

Observatori de l'Ebre

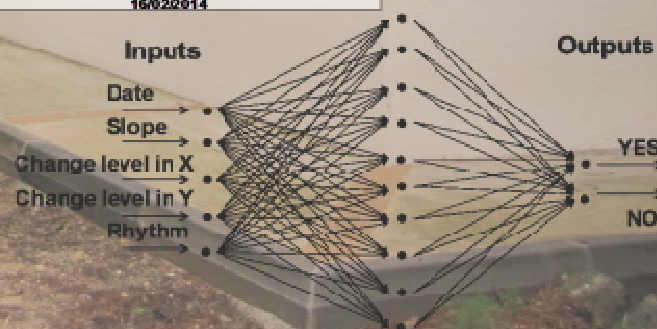
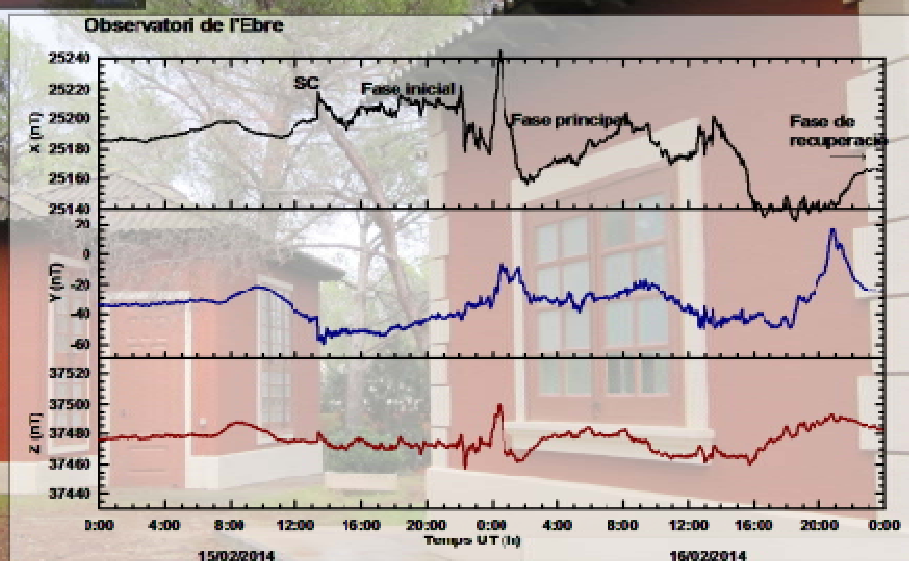
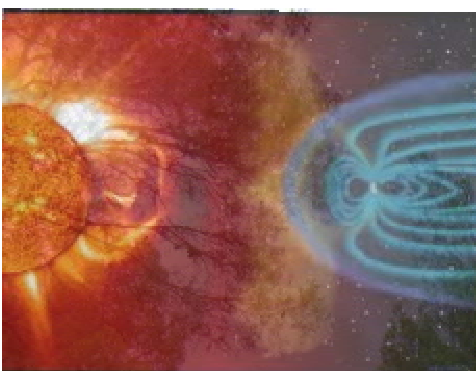
Universitat Ramon Llull, URL

Doctora: en Geofísica

Tesi Doctoral

Detecció automàtica de començaments abruptes de tempestes magnètiques utilitzant xarxes neuronals

Antoni Segarra Blasco





Observatori de l'Ebre

Universitat Ramon Llull, URL

Doctorat en Geofísica

Tesi Doctoral

**Detecció automàtica de començaments
abruptes de tempestes magnètiques
utilitzant xarxes neuronals**

Antoni Segarra Blasco

Director de tesi: Dr. Juan José Curto Subirats

Agraïments

Aquest treball ha estat possible gràcies a tota la gent que diàriament treballa o ha treballat a l'Observatori de l'Ebre. Més que destacar una persona o altra s'ha de destacar l'ambient de treball en general, com una petita família. Al tractar-se d'un centre tant petit enclavat en un lloc gairebé remot, les dificultats es superen de forma col·lectiva. Gràcies a tots, al Santi, al Curto, a la Nia, als Miquels, al David, al Germán, a l'Àngels, a l'Àngela, a la Beatriu, a la Susana, a la Maria, a la M^a José, a l'Òscar, al Xavi, al Pere, i a la resta de gent, segur que em deixo a algú, que ha passat per l'Observatori.

Pel que respecta a la vessant més científica, agrair tot el suport i ajut rebut pel Dr. Curto, director d'aquesta tesi, i voldria mencionar molt especialment al Pare Alberca pel seu llarg treball i per la seva paciència i optimisme. He tingut la gran oportunitat de fer un parell d'estades a la Universitat Kyoto on vaig tenir el plaer d'aprendre de les discussions i reflexions amb el Dr. Nosé i el Professor Araki.

Per finalitzar voldria agrair als amics i familiars per aguantar-me durant tot aquest temps d'elaboració d'aquesta tesi.

Resum

L'objectiu d'aquesta tesi és la detecció automàtica de començaments abruptes de tempestes magnètiques (*Sudden Commencements*, SC). Per assolir aquest objectiu primerament hem situat el fenomen d'estudi, els SCs, dintre el marc general del geomagnetisme. Els SCs són un fenomen que es caracteritza per un augment sobtat del camp geomagnètic. Presenta unes característiques clares com són un temps d'inici ben definit, la simultaneïtat a tot el planeta i una font ben establerta com és l'augment abrupte de la pressió del vent solar. Però també presenta una morfologia complexa depenent on està situat l'observatori en qüestió, les diferències morfològiques depenen de la latitud i l'hora local dels observatoris. Hem fet un esforç per entendre la història de l'estudi dels SCs, per veure les seves dificultats i l'evolució tant de la nomenclatura com de la seva definició.

Actualment la morfologia dels SCs està ben explicada a través del model físic d'Araki [Araki, 1994]. Hem estudiat a fons un cas particular, des de l'increment de la pressió del vent solar fins als registres dels observatoris terrestres. Així, hem pogut veure les diferències entre l'aspecte dels SCs

observats per diferents satèl·lits i a terra, on presenta una morfologia molt més complexa per l'acció dels corrents ionosfèrics i els corrents existents a la magnetosfera. Amb aquest cas particular hem vist la complexitat del fenomen i també hem mostrat la validesa del model teòric.

Pel que fa a la detecció dels SCs hem explicat l'estat actual del procés d'elaboració de les llistes d'esdeveniments i les seves dificultats que fan necessari la cerca d'un mètode de detecció automàtic. Per abordar aquest repte hem optat per treballar en xarxes neuronals per la seva capacitat d'aprendre a partir de casos. A efecte de valorar la idoneïtat de les xarxes neuronals per resoldre problemes en el camp del geomagnetisme, les hem aplicat per un problema concret: obtenir índexs d'activitat magnètica locals a partir d'índexs globals. Obtenint, per aquest cas, resultats satisfactoris especialment en situacions d'activitat magnètica moderada o alta.

Com a resultat fonamental d'aquesta tesi, presentem un mètode basat en les xarxes neuronals capaç de detectar els SCs de forma automàtica, ràpida, sistemàtica i essent coherent amb el mètode manual. Aquest nou mètode pot treballar tant amb dades de molts observatoris, però també amb pocs observatoris treballa satisfactòriament. Si treballem amb els observatoris de baixa latitud, on la forma dels SCs normalment s'assembla més a una funció esglaó, podem assegurar que la llista produïda amb la xarxa és totalment coherent amb les llistes tradicionals.

Índex

Introducció	1
Capítol 1. Els SCs i el camp geomagnètic	
1.1. Els començaments abruptes dintre del marc general del camp magnètic terrestre.....	9
1.2. Aspectes observacionals i morfològics dels SCs.....	17
1.2.1. Aspectes observacionals a l'espai.....	20
1.2.2. Morfologia dels SCs en els observatoris geomagnètics.....	21
1.2.3. Temps de pujada dels SCs.....	25
1.3. Ressenya històrica del coneixement del fenomen. Notació, definició i llistes d'esdeveniments.....	26
Capítol 2. Model físic d'SC i estudi d'un cas particular	
2.1. Model físic d'Araki.....	35
2.1.1. Analogia amb un circuit elèctric simple.....	38
2.2. Simultaneïtat.....	41
2.3. Estudi d'un cas particular.....	42
2.3.1. Observacions amb satèl·lits.....	45
2.3.1.1. Observacions del vent solar.....	46
2.3.1.2. Observacions a la <i>magnetosheath</i> i dintre la magnetosfera.....	50
2.3.2. Observacions al terra.....	61
2.3.3. Discussió i conclusions.....	68

Capítol 3. Detecció de SC	
3.1. Detecció manual.....	71
3.2. Breu introducció a les xarxes neuronals.....	73
3.2.1. Metodologia, xarxes neuronals.....	74
3.2.1.1. Tipus de xarxes.....	77
3.2.1.2. <i>Back-propagation</i>	78
3.3. Exemple d'aplicació de les xarxes neuronals a un problema d'estimació de l'activitat magnètica.....	82
3.3.1. Presentació del problema.....	82
3.3.2. <i>Inputs</i> de la xarxa.....	86
3.3.3. Conjunt de dades.....	87
3.3.4. Paràmetres de la xarxa neuronal.....	89
3.3.5. Resultats.....	92
3.4. Detecció automàtica de SC.....	96
3.4.1. Selecció de candidats a esdevenir SC.....	98
3.4.2. Entrenant la xarxa.....	103
3.4.3. Resultats.....	104
Capítol 4. Conclusions.....	109
Capítol 5. Propostes de futur.....	113
Annex: Sobre les xarxes neuronals.....	115
Referències.....	123

Introducció

L'objectiu final d'aquest treball és la creació d'un mètode automàtic per detectar els començaments abruptes de tempestes magnètiques. Els començaments abruptes de tempestes magnètiques són un fenomen llargament estudiat dintre del geomagnetisme. Per les seves característiques representa una bona oportunitat per estudiar com respon la magnetosfera a les condicions canviants del vent solar, per aquest fet, resulta important per als investigadors tenir una referència sòlida sobre la quantitat i l'existència dels començaments abruptes, a tal efecte s'elaboren les llistes de començaments abruptes. Actualment, aquestes llistes s'elaboren manualment a l'Observatori de l'Ebre, aquest procés presenta alguns problemes com la tardança en la publicació de les llistes. Proposem un mètode automàtic basat en xarxes neuronals capaç d'elaborar les llistes d'una manera més ràpida però mantenint la coherència amb el mètode manual tradicional. En aquesta introducció parlarem del camp magnètic de manera general per situar els començaments abruptes de tempestes magnètiques dintre el marc general del geomagnetisme.

El camp magnètic terrestre ens afecta a la vida quotidiana encara que la majoria de cops no en som conscients. En aquest sentit és important l'esforç

que s'ha fet i es fa de forma continuada per entendre el comportament d'aquest camp invisible. Aquesta feina només es pot abastar si molta gent hi treballa de forma cooperativa, cadascú aportant el seu petit gra de sorra. Treballant d'aquesta forma i degut a la complexitat dels problemes a analitzar s'arriba a un nivell d'especialització imprescindible però que també té el perill de perdre la perspectiva global del problema. De manera que per copsar bé la realitat cal mirar-la des de diferents punts de vista.

L'objectiu últim d'aquest treball és la detecció automàtica de començaments sobtats de tempestes magnètiques o si més no d'increments abruptes de l'activitat magnètica. Però per guanyar perspectiva, cal posar aquest fenomen dintre del marc general del geomagnetisme, cal entendre la necessitat de la seva detecció i cal veure les seves dificultats. Per tant, en primer lloc en aquesta breu introducció parlarem a grans trets sobre el camp magnètic terrestre.

El camp magnètic terrestre és un fenomen complex en el que hi contribueixen diferents fonts de diferent origen. D'aquesta manera el valor del camp que mesurem a la superfície de la Terra s'origina principalment a l'interior de la Terra, concretament al nucli extern [Udías *and* Mezcuca, 1997], ja que en ser un material conductor, en estat semi-líquid, quan es mou genera un camp magnètic molt gran. Concretament el 95% del valor del camp magnètic es correspon a la dinamo interna, amb uns valors aproximats de 60000 nT prop dels pols magnètics i de 25000 nT prop de l'equador magnètic [Verbanac *et al.*, 2010]. Una altra font d'origen intern és el material magnetitzat de la litosfera que pot contribuir amb uns valors al voltant de 100 nT o 1000 nT depenent de la composició del sòl, per tant representa una contribució local al camp magnètic. En alçada, l'aportació del camp magnètic litosfèric és molt menys intensa, menys de 30 nT a 400 km d'alçada [Olsen *and* Stolle, 2012]. Les contribucions del nucli extern i de la litosfera es coneixen com a camp magnètic intern. Aquest camp magnètic té un caràcter majoritàriament dipolar i es pot representar per les línies de camp magnètic que surten d'un pol magnètic i es tanquen a l'altre pol. És l'equivalent a la imatge clàssica de les línies de camp d'un imant.

A més de les contribucions d'origen intern, al camp magnètic també hi contribueixen els corrents elèctrics de la ionosfera (situats entre 90 i 1000 km d'alçada) i els corrents de la magnetosfera (situats a distàncies molt més grans, alguns radis terrestres). Aquestes contribucions es coneixen com a camp d'origen extern. Son contribucions molt dinàmiques, variant de menys d'una nanotesla en condicions de calma geomagnètica, fins a centenars de nanotesles en condicions de forta activitat geomagnètica, amb amplituds més grans prop dels pols magnètics. Aquestes contribucions externes estan fortament relacionades amb l'activitat solar. Les partícules que escapen de l'atmosfera solar conformen el que es coneix com a vent solar, i aquest comprimeix les línies del camp geomagnètic a la part diürna i les allarga a la part nocturna formant una llarga cua (figura 1). A més de comprimir les línies de camp, la injecció de partícules carregades elèctricament provinents del Sol dintre la magnetosfera genera una sèrie de corrents elèctrics que fan allunyar la imatge esquemàtica de les línies de camp d'un gran imant de la imatge realista que tenim actualment de la magnetosfera.

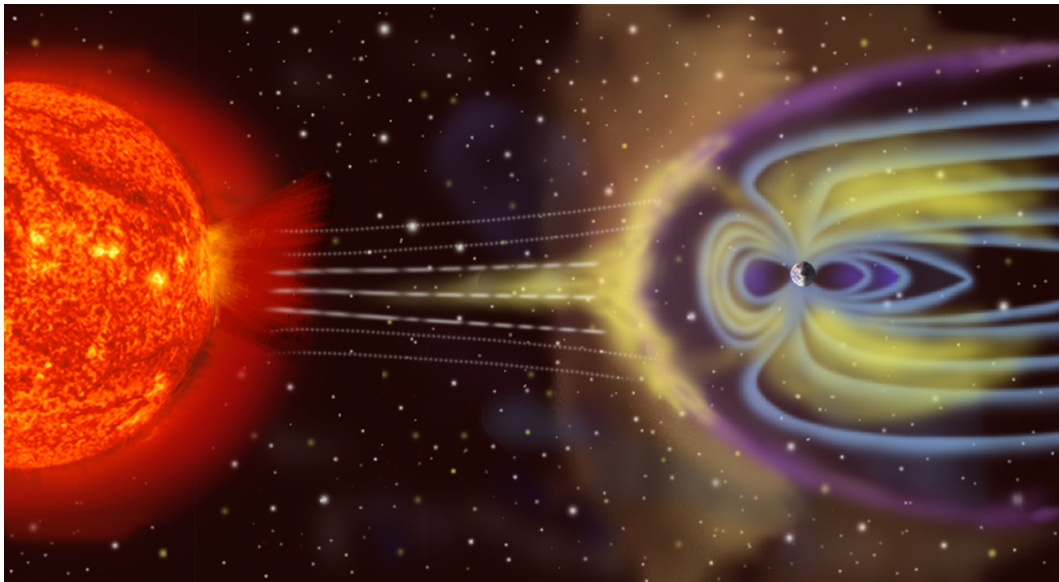


Figura 1. Representació artística del vent solar deformatant les línies de camp magnètic de la Terra, obtinguda de <http://sec.gsfc.nasa.gov/popscise.jpg>

En aquest punt, cal destacar de forma molt clara que el camp magnètic terrestre actua com un escut que ens protegeix de la major part de les partícules i radiacions provinents del Sol, fent possible, entre altres factors, la

vida tal com la coneixem al planeta. Amb una societat cada cop més depenent de la tecnologia, la qual s'ha fet més i més sensible a camps elèctrics i magnètics, és cada cop més important conèixer amb més detall com interactua la magnetosfera amb el vent solar i les seves variacions. L'estat del camp magnètic terrestre afecta de forma clau en la propagació dels senyals de comunicació, per exemple els senyals del *Global Position System*, GPS, entre altres. A més, també afecta o pot afectar a altres aspectes com les proteccions dels grans oleoductes i gasoductes, l'estat dels molt nombrosos satèl·lits de comunicacions, els corrents elèctrics induïts al terra provocats per fortes variacions del camp magnètic poden afectar a les línies de distribució elèctrica, efectes biològics tant en persones com en diferents animals i molt especialment en el cas dels astronautes (figura 2) [Lanzerotti, 2013]. L'estudi de tots aquests efectes constitueix una disciplina de la ciència per sí sola que es coneix com *Space Weather*, en el qual es pot encabir aquest treball.

