ciclo, pero siempre es superior a la anterior.