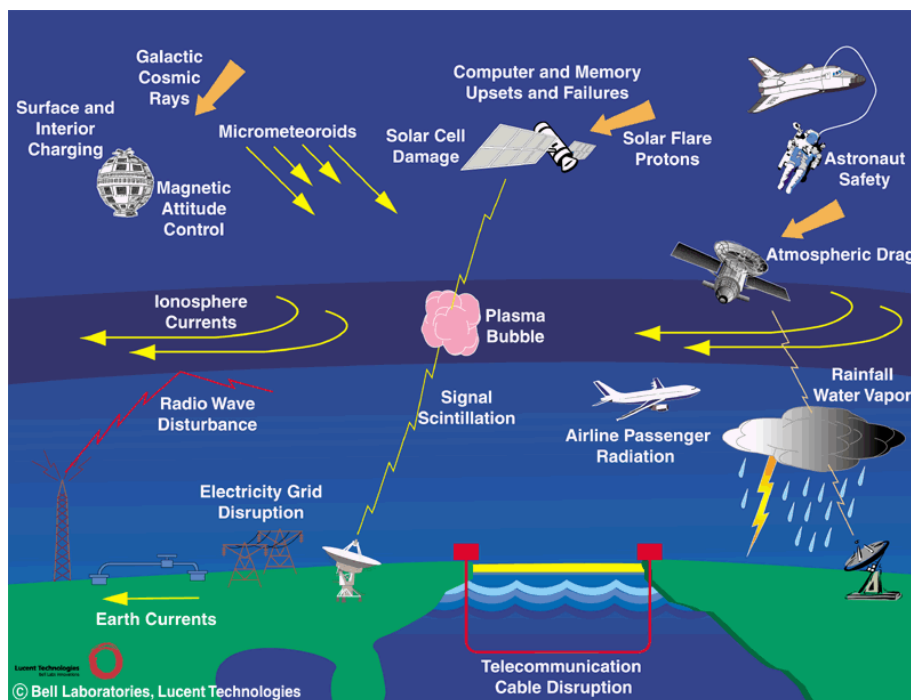


Figura 2. Il·lustració esquemàtica de les diferents afectacions provocades per fortes variacions del vent solar i del camp geomagnètic. Cortesia de *Bell Laboratories, Lucent Technologies*.

Fins ara hem parlat del vent solar com les partícules que escapen de l'atmosfera del Sol, sense entrar en molts detalls. Doncs bé, hem de tenir en compte que el Sol és una esfera de plasma que gira sobre el seu eix i en la que

es produeixen complexos fenòmens físics [Zirin, 1988]. En conseqüència, el Sol no sempre presenta el mateix estat, tradicionalment es parla de períodes de calma solar i períodes d'activitat solar. Durant els períodes calma el vent solar és un flux més o menys constant de partícules, llavors les variacions magnètiques que s'observen als magnetogrames de qualsevol observatori terrestre són tranquil·les, és a dir, lentes. Durant els períodes de calma es poden observar fenòmens com la variació diürna i les variacions estacionals, entre altres.

En oposició als períodes de calma solar parlem de períodes d'activitat solar. De vegades el Sol pateix fenòmens explosius molt violents coneguts com a ejeccions de massa coronal (*Coronal Mass Ejections*, CME). Aquests fenòmens estan fortament relacionats amb les taques solars, i d'acord al cicle solar d'onze anys, presenten una probabilitat més alta de succeir durant els anys propers al màxim del cicle solar [Ramesh, 2010]. Si un fenomen explosiu com aquest té una direcció cap a la Terra, des d'un punt de vista magnètic terrestre, poden ocórrer el que es coneixen com a tempestes magnètiques. No sempre que hi ha una CME apuntant cap a la Terra succeeix una tempesta magnètica, depèn de l'orientació del camp magnètic associat al vent solar. El que caracteritza una tempesta magnètica és un període de més agitació magnètica, seguit d'un descens important del camp geomagnètic, i finalment una fase de recuperació, així en els registres temporals dels observatoris magnètics, o magnetogrames, s'observen variacions molt fortes i ràpides en comparació amb els dies tranquils. Moltes vegades les tempestes tenen un "inici clar" amb un augment brusc del camp magnètic [Parkinson, 1983]. Sovint, però, hi ha casos en que una erupció solar no provoca una tempesta magnètica però també s'observa un augment puntual del camp magnètic semblant al que anomenàvem "inici clar" de la tempesta. Sobre aquest fenomen ens centrarem en aquest treball, els "inici clars". Aquests, si són seguits d'una tempesta magnètica es coneixen com a SSC (*Sudden Storm Commencement*), i si "l'inici clar" no va seguit de tempesta se'l coneix com a SI (*Sudden Impulse*), englobant els dos casos ja que de fet és el mateix fenomen, parlarem de començaments sobtats o SC (*Sudden Commencement*). A la figura 3 presentem quatre exemples de SCs: 3 de SSCs, o sigui, tempesta magnètica

amb un “inici clar”, i un exemple de SI, o sigui, “d’inici clar” no seguit per una tempesta, tots enregistrats a l’Observatori de l’Ebre. Els SCs son fenòmens magnètics que s’observen sovint com una funció esglaió en els registres temporals dels observatoris magnètics, o magnetogrames, el que caracteritza més els SCs és la seva brusquedat, representa un canvi molt ràpid del camp magnètic terrestre. Per explicar aquesta fenomen hem de pensar que, quan hi ha una erupció solar, la densitat, i en conseqüència la pressió del vent solar augmenta sobtadament, per tant, comprimeix molt més les línies de camp magnètic de la Terra, i a la superfície el camp augmenta sobtadament, per tant, als magnetogrames dels observatoris magnètics es registra una pujada sobtada en el registre del camp magnètic. La brusquedat i la forma de manifestar-se depèn de la ubicació de l’observatori (latitud i hora local).

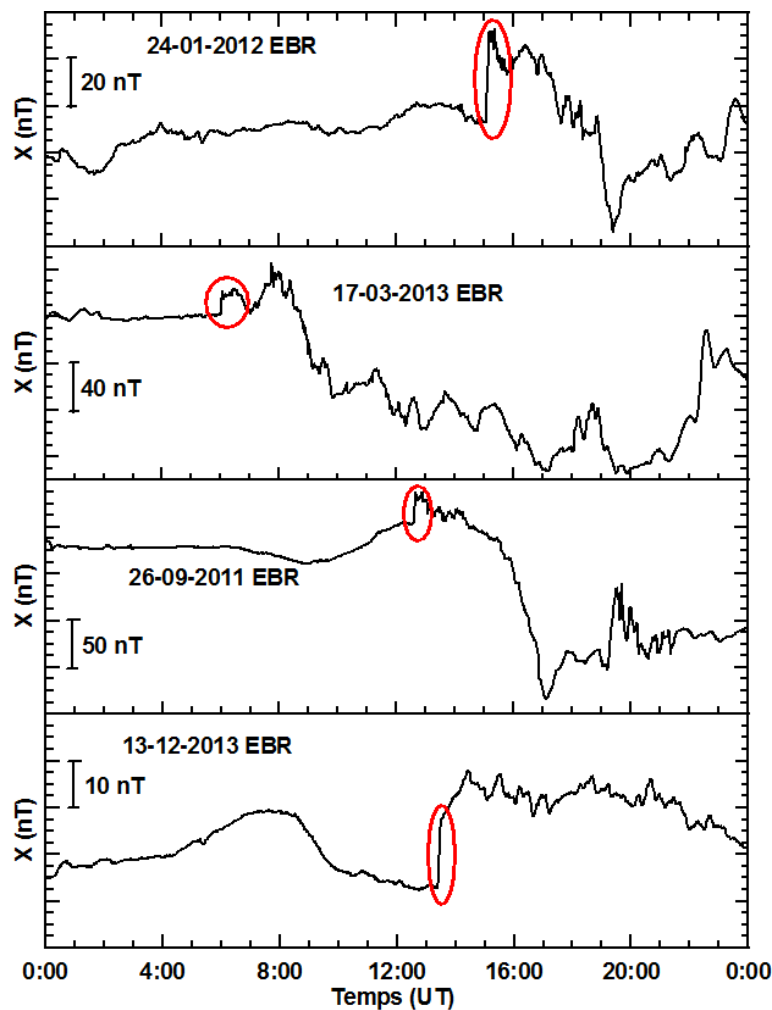


Figura 3. Quatre magnetogrames enregistrats a l’Observatori de l’Ebre. Els tres primers mostren tempestes magnètiques amb un “inici clar” o SSC. En l’últim mostra un cas “d’inici clar” no seguit per una tempesta o SI.

Els començaments sobtats presenten unes característiques que des dels inicis dels estudis sobre geomagnetisme van despertar l'interès dels investigadors. Pel seu aspecte abrupte en els magnetogrames i pel fet que s'observen simultàniament a tots els observatoris arreu del món, ja observat amb els aparells de poca resolució temporal disponibles a finals dels segle XIX, van ajudar també a relacionar fets observats al Sol, com les taques solars, amb fets observats a la Terra com les tempestes magnètiques. Degut a aquest interès, tot i utilitzant criteris subjectius referents a l'aspecte o morfologia dels esdeveniments, es van establir mètodes per detectar, classificar i caracteritzar aquest fenomen. Des de l'any 1975 l'Observatori de l'Ebre és l'encarregat d'elaborar les llistes d'existència dels SCs. Aquestes llistes són utilitzades per força investigadors ja que permeten anar directament a un cas en concret d'estudi o fer estadístiques per caracteritzar millor el fenomen. Un aspecte clau que fins ara no hem comentat, és el fet que hi ha fenòmens magnètics que s'assemblen a l'aspecte que presenten els SCs en un magnetograma, com variacions fortes del camp en el període de tempesta magnètica, en el procés d'elaboració de les llistes també es fa una feina per descartar, diguem-ho així, els falsos SCs. Avui en dia, l'elaboració d'aquestes llistes presenta força problemes, potser el més important és el temps que es triga a elaborar les llistes, ja que es fan de manera manual. Amb el desenvolupament de les tecnologies de la informació es necessari un mètode més ràpid i àgil però sense perdre fiabilitat. Aquest ha estat l'objectiu principal d'aquest treball, elaborar un mètode automàtic per detectar SCs.

El mètode que hem emprat està basat en xarxes neuronals. S'anomenen xarxes neuronals perquè s'assemblen al cervell humà en dos aspectes, el coneixement és adquirit per la xarxa a través de l'aprenentatge i els pesos sinàptics, o forces en que estan connectades les neurones, s'utilitzen per emmagatzemar la informació [Rojas, 1996; Haykin, 1999] . Aquest mètode ens pot permetre utilitzar l'experiència acumulada durant tots els anys d'elaboració de les llistes a l'Observatori de l'Ebre. La cerca de regles que es transformessin en fórmules analítiques són de difícil síntesi pel seu caràcter empíric. Un aspecte clau que hem tingut en compte és mantenir la coherència entre el mètode tradicional i el nou mètode automàtic, els dos mètodes han de ser

comparables entre sí, el nombre de successos d'ambdues llistes han de ser semblants.

El treball que segueix a continuació està estructurat en quatre parts. El primer capítol intenta explicar tots els aspectes que caracteritzen els SCs, també s'ha realitzat un important esforç en fer una recopilació històrica del coneixement del fenomen ja que fins fa molt poc existia certa controvèrsia pel que fa a la definició i a la nomenclatura dels començaments sobtats. El segon capítol fa referència als models teòrics que expliquen el fenomen, especialment el model d'Araki [Araki, 1994]. També es presenta l'estudi d'un cas particular per veure com s'ajusta el model a l'experiència. En el tercer capítol ens centrem en la tècnica que farem servir per a la detecció. Un aspecte clau és la introducció de les xarxes neuronals i per entendre més el seu funcionament es presenta un cas de més fàcil aplicació de les xarxes en l'àmbit dels índexs magnètics, i a continuació, amb tots aquests elements, ens centrem amb el mètode automàtic de detecció dels SCs. Finalment en l'última capítol es presenten les conclusions i les propostes de futur.

Capítol 1. Els SCs i el camp geomagnètic

En primer lloc hem de conèixer bé el fenomen a estudiar, posar-lo en el context de la complexitat del camp magnètic terrestre, entendre la seva importància històrica en l'estudi del geomagnetisme i alhora entendre les seves dificultats. Tots aquests aspectes els tractarem en aquest capítol.

1.1. Els començaments abruptes de tempestes magnètiques dintre del marc general del camp magnètic terrestre.

Per centrar-nos en el fenomen a estudiar, els començaments abruptes o SCs, primer hem de conèixer, encara que sigui de forma breu, el marc general del geomagnetisme i més concretament, la magnetosfera. Anem a introduir una sèrie de conceptes i definicions que després sortiran de manera natural quan parlarem pròpiament dels SCs. Primerament, introduïm molt breument els components del camp magnètic, a la figura 1.1 presentem els dos conjunts de coordenades més utilitzats per descriure el vector del camp magnètic, XYZ i HDZ. El conjunt XYZ correspon a les coordenades geogràfiques, X nord, Y apuntant a l'est i Z vertical. En el conjunt HDZ, H indica el component

horizontal, D (declinació) és la direcció angular apuntant cap a l'est, i la Z és la vertical. També s'utilitza la inclinació, I , definida com l'angle entre el component horitzontal, H , i el vector total del camp, F . Ambdós conjunts es relacionen amb simples relacions trigonomètriques:

$$X = H \cos(D) \qquad Y = H \sin(D) \qquad (1.1)$$

El component total del camp magnètic, F , es pot expressar amb:

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = \sqrt{H^2 + Z^2} \qquad (1.2)$$

així:

$$H = F \cos I \qquad Z = F \sin I \qquad (1.3)$$

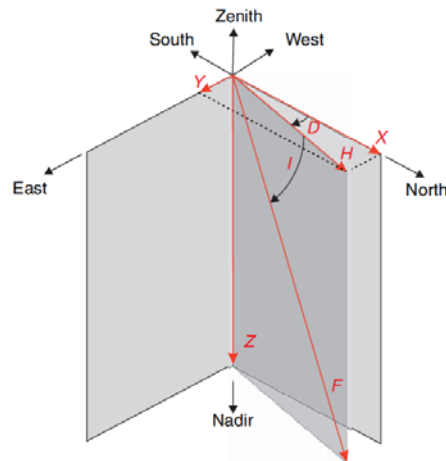


Figura 1.1. Els dos conjunts de coordenades més utilitzats per descriure el vector camp magnètic, XYZ i HDZ, i la seva representació geomètrica.

El valor del camp magnètic es pot descriure com la superposició de diferents contribucions al camp, d'aquesta manera podem separar les contribucions del camp intern i extern, així:

$$CM_{\text{terrestre}} = CM_{\text{intern}} + CM_{\text{extern}} \qquad (1.4)$$

Aplicant les equacions de Maxwell a una esfera podem expressar el potencial geomagnètic en coordenades esfèriques com [Udías and Mezcua, 1997]:

$$\begin{aligned}
 V(r, \theta, \phi) = & a \sum_{n=1}^{N_i} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} \{g_n^{m,i} \cos(m\phi) + h_n^{m,i} \sin(m\phi)\} P_n^m(\cos \theta) + \\
 & + a \sum_{n=1}^{N_e} \sum_{m=0}^n \left(\frac{r}{a} \right)^n \{g_n^{m,e} \cos(m\phi) + h_n^{m,e} \sin(m\phi)\} P_n^m(\cos \theta) \quad (1.5)
 \end{aligned}$$

on a és el radi de la Terra, P_n^m son el polinomis de Legendre, i el coeficients g i h fan referència al camp intern (amb la dependència $\alpha(1/r)^{n+1}$), o fan referència al camp extern (amb la dependència $\alpha(r)^n$). Si ens quedéssim amb els primers coeficients del potencial que descriu el camp intern obtindríem l'aproximació dipolar. Pel que fa al camp extern, cal tenir en compte les contribucions del Sol i la Lluna amb una clara dependència temporal. A partir d'aquesta formulació existeixen models matemàtics que permeten calcular el camp magnètic, els models *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF), pel camp intern [e.g. Langel, 1992], i els models de Tsyganenko pel camp extern [Tsyganenko, 1989]. Nosaltres ens ocuparem de variacions magnètiques ràpides, molt difícils de descriure bé amb els models. Pel nostre interès ens centrarem en la magnetosfera, la podem dividir en diferents parts depenent de les diferents conductivitats i densitats que presenten les diferents partícules depenent de la seva localització, d'aquesta manera a continuació descriurem de manera qualitativa les diferents parts de la magnetosfera que més afecten al fenomen del nostre interès.

Primerament a la figura 1.2 introduïm les diferents parts de la magnetosfera. La part més externa de la magnetosfera s'anomena arc de xoc o *bow shock*, es tracta de la frontera entre la magnetosfera i el medi interplanetari, es defineix com el lloc on la velocitat del vent solar disminueix abruptament, està situada a uns 13 R_e de la Terra al costat diürn [Campbell, 2003], R_e indica radis terrestres. Seguidament trobem el que es coneix com a embolcall magnètic o *magnetosheath*, és la zona entre el *bow shock* i la magnetopausa. La *magnetosheath* és una zona que conté partícules molt energètiques i on el valor i la direcció del camp magnètic varia erràticament. A continuació trobem la magnetopausa, lloc on la pressió del camp magnètic planetari està en equilibri amb la pressió del vent solar [Shue *et al.*, 1998]. La

magnetopausa canvia de mida, forma i posició depenent de les fluctuacions del vent solar, en condicions de calma geomagnètica es troba a uns 10 R_e .

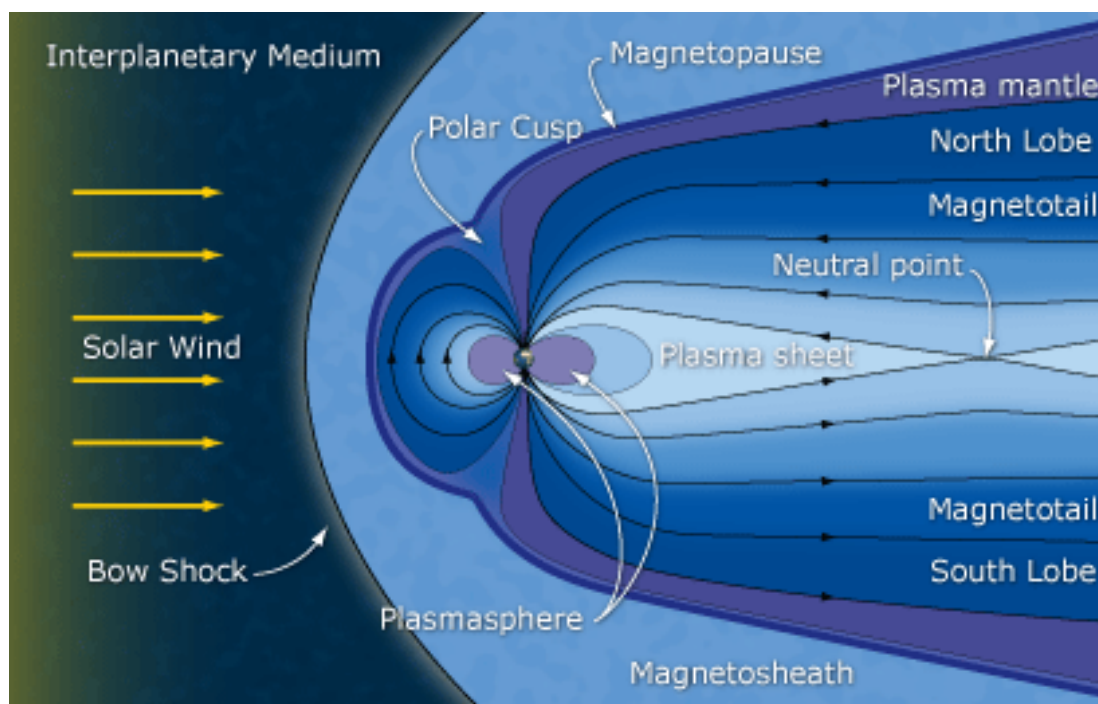


Figura 1.2. Representació esquemàtica de les diferents parts de la magnetosfera. Obtinguda de la ESA.

Fins ara hem presentat les parts més externes de la magnetosfera, a partir d'ara parlarem del que es coneix com a magnetosfera interna. En el sentit oposat a la compressió del camp magnètic, és a dir al sector nocturn, trobem la magnetocua o *magnetotail*, on la magnetosfera s'estén llargament. La magnetocua conté dos lòbuls, coneguts com lòbul nord i lòbul sud, que s'allarguen fins a uns 200 R_e ; on la densitat de partícules és molt baixa. Els dos lòbuls estan separats per una làmina de plasma on el camp magnètic és més intens i on hi ha una més alta densitat de partícules. Els valors típics de la densitat en les diferents parts de la magnetosfera són: 6 ions/cm³ pel vent solar prop de la magnetosfera, 1 ions/cm³ a la part diürna de la magnetosfera, 0.3 – 0.5 ions/cm³ a la làmina de plasma de la magnetocua i 0.01 ions/cm³ pels lòbuls de la magnetocua [Campbell, 2003].

La plasmaesfera és la regió situada just per sobre la ionosfera que es compon de partícules de baixa energia o plasma fred que envolta la Terra, arriba fins a una distància d'uns $5 R_e$. La plasmaesfera és l'extensió de la ionosfera, essent menys densa a mesura que ens allunyem de la Terra. Finalment, on les línies de camp magnètic es separen, unes es dirigeixen cap a la part diürna i les altres van cap a la part nocturna, trobem el que es coneix com la escletxa polar, per on les partícules del vent solar poden entrar i alimentar els sistemes de corrents de la magnetosfera.

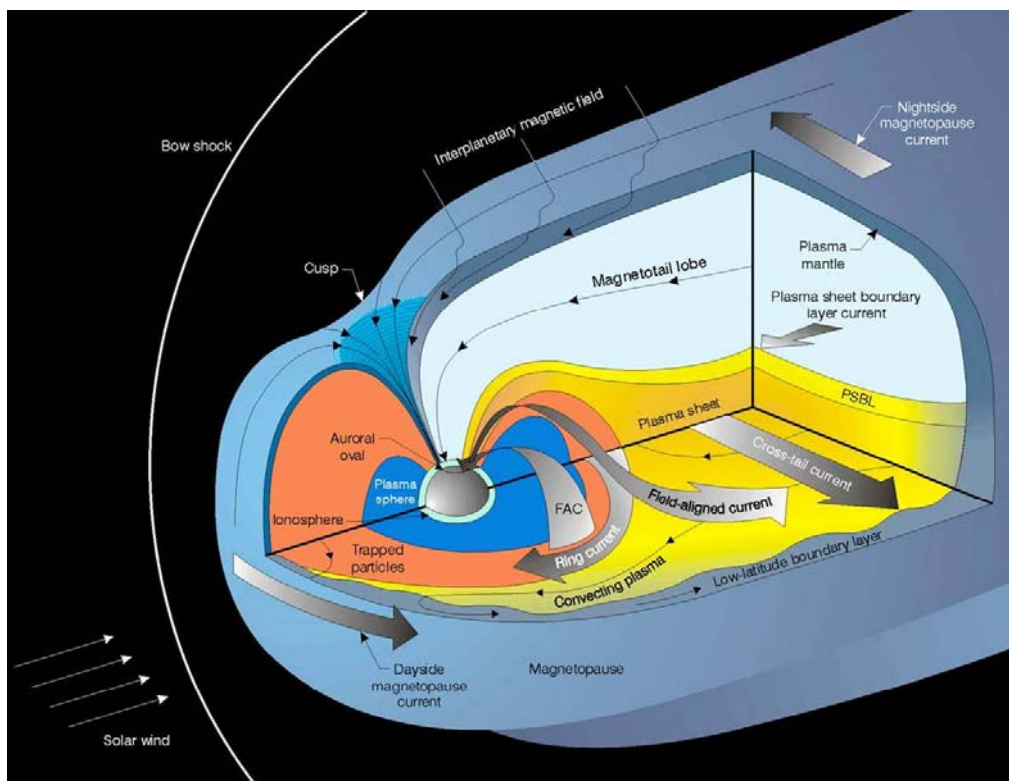


Figura 1.3. Representació esquemàtica dels diferents corrents elèctrics dintre la magnetosfera. Obtinguda del projecte *MMS-SMART*.

Com podem comprovar en la figura 1.3, dintre la magnetosfera hi ha una gran quantitat de càrregues en moviment que formen diferents corrents elèctrics; a continuació només descriurem breument el corrent de la magnetopausa, el corrent d'anella, els corrents alineats al camp i els corrents ionosfèrics, que són els que tenen un paper rellevant en el fenomen que ens interessa, els SCs. El sistema de corrents magnetosfèrics que té una

contribució més gran al camp geomagnètic és el corrent de la magnetopausa (també conegut com corrent de Chapman-Ferraro), flueix per a la zona diürna de la magnetopausa i origina els corrents de la magnetocua al costat nocturn [Parkinson, 1983], té una intensitat típica de 50 MA. La interacció d'aquests corrents amb els anells de radiació, a la plasmaesfera, propers a la Terra, produeixen el conegut com a corrent d'anella, que envolta la Terra en el pla equatorial del dipol magnètic. El corrent d'anella flueix en direcció cap a l'oest, amb una intensitat típica de 0.5-1 MA. Al terra produeix l'efecte de reduir la intensitat del camp en el component horitzontal, H. Quan succeeix una tempesta magnètica aquest corrent s'intensifica i l'efecte observat és un descens molt fort del component H del camp geomagnètic. Els corrents alineats al camp (*Field Aligned Currents*, FAC) es componen de dues regions concèntriques que envolten la Terra, flueixen des de la magnetosfera equatorial fins les altes latituds de la ionosfera, amb intensitats típiques de 1-3 MA. Aquests dos corrents flueixen en sentits oposats. Finalment els corrents ionosfèrics (*Ionospheric Currents*, IC) es generen a les regions polars de la ionosfera per l'acció de vents atmosfèrics deguts a l'escalfament solar. Hi ha dos tipus de corrents, els situats sobre les zones aurorals i els situats sobre les zones polars, aquests dos corrents giren en sentit contrari. Els corrents alineats al camp connecten els corrents ionosfèrics amb els altres sistemes de corrents elèctrics.

Un cop descrites breument les parts més importants de la magnetosfera i els principals corrents elèctrics, hem de veure on s'inclou el nostre fenomen a estudiar, els SCs, dintre les variacions magnètiques existents. Els SCs s'han d'incloure dintre de les variacions magnètiques ràpides, entenent ràpides com variacions de l'ordre dels minuts, ja que totes elles són produïdes per l'augment o variació de l'activitat solar. El que diferencia les diferents variacions ràpides és la part o sistema de corrents de la magnetosfera que s'activa en cada cas, veure taula 1.1 [Parkinson, 1983].

Variació	Variació en el temps	Origen
Tempestes magnètiques	Dies	Interacció vent solar-magnetosfera (corrents simètriques d'anella)
Subtempestes i badies	Hores	Precipitació iònica auroral de la cua (corrents asimètriques d'anella)
Sfe's	Minuts	Fulguracions solars
SC's	Minuts	Augment sobtat de la pressió del vent solar
Pulsacions magnètiques	Minuts-segons	Variació de la pressió del vent solar (ones hidromagnètiques)

Taula 1.1. Resum de les principals variacions irregulars, amb la seva duració i el seu origen. Adaptat del Parkinson [1983].

Les pertorbacions magnètiques més importants i relacionades íntimament amb els SCs són les tempestes magnètiques. El terme “tempesta magnètica” senyala una pertorbació magnètica d'abast mundial, caracteritzada per un descens pronunciat del camp, seguit per una recuperació gradual que pot durar entre 1 i 4 dies (la figura 1.4 mostra un exemple de tempesta magnètica enregistrada a l'Observatori de l'Ebre). El canvi en el camp magnètic pot ser petit o moderat, presentant una variació en el registre de 50 nT fins a 300 nT, però el seu abast mundial implica que les variacions ocorregudes a l'espai han estat força grans. En els registres continus del camp magnètic obtinguts en els observatoris magnètics, o magnetogrames, una tempesta magnètica consisteix en un descens del camp magnètic fàcilment observable. Habitualment una tempesta necessita quasi un dia per desenvolupar-se i disminueix paulatinament al llarg dels dies següents. Les tempestes es caracteritzen per la injecció d'una apreciable quantitat d'ions i electrons de la cua de la magnetosfera en el cinturó de radiació exterior fent augmentar ràpidament el corrent d'anella, obtenint així un efecte d'abast mundial.

Les subtempestes no injecten generalment tantes partícules com les tempestes i es manifesten d'una manera més intensa a les zones aurorals. Una subtempesta, al igual que una tempesta, es forma quan el camp interplanetari té orientació Sud, i segons el model de magnetosfera oberta (figura 1.5), es poden unir les línies de camp del vent solar i del camp geomagnètic. Llavors hi ha un flux d'energia i partícules més gran que entra a la magnetosfera. El que passa és que les línies de camp magnètic són primer comprimides cap a la cua

i després s'alliberen accelerant una gran quantitat de partícules cap a la Terra, entrant per les zones aurorals [Parkinson, 1983].

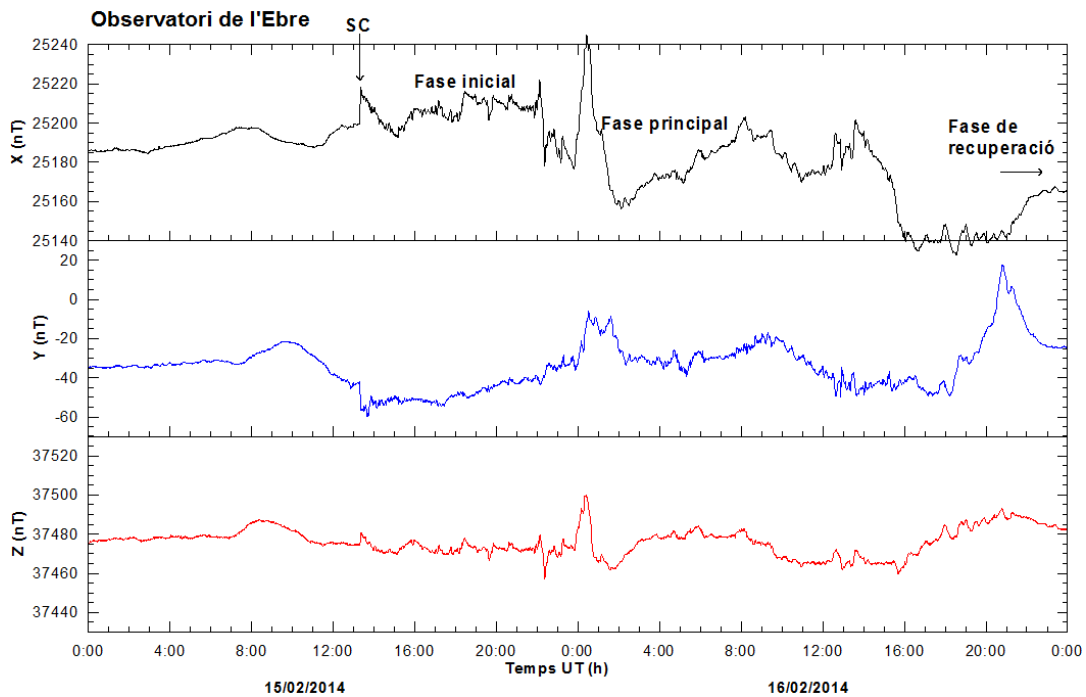


Figura. 1.4. Magnetograma corresponent a una tempesta magnètica, enregistrada a l'Observatori de l'Ebre els dies 15 i 16 de febrer del 2014. La tempesta magnètica s'observa millor en el component X del camp. Es veu clarament l'inici amb l'augment abrupte (SC), la fase inicial, una baixada important del camp o fase principal, i una fase de recuperació que es va allargar diversos dies.

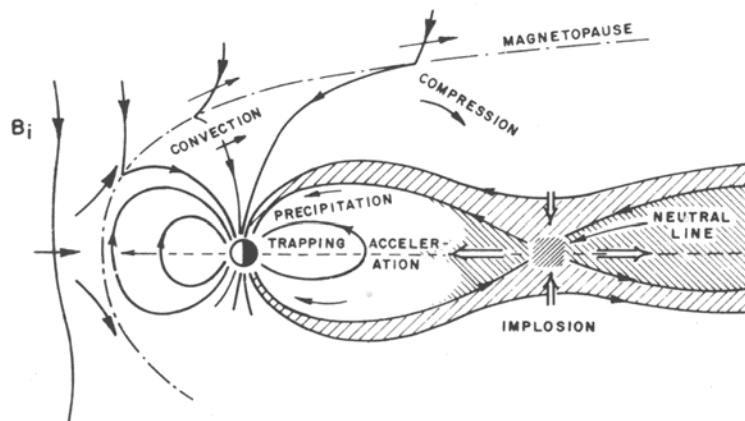


Figura. 1.5. Model de magnetosfera oberta on es representa la combinació de les línies de camp, és un model per explicar les subtempestes. [Parkinson, 1983]

Així, en les regions polars, durant una subtempesta, les aurores es fan més intenses, extenses i agitadaes. També s'observen grans descensos en el camp magnètic. A l'espai, els ions i electrons flueixen en major quantitat i amb més altes energies, essent els canvis en el camp magnètic molt més profunds

que els observats sobre la Terra [Parkinson, 1983]. Els satèl·lits, en òrbita sincrònica, que es troben prop de la mitja nit, quan irromp una subtempesta, poden veure com el camp cau fins a la meitat del seu valor, en la làmina de plasma s'observen fluxos molt ràpids de plasma amb velocitats entre 100 i 1000 km/s.

Per a que es produeixi una tempesta s'han de donar les mateixes condicions que en una subtempesta, però a més es necessita una aportació extra de partícules, un increment significatiu de la pressió del vent solar. El caràcter mundial el dóna el corrent d'anella, que en una situació de calma magnètica contribueix més aviat poc en el camp mesurat a la superfície de la Terra, però, si la quantitat de partícules atrapades pel camp magnètic sofreix un increment important, el corrent d'anella es fa més intens i l'efecte magnètic en la Terra pot augmentar en 10 cops o més.

El principal efecte sobre la magnetosfera és la injecció des de la cua de multitud d'ions i electrons que fan que el corrent d'anella es desenvolupi de manera significativa. Les subtempestes també injecten partícules però no tantes ni tant energèticament carregades. Les tempestes magnètiques normalment tenen un principi ben definit, que es coneix com començament abrupte o SC, és l'arribada d'una pertorbació interplanetària.

1.2. Aspectes observacionals i morfològics dels SCs

Com a conseqüència de l'arribada d'una pertorbació interplanetària, per una augment de la pressió del vent solar, es comprimeix la magnetosfera i el camp geomagnètic augmenta sobtadament, aquest augment sobtat és el que es coneix com a SC. Generalment l'aspecte d'un SC en un magnetograma d'un observatori terrestre s'assembla al que en matemàtiques es coneix com una funció esglaió [per exemple Araki, 1977; Araki, 1994; Tsunomura, 1998]. No obstant això, l'amplitud de la variació i la forma particular de dita variació dependrà de la ubicació de cada observatori (hora local i latitud). Els valors típics de l'amplitud i la durada dels SCs varia molt dependent de la latitud de

l'observatori, com a exemple per observatoris de latitud mitja els valors típics van de 10 nT a 30 nT per l'amplitud i de 3 a 4 minuts per la durada, però la variabilitat és molt gran i s'observen SCs de gran amplitud (fins 60-80 nT) o molt petits (menys de 5 nT) [Maeda *et al.*, 1962; Tsunomura, 1998]. Els observatoris de latituds altes normalment enregistren amplituds més grans, al igual que els observatoris equatorials. A manera d'exemple, a la figura 1.6 podem veure com s'enregistra un SC a diferents observatoris de diferents latituds i amb diferent hora local (la taula 1.2 mostra les localitzacions dels observatoris emprats a la figura 1.6). En concret, per a latituds mitjanes poden aparèixer pics (positius o negatius) a l'inici de la funció esglaó, però en latituds altes una estructura de dos polsos successius domina sobre l'estructura de funció esglaó [Tsunomura, 1998]. A més, poden ocórrer altres variacions magnètiques de morfologia similar als SCs i confondre als observadors. Hi ha moltes variacions del camp geomagnètic (canvis sobtats amb increments o descensos de el component horitzontal simultanis a tot el món) que no estan relacionats directament amb els SCs.

Els salts abruptes del camp geomagnètic (SCs) són clarament un fenomen global. Tenen un temps d'inici força clar i poden ser detectats a qualsevol lloc de la magnetosfera i quasi simultàniament al terra. La font dels SCs avui en dia es clarament identificada com el xoc del vent solar amb la magnetopausa o discontinuïtats en el flux de partícules del vent solar. L'ocurrència global simultània amb temps d'inici molt marcats i la identificació de les fonts són les principals característiques que distingeixen els SCs de qualsevol altre fenomen geofísic.

Els començaments abruptes han estat observats al començament d'episodis on augmenta l'activitat magnètica. Originalment aquests episodis van ser classificats com a part de la pertorbació, com el principi de la tempesta. Només posteriorment, aquests fenòmens van ser estudiats separatament i anomenats "començament sobtat de tempesta" en anglès, "*Sudden Storm Commencements*" (SSC). No obstant això, alguns autors varen tenir la intuïció de que les tempestes no eren el fenomen constituent dels SSCs i varen usar el terme "*Sudden Commencement*" (SC) per anomenar-los, emfatitzant que la

principal característica està en el canvi bruscat. Al llarg dels anys els dos termes s'han utilitzat indistintament. La detecció i classificació dels SSCs o SCs ha evolucionat amb els esforços dels observadors (incloent els avanços instrumentals) i dels models. A mesura que el coneixement dels mecanismes físics que produeixen els començaments abruptes creixia, el criteri per detectar i classificar s'anava refinant, i les noves llistes d'esdeveniments que produïen els observadors influenciaven els models teòrics basats en aquestes dades, d'aquesta manera observació i modelització van avançar conjuntament (per veure com ha evolucionat el concepte de SC Curto *et al.* [2007]).

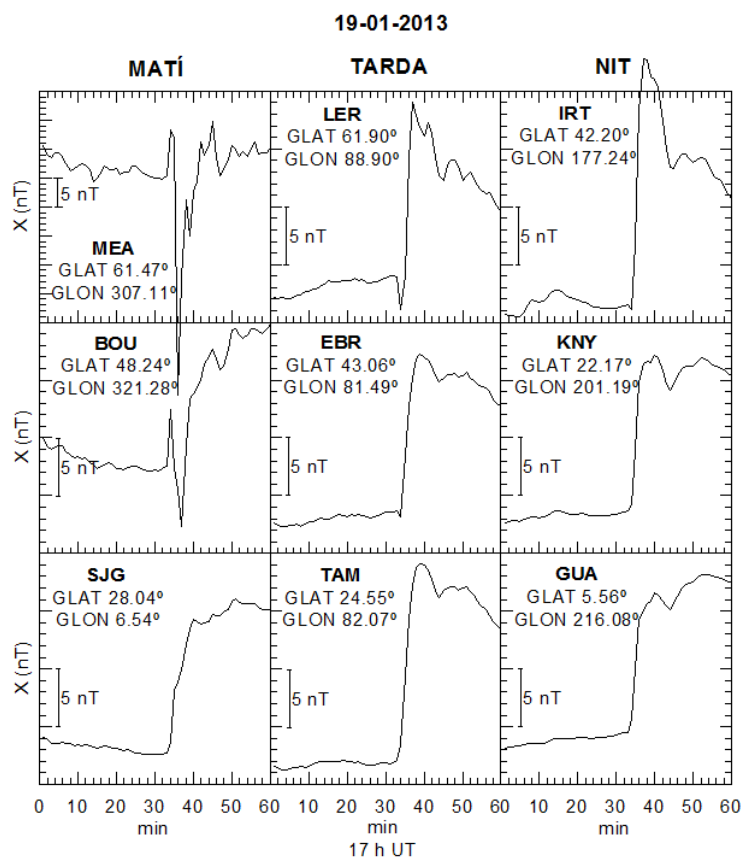


Figura 1.6. Representació del SC ocorregut el 19 de gener del 2013 sobre les 17:32 h UT enregistrat en diferents observatoris. En cada columna trobem observatoris amb aproximadament la mateixa hora local, la primera columna al sector dia, la segona al sector tarda i la tercera al sector nit. Els observatoris estan ordenats en files segons la seva latitud. S'indica la latitud i longitud geomagnètica per cada observatori. Podem observar com la forma del SC varia depenent de la latitud i l'hora local, així, pels observatoris de baixa latitud, l'aspecte s'assembla força a una funció esglaó, com en GUA o KNY, en canvi pels observatoris de latituds altes i mitges apareixen pics positius o negatius abans o després de la pujada principal. En el cas de LER tenim un pic negatiu seguit d'un pic positiu, en canvi a BOU el sentit dels pics està invertit, primer un de positiu seguit d'un de negatiu.

1.2.1. Aspectes observacionals a l'espai

Com hem comentat anteriorment, el que provoca l'augment sobtat del camp geomagnètic és un augment sobtat de la pressió del vent solar i la compressió provocada per aquest en xocar amb la magnetopausa. A la figura 1.7 presentem tres casos d'un augment de la pressió del vent solar, enregistrat pel satèl·lit ACE, que a terra van provocar l'aparició de tres SCs. El satèl·lit ACE està situat fora de la magnetosfera, en l'espai interplanetari. Els augments del vent solar normalment es presenten com augment tipus funció esglaó.

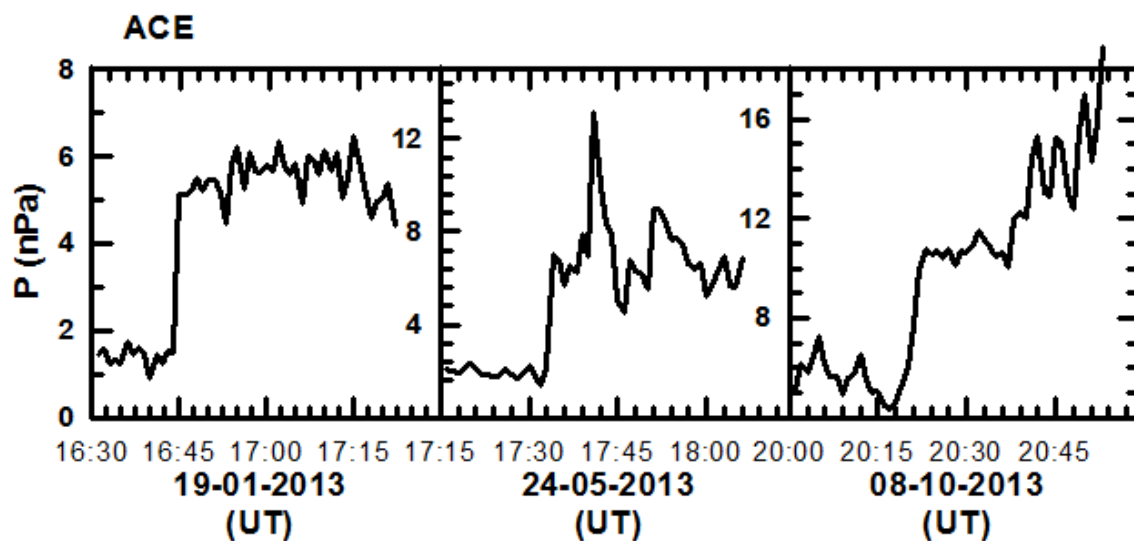


Figura 1.7. Tres exemples d'augment sobtats de la pressió del vent solar enregistrats pel satèl·lit ACE. En concret, en el primer cas la forma de funció esglaó és més clara. Tots tres casos van provocar SCs en el camp geomagnètic.

Dintre de la magnetosfera, en l'òrbita geosincrònica, s'observa una clara compressió del camp magnètic en forma d'esglaó al sector diürn. Les amplituds dels SCs tenen una variació diürna amb un màxim al migdia, figura 1.8 [Kokubun, 1983]. La compressió es propaga en direcció a la Terra per una ona hidromagnètica.

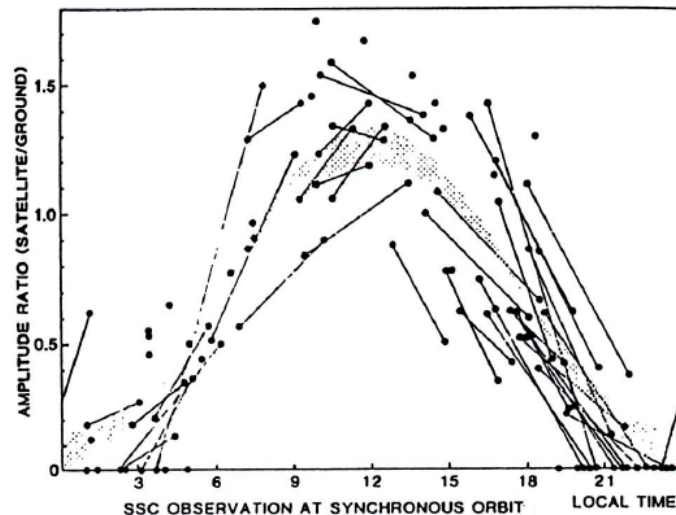


Figura 1.8. Amplitud dels SC observats en una òrbita geosincrònica. S'observa una clara dependència amb el temps local, amb un màxim prop del migdia. Els punts són observacions fetes per un satèl·lit, les ratlles uneixen dues observacions del mateix esdeveniment. [Kokubun, 1983].

1.2.2. Morfologia dels SCs en els observatoris geomagnètics

L'aspecte morfològic bàsic d'un SC vist pels observatoris terrestres a través del seu registre en un magnetograma es correspon a una funció esglaó, però hi han altres aspectes que s'han de tenir en compte per fer un estudi seriós sobre el fenomen. A partir d'observacions en diferents latituds i diferents hores locals les principals característiques són les següents [Araki, 1994]:

- La forma d'ona dels SCs és com una funció esglaó a les latituds baixes, excepte al costat diürn de l'equador, figura 1.9.

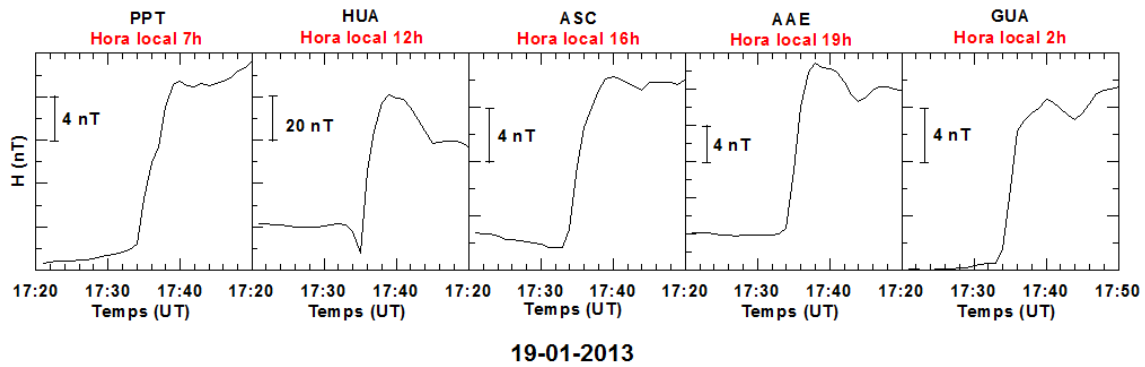


Figura 1.9. Exemple del SC del 19 de gener de 2013 enregistrat per observatoris de baixa latitud. En tots casos s'observa la forma de funció esglaió excepte pel cas de HUA situat a l'equador magnètic al costat diürn.

- Per a latituds mitjanes, la forma d'ona del component H s'assembla més a una funció esglaió però es pot observar una estructura de dos polsos, però amb una amplitud petita (per exemple les estacions d'EBR i BOU a la figura 1.6).

- Per estacions de latituds altes, la forma d'ona de l'SC en el component H consisteix en dos polsos successius en sentits oposats (per exemple l'estació MEA a la figura 1.6). Per a latituds aurorals, al matí un pols positiu precedeix el següent pols negatiu. El sentit dels polsos és l'oposat a la tarda, per aquestes latituds aurorals (figura 1.10). L'amplitud dels polsos decreix a mesura que baixem de latitud.

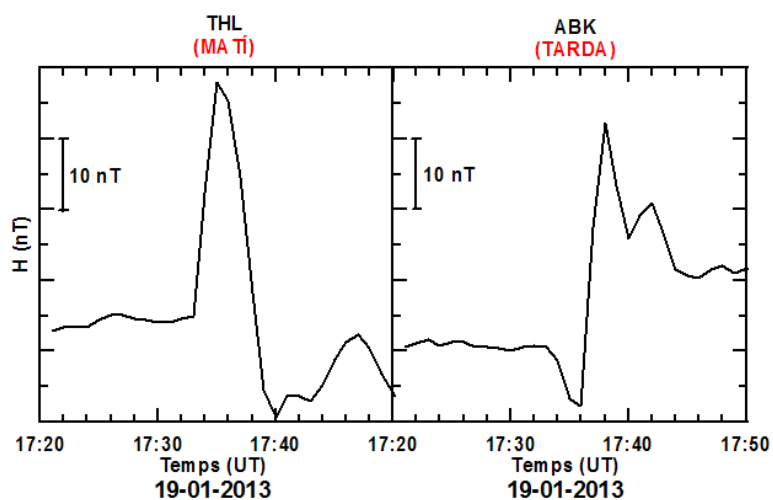


Figura 1.10. Exemple del SC del 19 de gener de 2013 enregistrat per dues estacions d'alta latitud, una al matí i l'altra a la tarda. S'observa l'estructura de dos polsos en sentit oposats al matí i a la tarda.

- Per a latituds equatorials, durant la nit, la forma d'ona dels SCs s'assembla més a una funció esglaó però un petit pols positiu es pot superposar a la pujada del SC, figura 1.11.

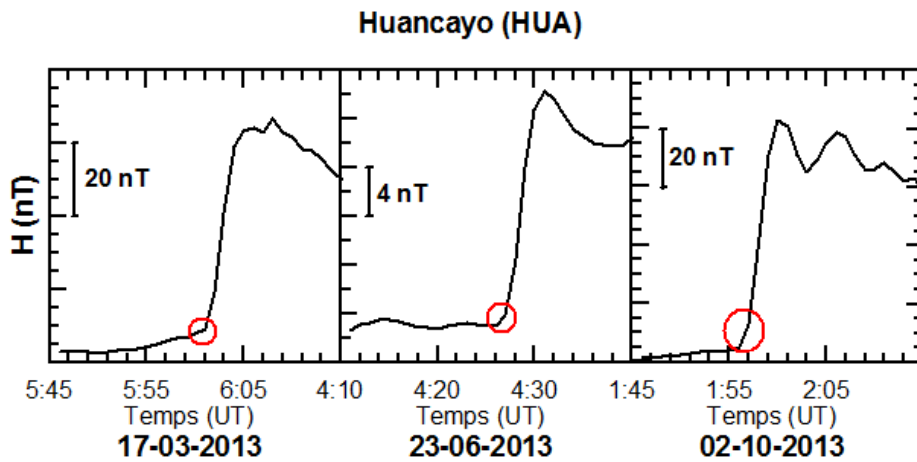


Figura 1.11. Tres exemples de SCs enregistrats durant la nit local a l'estació de Huancayo, situada a l'equador magnètic. En els tres casos s'observa un petit impuls positiu al començament del SC.

- Per a latituds equatorials, durant el dia, l'estructura de dos polsos torna a aparèixer. La forma d'ona es similar a la que mostren les altes latituds durant la tarda amb un impuls negatiu previ, figura 1.12. L'amplitud dels dos polsos és molt més gran, comparat amb l'amplitud a baixes latituds.

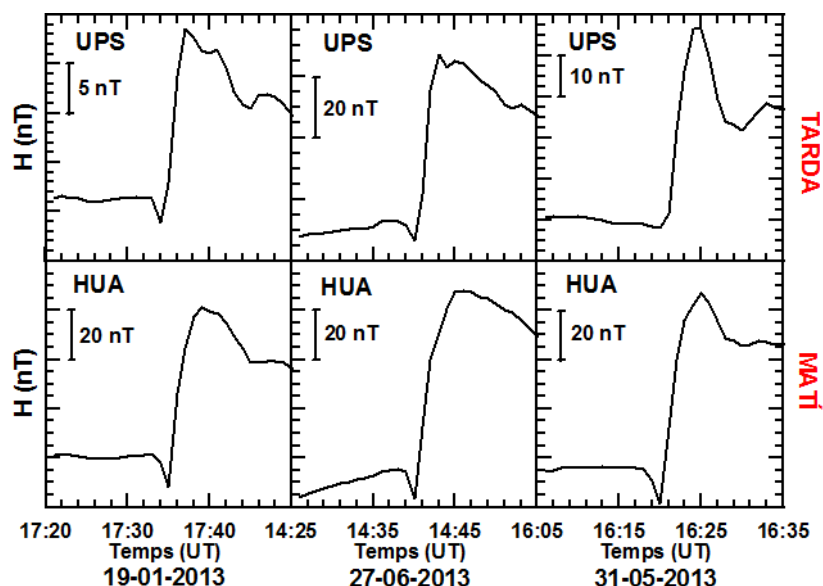


Figura 1.12. Tres exemples de SCs enregistrats a la tarda local a Uppsala (Suècia), i al matí local a Huancayo (Perú). En els tres casos s'observa la mateixa forma d'ona en totes dues estacions.

A la taula 1.2 es llisten les coordenades geogràfiques i geomagnètiques dels observatoris utilitzats en les figures 1.6, 1.9, 1.10, 1.11 i 1.12.

Codi IAGA	Nom	Latitud geogràfica	Longitud geogràfica	Latitud geomagnètica	Longitud geomagnètica
AAE	Addis Abeba	9.03°	38.76°	5.36°	112.16°
ABK	Abisko	68.35°	18.82°	66.10°	114.47°
ASC	Ascension Island	-7.95°	345.62°	-2.57°	57.06°
BOU	Boulder	40.13°	254.76°	48.24°	321.28°
EBR	Ebre	40.82°	0.49°	43.06°	81.49°
GUA	Guam	13.59°	144.87°	5.56°	216.08°
HUA	Huancayo	-12.03°	284.68°	-2.07°	356.97°
IRT	Irkutsk	52.16°	104.45°	42.20°	177.24°
KNY	Kanoya	31.42°	130.88°	22.17°	201.19°
LER	Lerwick	60.13°	358.81°	61.90°	88.90°
MEA	Meanook	54.61°	246.65°	61.47°	307.11°
PPT	Papeete	-17.56°	210.42°	-15.13°	285.49°
SJG	San Juan	18.11°	293.85°	28.04°	6.54°
TAM	Tamanrasset	22.79°	5.53°	24.55°	82.07°
THL	Thule	77.48°	290.83°	87.40°	14.74°
UPS	Uppsala	59.90°	17.35°	58.51°	106.27°

Taula 1.2. Coordenades geogràfiques i geomagnètiques dels observatoris utilitzats en les figures 1.6, 1.9, 1.10, 1.11, i 1.12.

Essencialment cal destacar que l'estructura de dos polsos es veu a altes latituds i al sector diürn a latituds equatorials. En canvi, no s'observa ni a l'espai interplanetari ni en òrbites geosincròniques. Això implica que els corrents elèctrics que flueixen per la ionosfera i la magnetosfera juguen un paper important en la forma d'ona dels SCs enregistrats al terra, per poder interpretar correctament les formes d'ona s'ha de tenir compte una distribució realista de la conductivitat ionosfèrica.

1.2.3. Temps de pujada dels SCs

El temps de pujada d'un SC, definit com l'interval de temps entre l'hora d'inici i el màxim del component H (figura 1.13), apareix generalment en els magnetogrames com un augment monòton només pertorbat per petites fluctuacions. El temps de pujada dels SCs es distribueix entre 1-10 minuts amb l'ocurrència més freqüent en 3 - 4 minuts a latituds baixes [Maeda *et al.*, 1962; Tsunomura, 1998].

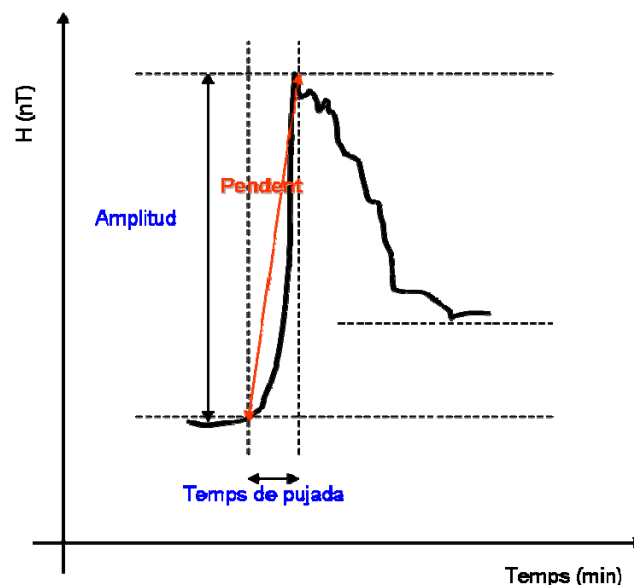


Figura 1.13. Esquema simple d'un SC amb les seves diferents característiques, amplitud, pendent i temps de pujada.

Nishida [1966] assenyala els següents elements com mecanismes que poden afectar el temps de pujada dels SCs:

- El temps necessari per a que la part frontal del front de xoc del vent solar o discontinuïtat escombri la distància geoeffectiva al llarg de la magnetosfera.
- La diferència en el temps del recorregut de les ones hidromagnètiques (HM) fins la seva observació a terra.
- El gruix de la part frontal del xoc o discontinuïtat del vent solar.
- La inèrcia dels plasmes magnetosfèrics contra una sobtada deformació.
- L'ampliació del front d'ona durant el seu pas a través de la magnetosfera a causa de multi-reflexió.

S'han realitzat diverses anàlisis sobre el temps de pujada i la relació entre el temps de pujada i l'amplitud dels SCs [Yokouchi, 1953; Dessler *et al.*, 1960; Chapman *and* Bartels, 1962; Ondoh, 1963; Pisharoty *and* Srivastava, 1962; Nishida, 1964, 1966; Burlaga, 1970; Mayaud, 1975]. Es suggereix el primer punt anterior com el principal mecanisme que influeix en l'augment del temps de pujada. Com que el temps de pujada mostra una variació diürna [Yokouchi, 1953], Araki *et al.* [2004] van realitzar una anàlisi utilitzant només SCs durant la nit i van arribar a la conclusió que el primer punt determina principalment el temps de pujada, trobant la distància mitja de la magnetopausa geoeffective en uns 30Re (Re, radis terrestres). Si acceptem aquesta distància, l'augment del temps de pujada és pot determinar aproximadament segons la relació $30Re/V_{sw}$, on V_{sw} és la velocitat del front de xoc del vent solar o discontinuïtat. Aquesta consideració en el temps de pujada suggereix que la font dels SCs observats a terra es distribueix sobre tota la superfície de la magnetopausa.

1.3. Ressenya històrica del coneixement del fenomen. Notació, definició i llistes d'esdeveniments

Degut a les clares característiques globals del fenomen, els SCs van atreure ràpidament l'atenció de molts científics. Almenys la simultaneïtat global dels SCs va ser destacada ja per Adams [1892] i Ellis [1892]. Per abordar estudis científics seriosos eren necessàries les llistes d'existència d'aquest fenomen, però donada la gran variabilitat del mateix van proliferar diferents notacions per intentar detectar i classificar aquests fenòmens durant els primers anys del segle XX. Així, la notació és un altre punt important en el procés d'estudi i normalització dels SCs. Els primers estudis van començar amb llistes específiques elaborades sota els seus propis criteris: Moos [1910] a Bombai, amb dades del període 1846-1905; Chapman [1918] i Rodés [1922] van utilitzar nomenclatura especial per referir-se a aquests esdeveniments. Per exemple, a la llista de tempestes magnètiques de l'observatori de Colaba [Banerji, 1926] hi ha només notes addicionals amb el comentari "Començament sobtat" quan hi

era apropiat. Més tard, Chree [1925] va utilitzar la nomenclatura S.C. per anomenar-los.

Un aspecte fonamental per a l'estudi dels SCs fa referència al temps d'inici del fenomen. Pels SCs es considera el temps d'inici com el punt on hi ha un canvi dramàtic en el pendent en el magnetograma. La precisió en aquest paràmetre depèn de la nitidesa de la discontinuïtat, i també de la precisió dels senyals de temps dels observatoris i el desenvolupament d'aparells de mesura. Els antics aparells de mesura magnètics eren controlats per rellotges mecànics independents (fins i tot per algun rellotge de corda). Així, el grau de simultaneïtat entre els diferents observatoris va ser una de les principals preocupacions en les primeres etapes de la mesura.

A la primera assemblea després de la creació de la *International Association of Geomagnetism and Aeronomy* (IAGA) (Roma 1922), Rodés, en aquell moment Director de l'Observatori de l'Ebre, va presentar el problema de la no simultaneïtat dels SCs i una teoria per explicar aquest fet [Rodés, 1922; Bauer, 1923]. La qüestió de la simultaneïtat o la propagació dels SCs, seguia sent un tema de debat, en part a causa de la dificultat per obtenir una referència de temps precisa amb els instruments disponibles.

A l'Assemblea de la IAGA celebrada a Lisboa (1933), Tanakade, utilitzant registres fets amb els magnetògrafs ràpids de Kakioka i Kanoya, i seleccionant tres SCs molt marcats en el component H va comparar els resultats amb altres mesures d'observatoris llunyans, i només va trobar uns pocs segons de diferència [Tanakade, 1934]. Va deduir que el mateix esdeveniment va ser registrat gairebé al mateix temps en totes les estacions amb característiques que depenen del temps local. En el mateix informe, va referir la dificultat de definir el punt inicial exacte dels SCs, un problema no resolt totalment encara. Es va instar als observadors a tenir molta cura per mantenir l'hora exacta a les marques de registre de temps i en les mesures.

El fenomen SC va estimular Chapman i Ferraro [1931, 1932 i 1933] per construir la seva teoria pionera per explicar la interacció entre el corrent corpuscular del vent solar i el camp geomagnètic. Chapman i Ferraro van deduir l'existència de la magnetosfera abans que s'hagués pogut fer cap mesura en l'espai interplanetari.

Rodés [1932] va examinar la variació secular en l'ocurrència de SCs trobant un període d'onze anys que donava suport a l'existència d'una relació entre l'activitat solar i la freqüència dels SCs. Va examinar la variació anual, trobant dos màxims equinoccials coincidint amb la més alta latitud heliocèntrica de la Terra, també va examinar la variació diürna amb un mínim al voltant de les 0800 LT (hora local) i un màxim sobre les 2100 LT. McNish [1934] va confirmar els resultats de Rodés i va trobar una variació estacional en sentits oposats en els hemisferis nord i sud.

Durant l'Assemblea de la IAGA d'Edimburg (1936) es va proposar un codi de 5 números per a la difusió dels SCs [Rodés, 1937]. Es van utilitzar diferents llistes per dur a terme els estudis sobre la freqüència d'existència: Rodés [1932], amb 213 casos enregistrats a Ebre; McNish [1934], amb 151 casos de Watheroo, i Newton [1948], amb 681 casos de Greenwich. Newton [1948] va trobar la presència d'un impuls preliminar subjecte a un efecte diürn. En el seu estudi, els SCs amb un impuls preliminar en sentit oposat a la pujada global, presentaven un mínim diürn (0800-0900 LT). Watson i McIntosh [1950] van elaborar una llista de 340 començaments abruptes observats a Lerwick, aquests últims van introduir una notació pròpia, SC (+) per un SC amb un impuls positiu preliminar, o SC (-+) per un SC amb un doble pic, primer negatiu i després positiu.

Howe [1939] va trobar SCs no seguits per tempestes i així Ferraro *et al.* [1951] van distingir en les seves anotacions entre començaments abruptes de tempestes magnètiques (SSC) i impulsos sobtats (SI). Respecte als estudis sobre l'amplitud, Ferraro i Unthank [1951] van trobar que les majors amplituds es produeixen prop de les 0000 LT, després de la qual es produeix una caiguda fins al mínim sobre les 0700 LT. Sugiura [1953] va trobar que hi ha una variació

solar diürna en els SCs durant les hores de dia a Huancayo, observatori situat baix de l'equador geomagnètic.

Paral·lelament els estudis sobre la física del fenomen continuaven. Per exemple, Gold [1955] va notar la ràpida arribada a la Terra de perturbacions precedides de fulguracions solars o *solar flares* i va postular l'existència d'un xoc entre el límit capdavanter del núvol de plasma ejectat pel *solar flare* i la magnetosfera com una explicació per la pujada ràpida dels SCs.

L'augment de l'interès per aquests fenòmens va produir que es creessin diferents comitès dintre de la *Association of Geomagnetism and Aeronomy* (IAGA) i finalment es va concretar amb la creació del Servei Internacional de Variacions Magnètiques Ràpides (SRMV), organisme qui finalment elaboraria les llistes oficials.

Romaña, cap del servei SRMV durant força anys, insistia en la importància d'una definició clara de la morfologia del fenomen per evitar el risc de fer estadístiques inhomogènies i en conseqüència sense utilitat. Donada la varietat d'interpretacions d'un SC, va considerar necessària la introducció d'una definició clara amb el nivell de coneixements que es tenia aleshores. Després de la reunió de la IAGA a Brussel·les (1955) va enviar una circular als observadors col·laboradors amb noves instruccions sobre el fenomen a ser classificat. Va fer servir la nomenclatura SSC i SSC*. Es va definir SSC com un impuls abrupte seguit d'un increment en l'activitat magnètica amb les característiques d'una tempesta amb un període prou llarg. I amb el nom SSC* s'anomenava el començament abrupte precedit d'un moviment bruscat contrari al moviment principal. Per il·lustrar les traces bàsiques, a partir de casos paradigmàtics va elaborar el document "*Atlas of rapid magnetic variations*" [Romaña, 1959] que va ser designat com a guia oficial per als observadors en la seva tasca de detecció.

Els estudis a terra sobre els SCs van tenir un fort desenvolupament durant l'any geofísic internacional IGY (1957-58) amb la instal·lació de magnetòmetres de més alta resolució temporal i juntament amb la millora dels senyals de temps dels observatoris va suposar una millora important per estudiar aspectes claus com la simultaneïtat dels SCs. El descobriment del vent solar [Neugebauer *and* Snyder, 1962] i el xoc d'aquest amb la magnetopausa [Sonett *et al.*, 1964] com a conseqüència d'observacions a l'espai interplanetari i la magnetosfera van ajudar a la comprensió de l'estructura tridimensional dels SCs.

L'aparició d'un impuls en el sentit contrari de l'augment principal, els SSC* (com el que es pot veure a la figura 1.6 a l'estació de LER), que apareix en l'etapa inicial dels SCs era desconcertant. Nagata i Abe [1955] per explicar aquest fet van proposar un corrent equivalent de tipus doble vòrtex. Matsushita [1962] va informar que els SSC* estadísticament apareixen a la tarda en latituds altes i durant el dia a l'equador. Va mostrar també estadísticament que, en latituds altes, els SSC* apareixen predominantment a la tarda, mentre que al matí apareix un impuls positiu preliminar (per exemple les estacions MEA i LER de la figura 1.6).

Les diferències morfològiques dels SCs van provocar un debat intens per intentar explicar aquestes diferències, especialment aquelles referents als impulsos negatius preliminars, SSC*. Encara que els SSC* en les altes latituds eren coneguts com un fenomen freqüent, les propietats dels SSC* equatorials no ho eren tant. Primerament, alguns investigadors van pensar que els SSC* equatorials eren un fenomen aïllat, rar o anòmal [per exemple, Gerard, 1959]. Això possiblement era degut a la dificultat de trobar SSC* a partir dels magnetogrames disponibles a l'època per la seva poca resolució temporal. Després de la millora instrumental, Araki i Ishizaki [1973] van inspeccionar 355 SCs utilitzant els moderns magnetogrames de Guam, observatori de baixa latitud, i van trobar que més o menys la meitat del total de SCs eren SSC* al voltant de les 13h LT (hora local). Rastogi i Sastri [1974] també van obtenir una distribució temporal al voltant del 50% en la ràtio de SSC* al voltant del migdia local a partir dels magnetogrames de l'estació de Kodaikanal. A partir de llavors

va quedar ben establert l'existència de SSC* equatorials al voltant del migdia (per exemple l'estació HUA a la figura 1.9).

El següent problema era si els SSC* equatorials estaven relacionats amb els SSC* observats a latituds altes. Hi han algunes perturbacions geomagnètiques que ocorren simultàniament en la regió polar i l'equatorial. Per exemple, micropulsacions geomagnètiques de períodes d'almenys uns quants minuts [Matuura, 1961] i perturbacions polars geomagnètiques tipus DP-2 [Nishida *et al.*, 1966]. El problema de la relació entre els SSC* equatorials i els SSC* polars era un aspecte important per explicar la dinàmica general de la magnetosfera i la ionosfera. Araki [1977] va comprovar la correspondència un a un dels SSC* en les dues regions, a la tarda en latituds altes i durant el dia a latituds equatorials, i va trobar que els SSC* es produeixen simultàniament amb una forma d'ona semblant (per exemple figura 1.12).

El desenvolupament de les observacions amb satèl·lits van revelar de manera observacional que l'origen dels SCs era un increment sobtat de la pressió dinàmica del vent solar associat al xoc d'aquest amb la magnetopausa o a una discontinuïtat [per exemple Hines, 1957; Dessler *and* Parker, 1959; Piddington, 1959]. També van mostrar que les tempestes magnètiques generalment ocorren quan el camp magnètic interplanetari (*Interplanetary Magnetic Field*, IMF) té orientació sud (B_z negativa). Com que un xoc o una discontinuïtat interplanetària s'acompanya sovint d'un IMF apuntant al sud es freqüent que els SCs vaguin seguits de tempestes geomagnètiques. El terme impuls brusc (*Sudden Impulse*, SI) es va començar a utilitzar per increments sobtats del component magnètic H però sense que el segueixi una tempesta. Inicialment els SIs eren considerats com fenòmens de diferent origen que els SSCs. En canvi, Burlaga i Ogilvie [1969] van arribar a la conclusió que els SSCs i els SIs són essencialment iguals i tots dos poden ser causats per xocs o discontinuïtats del vent solar. La mateixa idea també va ser proposada per Nishida [1978].

Pel que fa a la notació, a mesura que els nous avenços feien més interessant el fenomen, noves notacions varen proliferar. Després d'una recomanació de la *International Association of Terrestrial Magnetism and Electricity* (IATME), les sigles s.s.c. i s.i. van ser utilitzades per Yamaguchi [1958]. D'altra banda, Matsushita [1957] va proposar un tipus de notació (Sc,- Sc,Sc-) on el signe de l'esquerra indica un impuls negatiu anterior a l'impuls principal i a la dreta indica un augment sobtat seguit d'una baixada que dura uns minuts. Arran d'aquest tipus de classificació i amb dades del IGY es va estudiar la complexitat de les variacions locals del component horitzontal del camp magnètic [Matsushita, 1960, 1962], trobant les distribucions segons la latitud i l'hora local: Sc- dominants durant el matí a les latituds altes, -Sc dominants a la tarda en latituds altes i els Sc eren presents a qualsevol hora del dia en latituds mitjanes i baixes. Seguint aquesta línia, Akasofu i Chapman [1959] van proposar un nou tipus de notació segons el signe i l'ordre dels canvis sobtats en les variacions del component magnètic H (Sc (+), Sc (- +), Sc (+ -), Sc (-), Sc ()). La nomenclatura Sc (+ +) s'aplicaria als dos augments successius d'H. Tot i així, Bartels, en nom del 10è Comitè de Variacions Magnètiques Ràpides, va decidir no adoptar el canvi proposat i es va continuar amb la clàssica denominació de SSC i SSC* [Romañá, 1959]. No obstant això, les dues nomenclatures han coexistit durant força anys.

Mayaud [1973] va presentar una nova llista amb 100 anys de dades de SCs i va ser acceptada per la IAGA com a llista oficial. A partir de 1976, les llistes de SCs han estat elaborades pel Servei de Variacions Magnètiques Ràpides, que s'allotja a l'Observatori l'Ebre, seguint les recomanacions de Mayaud adoptades per la IAGA. L'interès de continuar amb la catalogació de SCs ha estat explicitada en diverses resolucions de la IAGA: Madrid (1969) (IAGA *Bulletine* No 32a)¹, Grenoble (1975) (resolució² número 5) i Upsala (1997) (resolució² número 8) i, per descomptat, pels investigadors que aprecien aquest treball i el valor d'aquestes llistes com el punt de partida dels estudis orientats a la comprensió de la resposta de la magnetosfera i la ionosfera a l'impacte de les pertorbacions interplanetàries [Joselyn *and* Tsurutani, 1990].

A mesura que s'anava coneixent millor el fenomen, la definició del mateix va anar variant, tot i que mai es va arribar a una definició definitiva. Així, a l'Assemblea de la IAGA de Madrid (1969) es va fixar la següent definició per a un SC: "un SSC es considerat com el començament abrupte seguit per una tempesta magnètica o per un increment en la activitat durant almenys una hora" (IAGA *Bulletine* No. 32)¹. Després, Mayaud [1973] va presentar la llista ja esmentada dels 100 anys de SSCs seleccionats amb un criteri diferent del que s'utilitzava fins aleshores. La principal diferència té a veure amb el canvi de concepte d'activitat magnètica després de l'impuls abrupte. D'acord amb l'autor, la clau per determinar l'existència o no d'un SSC estava en el "canvi de ritme" de l'activitat magnètica després de l'impuls brusc. La definició proposada a l'Assemblea de Madrid, va ser adoptada durant la IUGG Assemblea General de Grenoble (1975) (resolució² número 6). De totes maneres, la definició, encara en ús, no aporta cap criteri quantificable i està sotmesa a la interpretació dels observadors pel que fa a la valoració de la diferència d'activitat magnètica abans i després del SC.

Araki [1994] va presentar un model per explicar la forma d'ona dels SCs, i al mateix temps va introduir una nova notació. Per anomenar els SCs amb un impuls previ en sentit contrari a la pujada principal, va fer servir PRI, *Preliminary Reverse Impulse*, enlloc del tradicional SSC*. Així mateix, pels casos amb un impuls previ en el sentit de la pujada principal, va fer servir PPI, *Preliminary Positive Impulse*. Avui en dia aquesta notació s'està imposant en la comunitat científica, tot i que en convivència amb la notació tradicional.

En les assemblees de la IAGA de Toulouse (2005) i Perugia (2007), es va proposar un canvi en la seva classificació segons la terminologia utilitzada en molts treballs [Joselyn *and* Tsurutani, 1990]. Segons aquesta proposta, l'augment sobtat del camp magnètic ha de ser designat pel terme general de SC, que pot ser nomenat com SSC si és seguit per una tempesta magnètica o com un SI, si no ho és. Ara es reconeix àmpliament que els SCs (SSC i SI) són produïts per un augment sobtat de la pressió dinàmica del vent solar i que les tempestes magnètiques després dels SCs són causades si el camp magnètic interplanetari té orientació sud. Els dos fenòmens, SCs i les tempestes

magnètiques, tenen diferents mecanismes físics i poden passar una sense l'altra. En el mateix sentit, a la següent assemblea de la IAGA, Sopron (2009) (resolució² número 6), i tenint en consideració estudis previs com [Curto *et al.*, 2007] i [Joselyn, 1985] a la definició esmentada anteriorment, es va introduir un criteri més objectiu per seleccionar els diferents esdeveniments: que es complís, almenys, que l'esdeveniment tingués un pendent puntual de 3 nT/min com a mínim en 3 dels 5 observatoris de baixa latitud designats a tal efecte. Aquest criteri va ser contrastat per a mantenir la coherència amb les antigues llistes.

¹ Els butlletins de la IAGA es poden trobar a la següent adreça web:

http://www.iugg.org/IAGA/iaga_pages/pubs_prods/bulletins.html

² Les resolucions de la IAGA es poden trobar a la següent adreça web:

http://www.iugg.org/IAGA/iaga_pages/Resolutions/Resolutions.htm

Capítol 2. Model físic d'SC i estudi d'un cas particular

Un cop coneixem les principals característiques morfològiques de com es manifesten els SCs en els magnetogrames, ara és l'hora de descriure el model teòric que descriu aquest fenomen, concretament el model d'Araki [Araki, 1994]. Després de descriure el model, comprovarem la seva validesa amb un cas particular on, a més, i gràcies a les observacions de diferents satèl·lits podrem explicar, entre altres coses, com són els SCs a les òrbites geosincròniques.

2.1. Model físic d'Araki

En aquest apartat presentem un model físic capaç d'explicar l'estructura morfològica global dels SCs [Araki, 1994]. El model explica les formes d'ona dels SCs observades al terra, però degut a la gran variabilitat del fenomen no es capaç de fer una quantificació de com serà el SC dependent de les condicions del vent solar. El punt més important es mostrar com un increment

de la pressió del vent solar en forma d'una simple funció esglaió es capaç de produir una complexa distribució de formes d'ona a terra. El punt principal del model que presentarem rau en el fet que el camp pertorbat del SC es descomposa en dos subcamps, DL i DP. El subcamp DL representa un increment tipus esglaió del component H del camp geomagnètic. El camp DP consisteix en dos successius polsos, el PI (impuls preliminar, *Preliminary Impulse*), i el MI (impuls principal, *Main Impulse*), en sentits oposats [Araki, 1994]. D'aquesta manera es representa el camp pertorbat dels SCs com:

$$D_{sc} = DL + DP = DL + DP_{PI} + DP_{MI} \quad (2.1)$$

A la figura 2.1 es mostra un resum de les formes d'ona dels SCs depenent de la latitud i l'hora local segons el model d'Araki [Araki, 1994]. Segons el model proposat, el subcamp DL es produeix principalment per l'augment del corrent de la magnetopausa i del corrent de polarització al llarg del front compresional de l'ona hidromagnètica que es propaga cap al terra. El camp DP és causat per un parell de corrents alineats al camp (FACs) induïts pel sistema de doble vòrtexs causat pels corrents ionosfèrics (ICs) ja proposats anteriorment per Tamao [1964]. Encara que aquest sistema de doble vòrtex va ser proposat originalment per explicar els PRIs (*Preliminary Reverse Impulse*) d'altres latituds, el model considera que el vòrtex de la tarda s'estén fins el costat diürn de l'equador. Això explica l'aparició simultània dels PRIs amb similar forma d'ona a la tarda en latituds altes i al costat diürn de l'equador.

Després de la compressió inicial de la magnetosfera, la convecció magnetosfèrica es veu reforçada per l'augment de la velocitat i la densitat darrere del xoc o discontinuïtat del vent solar i també per la distància entre els centres dels vòrtexs convectius que decreix en una magnetosfera comprimida. Com a resultat d'això, el corrent en direcció alba capvespre (com es veurà en el panell c de la figura 2.2) s'intensifica i es transmet al llarg de les línies de camp a la ionosfera polar que l'acompanya a través de les FACs (*Field Aligned Current*). Aquest corrent FAC i el FAC induït pels vòrtexs de corrents ionosfèrics produeixen el subcamp DP_{MI} . El sentit del FAC és oposat al FAC que causa el subcamp DP_{PI} de manera que el sentit del vòrtex del corrent

ionosfèric (IC) té sentit contrari. Un cop més el vòrtex de la tarda s'estén fins al costat diürn de l'equador per produir l'increment equatorial del DP_{MI} . Per entendre millor el mecanisme dels subcamps DL, DP_{MI} i DP_{PI} , a la secció 2.1.1 es presenta una analogia amb un circuit elèctric simple.

El model descrit anteriorment suposa que els FACs induïts pels vòrtexs ionosfèrics pels subcamps DP_{PI} i DP_{MI} s'activen gairebé instantàniament a la regió equatorial. En realitat, l'aparició dels PRIs en latituds aurorals durant la tarda i al costat diürn de l'equador és gairebé simultània (10 segons). Aquesta transmissió ha estat sempre un problema, en l'actualitat, per resoldre aquesta dificultat s'utilitza la transmissió electromagnètica a l'espai entre el sòl i la ionosfera. Després de demostrar la dificultat de produir el PRI equatorial per incidència d'ones hidromagnètiques (HM), ja alguns autors com Kikuchi i Araki [1979] van proposar la propagació d'ones en mode d'ordre zero entre la Terra i la ionosfera.

Per demostrar que un parell de FACs podrien produir els vòrtexs ionosfèrics observats, Tsunomura i Araki [1984] ja van fer càlculs dels camps elèctrics produïts pels FACs amb una distribució de la conductivitat elèctrica realista de la ionosfera. Els resultats van ser consistents amb el patró observat dels SCs. Osada [1992] va sintetitzar un SC amb càlculs similars.

L'amplitud dels subcamps varia depenent de la latitud. El subcamp DL té major amplitud en latituds baixes i va decreixent la seva amplitud per observatoris amb major latitud. D'altra banda, el subcamp DP té una amplitud més gran per latituds altes i per observatoris de més baixa latitud la seva amplitud es fa més petita. Així, en latituds baixes i mitjanes el subcamp DL domina sobre el subcamp DP i la morfologia del SC s'assembla més a una funció esglaó, s'esperava que l'amplitud dels SCs fos més gran al costat diürn que durant la nit [Sugiura, 1953]. No obstant això, les observacions indiquen majors amplituds durant la nit, com mostrà a l'any 1951 Ferraro i Unthank analitzant 55 SCs entre les latituds 21° i 49° . De les anàlisis de diverses desenes de SCs, Russell *et al.* [1992, 1994] i Russell i Ginskey [1993] van informar que l'amplitud és major a la nit mentre el IMF té orientació sud, mentre

que és més gran durant el dia si l'IMF apunta a nord. Araki *et al.* [2006] van analitzar més de 600 SCs observats a Memambetsu (35,2°), Kakioka (27,2°), Kanoya (21,7°) i Alibag (10,0°), i van obtenir la variació diürna de la amplitud mitjana del component H, aquesta té un màxim al voltant de mitjanit i un segon màxim prop del migdia. També van mostrar, amb estudis de casos, que la variació diürna té un patró similar tant pel IMF apuntant al nord com al sud, però l'amplitud de la variació diürna es fa més gran durant IMF apuntant al sud. Aquesta variació diürna inesperada de l'amplitud dels SCs es pot explicar per un camp magnètic causat pels FACs que produeixen el subcamp DP_{MI} .

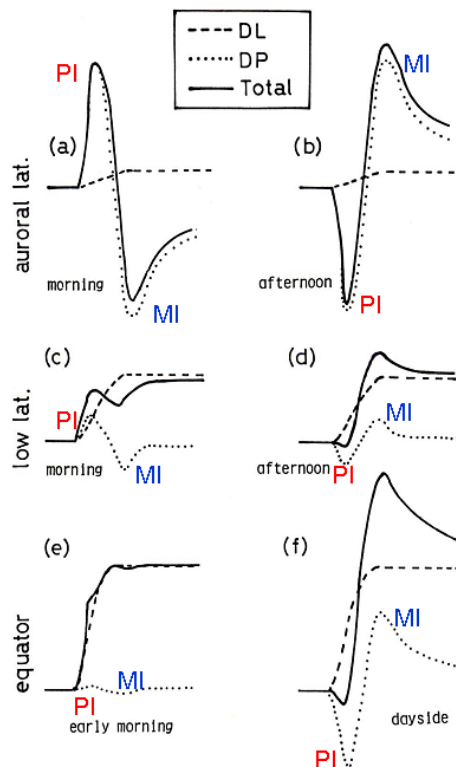


Figura 2.1. Quadre resum de les formes d'ona dels SC segons el model d'Araki [Araki, 1994]. Amb color vermell indiquem els *Preliminary Impulse*, PI, i en color blau els *Main Impulse*, MI.

2.1.1. Analogia amb un circuit elèctric simple

Per obtenir una imatge conceptual del model descrit anteriorment, seguint el raonament d'Araki, anem a considerar una analogia amb un circuit elèctric simple consistent en una bateria i una bombeta (figura 2.2). Quan l'interruptor està en posició d'obert, la bombeta aparentment s'encén instantàniament. Realment no és instantani. Una ona electromagnètica es

propaga a la velocitat de la llum (c) des de la bateria fins la bombeta. El llum s'encendrà després del temps de propagació de l'ona l/c (on l és la longitud del circuit). El corrent de desplaçament (J_D), fluint al llarg del front d'ona, connecta el corrent de conducció (J) al cable per formar un circuit tancat de corrent dintre del qual el camp magnètic (b) s'incrementa (panell a de la figura 2.2).

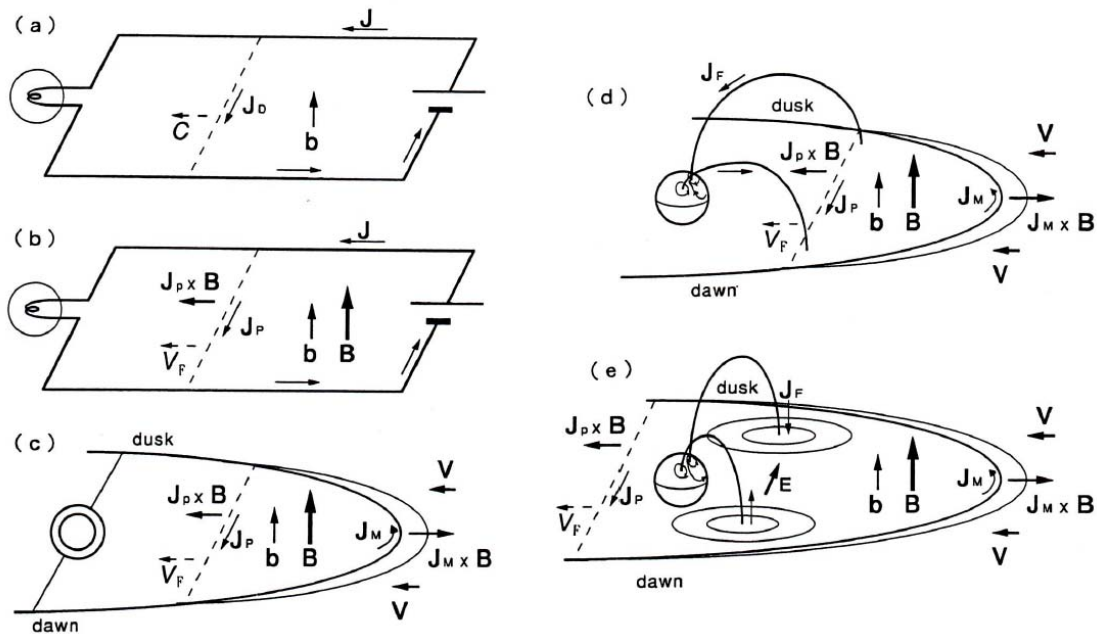


Figura 2.2. Analogia dels corrents que generen les formes d'ona dels SCs amb un circuit elèctric simple format per una bateria i una bombeta. Els dos primers panells (a i b) indiquen el sistema elèctric simple. Els següents panells indiquen els corrents que originen els diferents subcamps que intervenen en la forma d'ona dels SCs, DL (c), DP_{PI} (d) i DP_{MI} (e) respectivament [Araki, 1994].

Ara considerem un espai de plasma amb un camp magnètic estàtic perpendicular al pla del circuit (panell b de la figura 2.2). El corrent de desplaçament a través del front d'ona canvia a un corrent de polarització (J_p) i el front d'ona es propaga amb el mode ràpid de la velocitat de l'ona hidromagnètica, V_F . La força $J_p \times B$ comprimeix el plasma en la direcció de propagació. Això significa que l'ona és una ona compressional. El temps de propagació ve donat per l/V_F en aquest cas.

En el cas d'un SC, el circuit el reemplacem per la magnetopausa equatorial i la bateria la reemplacem per la força electromotriu ($V \times B$) imposada

per l'augment abrupte de la pressió dinàmica del vent solar (panell c de la figura 2.2). El corrent de la magnetopausa en direcció del matí cap al capvespre (J_M) s'incrementa quan la pressió dinàmica augmenta i la força $\mathbf{J}_M \times \mathbf{B}$ deguda a aquest corrent resisteix la compressió. L'augment del corrent de la magnetopausa (J_M) i el corrent de polarització (J_P) a través del front d'ona compressional formen un bucle de corrent dintre del qual el camp magnètic en direcció nord augmenta. Quan el front d'ona arriba al terra, el component H del camp geomagnètic comença a augmentar. Aquest instant correspon a l'encesa de la bombeta. El camp magnètic en direcció nord es manté augmentant durant el pas del front d'ona que té una amplada finita, fins que la compressió de la magnetopausa acaba. Aquest és el subcamp DL.

Si el front d'ona compressional es propaga únicament en el pla equatorial, no és necessari considerar altres modes de propagació dels SCs. Les inhomogeneïtats del plasma magnetosfèric i del camp magnètic, d'altra banda, produeixen un altre mode (el mode d'Alfven) que es propaga al llarg de les línies de camp fins a la ionosfera polar. L'ona acompanya els corrents alineats al camp (FAC, J_F) que entren dintre la ionosfera pel costat del capvespre i surten de la ionosfera pel costat del matí (panell d de la figura 2.2). Aquests FACs produeixen corrents ionosfèrics de tipus doble vòrtex que giren, a l'hemisferi nord, en sentit horari a la tarda i en sentit antihorari al matí. Aquest sistema de corrents és consistent amb el subcamp DP_{PI} .

Després del pas del front d'ona compressional cap a la magnetocua, la convecció magnetosfèrica s'ha d'ajustar a un nou estat de compressió de la magnetosfera si la pressió dinàmica del vent solar es manté alta després del xoc. La convecció del camp elèctric en la direcció matí cap a la tarda s'ha d'incrementar en una magnetosfera comprimida. Els FACs associats circulen cap a la ionosfera al costat matí i surten pel costat de la tarda (panell e de la figura 2.2). Llavors aquest doble vòrtex de corrent amb sentits oposats produeix el subcamp DP_{MI} .

En el sistema de dos vòrtexs de corrent generats pels FACs, el vòrtex de la tarda generalment és més gran que el del costat del matí i s'estén fins a

l'equador durant el dia. Això es degut a l'existència de la conductivitat Hall i a una inhomogeneïtat entre el dia i la nit de la conductivitat. El corrent equatorial ionosfèric associat amb el vòrtex de la tarda circula en direcció oest pel primer i en direcció est pel segon sistema de corrents, llavors es produeix un impuls negatiu (PRI) seguit d'un impuls positiu (MI) durant el dia a l'equador.

2.2. Simultaneïtat

La simultaneïtat dels SCs ha estat un problema plantejat des dels inicis de l'estudi del fenomen. Un cop explicat el model d'Araki, és l'hora de fer algunes consideracions. Destaquem els següents 3 conceptes fonamentals:

(a) En un magnetograma normal (el que un observador usaria) l'augment del valor del camp dels SCs habitualment es veu molt clar. No obstant això, el mateix fenomen quan s'observa amb un mostreig més freqüent en el temps, l'augment sovint passa a ser massa lent per determinar amb precisió l'inici. Fins i tot si utilitzem les observacions amb la més alta resolució possible, és difícil determinar el temps d'inici precís si l'inici és lent. Per determinar el temps d'inici d'un SC, a partir un magnetograma d'alta resolució temporal, es necessita que el SC presenti un molt fort augment bruscat.

(b) El temps de començament realment mesurat no és el moment de l'inici real de l'esdeveniment, sinó el temps quan l'amplitud del camp magnètic arriba a un nivell detectable. Hi ha un cert interval entre el veritable inici i l'inici mesurat.

(c) El camp de pertorbació dels SCs (D_{SC}), es compon dels subcamps, DL i DP, DP al seu temps es descomposa en DP_{PI} i DP_{MI} . Sempre hem de tenir en compte que el D_{SC} és una superposició de DL i els subcamps de DP. Un increment negatiu de la DP pot anul·lar un augment positiu de DL i com a resultat es pot observar un retard aparent. Aquesta superposició no s'aplica només al començament sinó també per als pics dels PRI i MI. El temps dels dos pics PI i MI poden variar en funció de l'hora local i la latitud. Exemples de la

distribució mundial dels SCs amb retard de temps en el temps d'inici i el pic del PRI en algunes estacions es mostren a Araki [1977, 1994].

Cal assenyalar que no tots els xocs de l'augment de la pressió del vent solar amb la magnetosfera o discontinuïtats necessàriament causen SCs. Si el xoc o discontinuïtat incideix obliquament a la magnetosfera, el SC produït tindrà més temps de pujada perquè la interacció amb la magnetosfera durarà més temps [Takeuchi *et al.*, 2002]. Per tant, un SC amb una pujada lenta pot no ser identificat com un SC sota la definició actual on es demana que com a mínim el salt tingui un pendent puntual de 3 nT/min en tres dels cinc observatoris de baixa latitud.

2.3. Estudi d'un cas particular

Un cop acceptat que els SCs són causats per una augment sobtat de la pressió dinàmica del vent solar associada a un xoc interplanetari o discontinuïtat, es poden utilitzar els SCs com un test per estudiar les respostes transitòries dels diversos fenòmens magnetosfèrics. Els SCs són desencadenants de subtempestes [Kokubun *et al.*, 1977; Iyemori and Tsunomura, 1983], pulsacions geomagnètiques (P_{SC}), precipitació de partícules [Brown, 1973] i manifestacions aurorals [Lyons *et al.*, 2005].

Emprenem l'estudi d'un cas particular, el 19 de novembre del 2007, on es va produir un SC que gràcies a la quantitat i qualitat de les observacions disponibles ens permetrà tenir una visió global del fenomen i verificar el model descrit anteriorment. Partirem d'observacions amb diferents satèl·lits del camp magnètic interplanetari, IMF, i anirem observant com responen les diferents parts de la magnetosfera a l'augment sobtat de la pressió del vent solar, fins a arribar a com es veu de manera global a les estacions geomagnètiques terrestres.

Com a primera aproximació al cas, a la figura 2.3 hem dibuixat les dades de la pressió dinàmica del vent solar, P_d , i el component Sud del camp IMF, B_z , proporcionades pel satèl·lit WIND i ho comparem amb l'índex SYM-H, dels dies

19 i 20 de novembre de 2007. L'índex SYM-H és el camp simètric pertorbat en el component H [Iyemori, 1990], és essencialment el mateix índex que l'índex horari Dst [Sugiura *and* Poros, 1971], en la diferència que l'índex SYM-H utilitza valors minut de diferents observatoris geomagnètics enlloc dels valors horaris del Dst. A la figura 2.3 podem identificar i relacionar diferents parts de P_d i B_z , enregistrats al satèl·lit WIND, amb els valors del SYM-H, enregistrat a terra, tenint en compte el retard en els temps d'arribada [Blanch *et al.*, 2013].

Les variables enregistrades pel satèl·lit estan expressades en coordenades *Geocentric Solar Magnetospheric*, GSM, on X indica la línia Terra-Sol, Z és la projecció de l'eix del dipol sobre el pla YZ en coordenades GSE, on en coordenades GSE X indica la línia Terra-Sol i la Z indica l'eclíptica del pol nord. La primera part que identifiquem està marcada en línies discontinües a la figura 2.3 i correspon a una pujada de 2 nPa en la pressió dinàmica del vent solar, un pujada realment petita. En condicions de calma els valors típics de la pressió del vent solar oscil·len entre els 2-10 nPa. En els casos d'augment sobtats de la pressió del vent solar, els augments típicament poden ser de 10 o 20 nPa, tot i que s'han observat augments molt més grans. Amb el corresponent retard temporal, l'índex SYM-H presenta també una pujada del camp geomagnètic d'una amplitud d'unes 15 nT. L'altra part que hem identificat clarament correspon a quan B_z esdevé negatiu de manera contínua, marcat amb una línia de punts i ratlles a la figura 2.3, llavors a terra el camp magnètic comença una evolució decreixent que es correspon amb la fase principal de la tempesta magnètica.

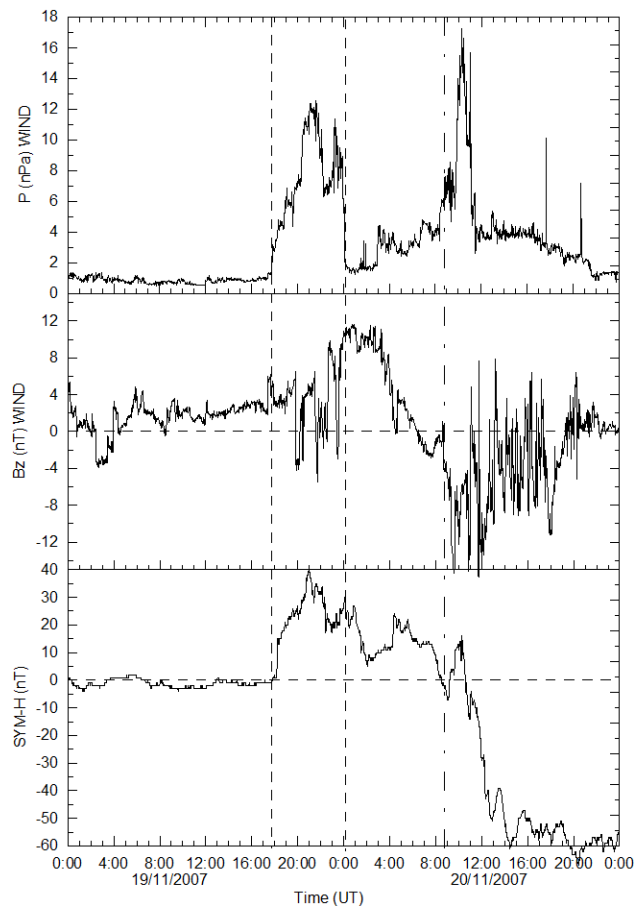


Figura 2.3. La pressió i el camp magnètic (component Z en coordenades GSM) mesurats pel satèl·lit WIND i l'índex SYM-H mesurat a terra per als dies 19 i 20 de novembre de 2007. Les línies discontinües verticals marquen l'àrea que podem relacionar entre l'increment de la pressió al WIND i l'índex SYM-H. La línia de punts i ratlles indica quan B_z esdevé negatiu i marca el començament de la fase principal de la tempesta magnètica.

A la figura 2.4 hem dibuixat els paràmetres del vent solar en major detall, el camp magnètic interplanetari, en els seus tres components, la pressió dinàmica, la densitat i la velocitat, en els tres components, observat tot pel satèl·lit WIND. Podem observar un petit augment de la pressió dinàmica del vent solar a les 1722 UT. Simultàniament B_z i V_x presenten un ràpid increment.

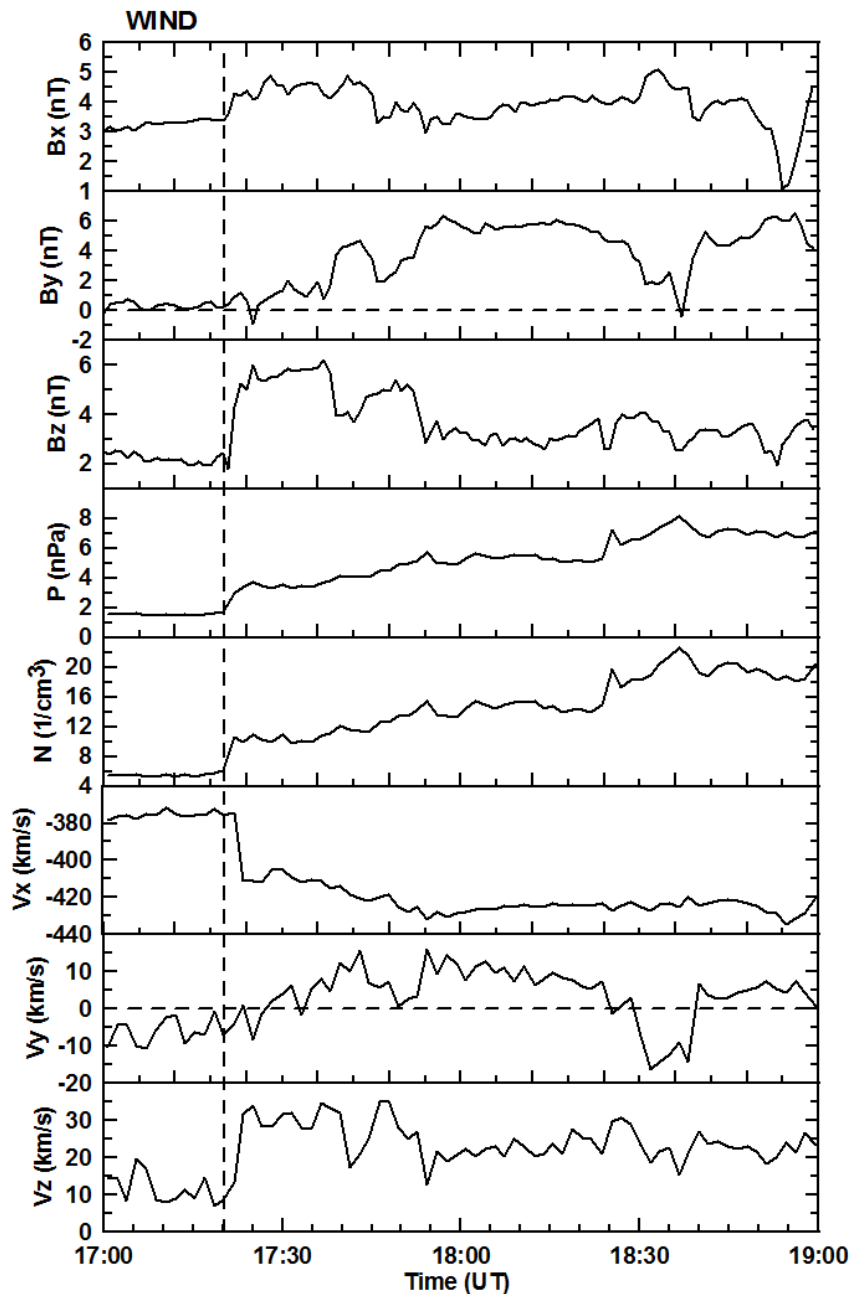


Figura 2.4. Paràmetres del vent solar mesurats pel satèl·lit WIND corresponents al dia 19 de novembre de 2007.

2.3.1. Observacions amb satèl·lits

Per estudiar aquest esdeveniment disposem de dades del vent solar, densitat i velocitat, i els components del camp magnètic interplanetari dels satèl·lits ACE, GEOTAIL, WIND i THEMIS B, i de dades magnètiques de l'interior de la magnetosfera dels satèl·lits GOES, CLUSTER, THEMIS i LANL.

Hem fet servir aquest esdeveniment perquè disposàvem de suficients dades per obtenir una visió completa del mateix, des de la propagació del vent solar, passant per les diferents parts de la magnetosfera, fins a com es veu de manera global aquest esdeveniment al terra. En la taula 2.1 llistem les posicions de tots aquests satèl·lits en el moment en que va succeir el SC en coordenades GSM i en R_e (radis terrestres).

Satèl·lit	X-GSM (R_e)	Y-GSM (R_e)	Z-GSM (R_e)
ACE	233.2	-37.1	1.1
CLUSTER-2	3.5	-0.3	-6.0
CLUSTER-4	3.9	-0.5	-5.5
GEOTAIL	26.7	-3.4	-3.8
GOES-10	5.2	3.5	2.0
GOES-11	4.6	-4.5	1.3
GOES-12	5.9	1.9	2.2
LANL-01	-1.2	6.5	0.0
LANL-02	-5.9	1.9	-1.9
LANL-89	3.8	-5.2	1.0
LANL-94	4.4	4.5	1.8
LANL-97	-3.2	-5.5	-1.5
THEMIS-A	-4.2	-13.6	-2.1
THEMIS-B	-9.7	-29.4	-4.6
THEMIS-C	-0.1	-16.1	-1.6
THEMIS-D	1.6	-9.6	-0.5
THEMIS-E	0.7	-10.7	-0.9
WIND	235.5	88.0	1.2

Taula 2.1. Posicions dels satèl·lits utilitzats en l'estudi a les 1810 UT del dia 19 de novembre del 2007.

2.3.1.1. Observacions del vent solar

Per tal de monitoritzar el vent solar hem utilitzat dades de diferents instruments com el “*WIND Magnetic Field Investigation (MFI)*” [Lepping *et al.*, 1995] i el “*WIND 3-D Plasma and Energetic Particle Investigation*” [Lin *et al.*, 1995], i el “*Magnetic Field Experiment (MAG)*” [Smith *et al.*, 1998] instruments a

bord del satèl·lit ACE. Hem fet servir dades obtingudes pel “Solar Wind Analyser (SWA)” del “Comprehensive Plasma Instrumentation (CPI)” [Frank *et al.*, 1994] i mesures del camp magnètic (MGF) [Kokubun *et al.*, 1994] a bord del satèl·lit GEOTAIL. A la figura 2.5 hem dibuixat les posicions dels satèl·lits ACE, WIND, GEOTAIL i THEMIS B en els plans XY i XZ en coordenades GSM quan va ocórrer el SC.

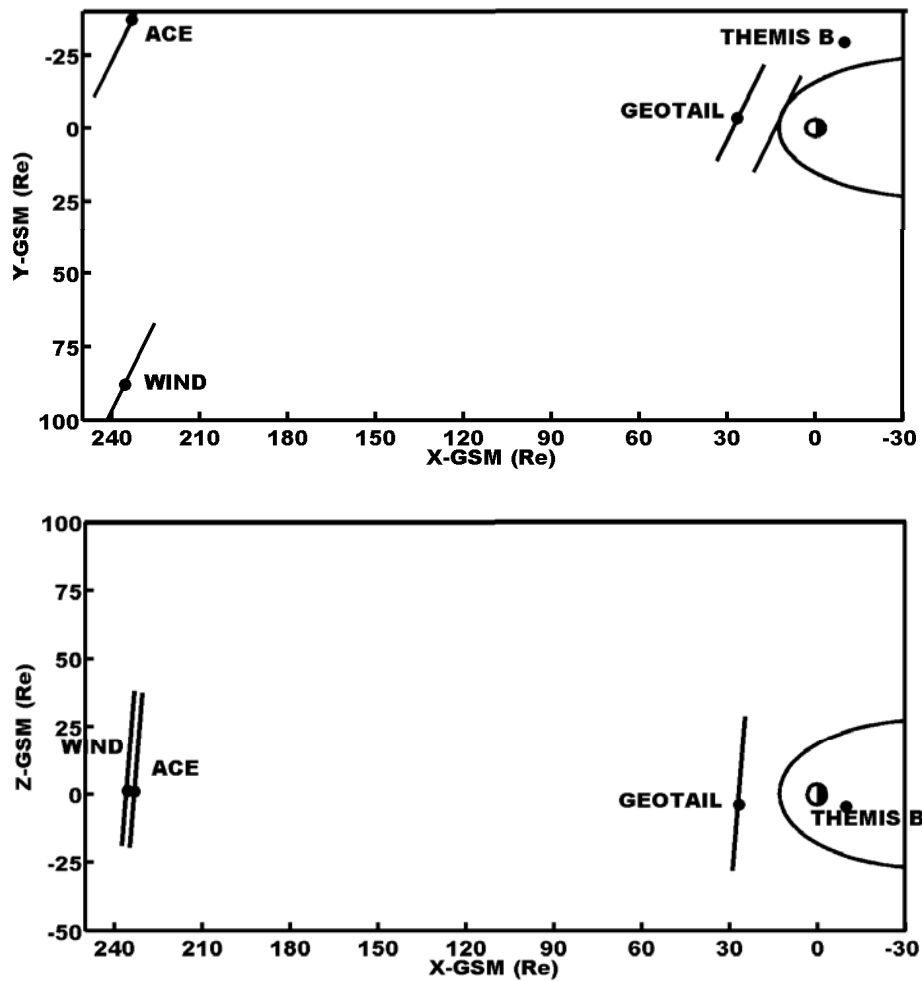


Figura 2.5. Dibuem la Terra, la magnetopausa i les posicions en els plans XY i XZ (en coordenades GSM) pels satèl·lits ACE, WIND, GEOTAIL i THEMIS B. Amb segments gruixuts sobre els satèl·lits indiquem l'orientació del front de xoc del vent solar, calculat a partir de la conservació de la normal abans i després del xoc.

A la figura 2.6 presentem el camp magnètic interplanetari, IMF, del dia 19 de novembre del 2007 entre les 1700UT i les 1900UT mesurat pels satèl·lits ACE, WIND, GEOTAIL i THEMIS B amb un mostreig d'una dada cada 4 minuts per a l'ACE, i de 3 segons per al WIND, el GEOTAIL i el THEMIS B. Tots els satèl·lits mostren el mateix comportament del IMF, el que implica una

estructura de gran abast del IMF. Per cada satèl·lit determinem el temps d'arribada del front de xoc, llavors tenim 4 temps d'arribada: les 1712UT per l'ACE, les 1722UT per al WIND, les 1804UT per al GEOTAIL i les 1812UT per al THEMIS B, tal com s'indica en ratlles verticals discontinües a la figura 2.6. A partir d'aquests temps d'arribada, les posicions d'aquests satèl·lits i els valors del camp magnètic calculem la inclinació i la velocitat del front de xoc [Blanch *et al.*, 2013]. Utilitzant la conservació de la normal abans i després de passar el front de xoc en cada satèl·lit en base al teorema de la coplanaritat. La normal del front de xoc (\mathbf{n}) s'escriu en base del mètode “*magnetic coplanarity*” (MC) [Colburn *and* Sonett, 1966] tal com:

$$\hat{n} = \pm \frac{(\vec{B}_1 - \vec{B}_2) \times (\vec{B}_1 \times \vec{B}_2)}{|\vec{B}_1 - \vec{B}_2| |\vec{B}_1 \times \vec{B}_2|} \quad (2.2)$$

on \mathbf{B} es el vector del camp magnètic i els subíndexs 1 i 2 es refereixen als valors abans i després del xoc. Operant d'aquesta manera s'obté una normal per a cada satèl·lit, però degut a que després del xoc el camp magnètic està pertorbat és difícil agafar un únic valor del camp després del SC, llavors vàrem agafar un valor a partir d'una mitjana de 2 minuts després del SC, si agaféssim més temps per fer la mitjana correríem el perill de suavitzar el salt. Utilitzant els valors mitjans, el vector normal \mathbf{n} no té exactament el mateix valor per a cada satèl·lit, llavors en base a les localitzacions de cada satèl·lit, els temps d'arribada i amb un model de propagació 3D, hem buscat un únic pla del front del SC que fos el més coherent amb tot el conjunt de dades. Procedint d'aquesta manera, primer obtenint una normal per cada satèl·lit i després aplicant un model de propagació 3D, hem arribat a la conclusió que l'únic pla coherent de la propagació del front de xoc és el següent: $(\phi, \theta) = (155^\circ, 2^\circ)$, on ϕ i θ són la longitud i la latitud en coordenades GSM. A la figura 2.5 a més de les posicions dels satèl·lits, hem dibuixat, amb segments gruixuts sobre els satèl·lits, l'orientació del front de xoc del vent solar.

Utilitzant la direcció del front de xoc que acabem de calcular i la diferència entre els temps d'arribada de cada satèl·lit, podem calcular el component normal de la velocitat del xoc fent servir la conservació de massa.

$$V_{Shock} = \frac{(\rho_2 \vec{V}_2 - \rho_1 \vec{V}_1) \cdot \hat{n}}{\rho_2 - \rho_1} \quad (2.3)$$

on ρ_1 i ρ_2 són els valors de la densitat del vent solar abans i després del xoc. Així la velocitat del xoc és, $V_{xoc}=450$ km/s.

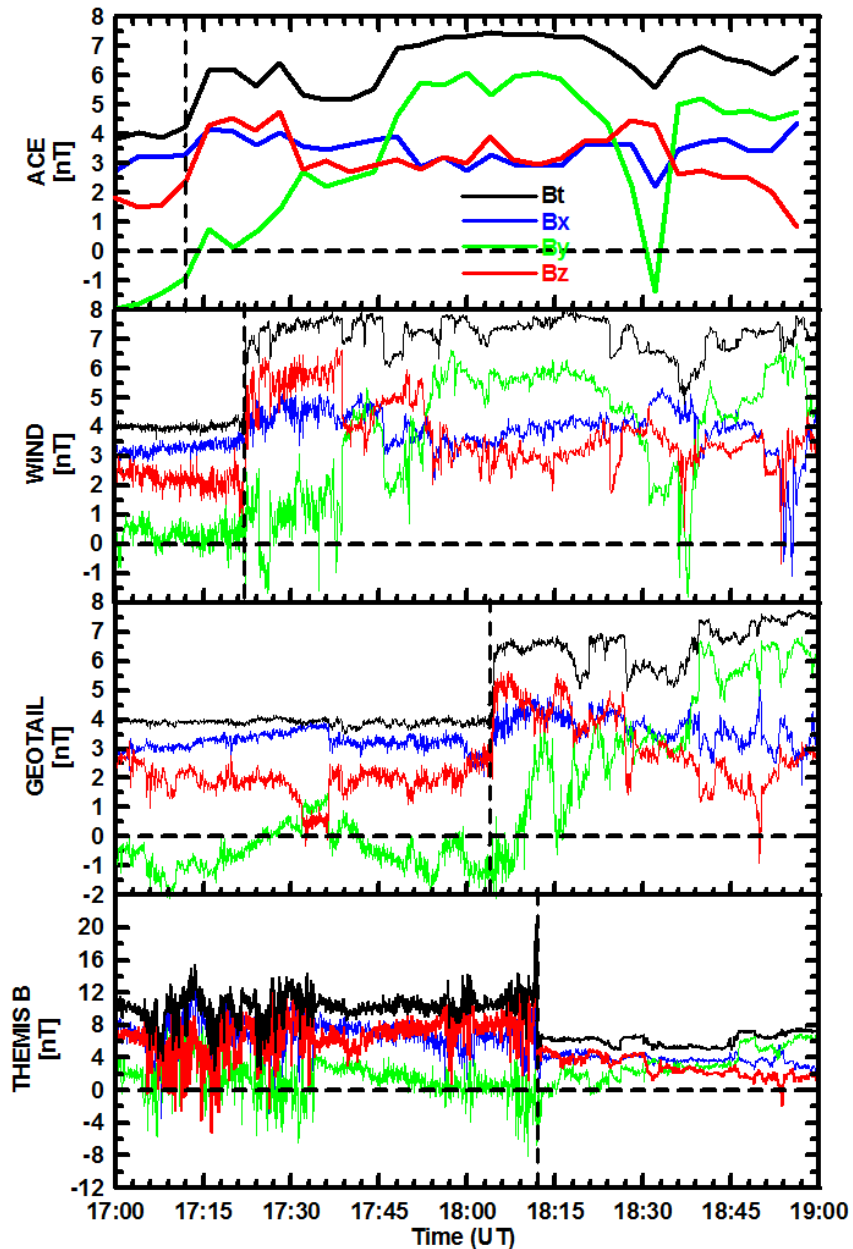


Figura 2.6. Camp magnètic interplanetari. En els quatre satèl·lits podem veure el salt en tots tres components del camp, però on és més clar és en el component Z. Les línies discontinües marquen els temps d'inici de la pujada, o la baixada en el cas del THEMIS B.

2.3.1.2. Observacions a la *magnetosheath* i dintre la magnetosfera

Respecte a les observacions dintre la magnetosfera hem fet servir dades magnètiques dels satèl·lits GOES 10, 11 i 12, i dels THEMIS A, C, D i E. Les dades del camp magnètic van ser obtingudes gràcies als aparells instal·lats als diferents satèl·lits dintre del projecte “*Fluxgate Magnetometers (FGM)*” [Auster *et al.*, 2009]. De la mateixa manera hem utilitzat els quatre satèl·lits CLUSTER que també disposen de magnetòmetres FGM. A bord dels satèl·lits LANL l'experiment “*Synchronous Orbit Particle Analyzer (SOPA)*” [Belian *et al.*, 1992] mesura la quantitat d'electrons d'energies entre 50 keV i 26 MeV. Hem utilitzat dades cada 10 segons de la quantitat d'electrons dels cinc satèl·lits LANL 01, 02, 89, 94 i 97. A la figura 2.7 hem dibuixat les localitzacions de tots aquests satèl·lits. A més, hem dibuixat el lloc de l'arribada del front de xoc del vent solar a la magnetopausa, d'acord amb la inclinació calculada anteriorment i la posició de la magnetopausa calculada en base als valors de la pressió del vent solar [Shue *et al.*, 1998].

Gràcies a la posició del satèl·lit THEMIS B, a la *magnetosheath*, i la localització del THEMIS C, molt a prop de la magnetopausa, podem tenir constància observacional de com responen aquestes parts de la magnetosfera a un augment de la pressió dinàmica del vent solar. A la figura 2.8 presentem 5 hores del camp magnètic mesurat per diferents satèl·lits situats a diferents parts de la magnetosfera, el GEOTAIL per damunt del *bow shock*, el THEMIS B a la *magnetosheath*, el THEMIS C a la magnetosfera molt a prop de la magnetopausa, i el THEMIS E dintre de la magnetosfera. A la figura 2.8 hi ha tres panells un per cada component del camp. Com estan situats en diferents regions, comparant el seu comportament podem identificar com responen a l'arribada del front de xoc del SC. Primer comparem el THEMIS B i el GEOTAIL, els dos observen el camp magnètic que té un comportament tranquil entre les 1500 UT i les 1555 UT, en els tres components, però els valors del THEMIS B tenen aproximadament el doble valor que els mesurats pel GEOTAIL, d'acord amb les seves localitzacions, assumim que els valors observats pel THEMIS B es corresponen als valors del camp magnètic a la *magnetosheath*.

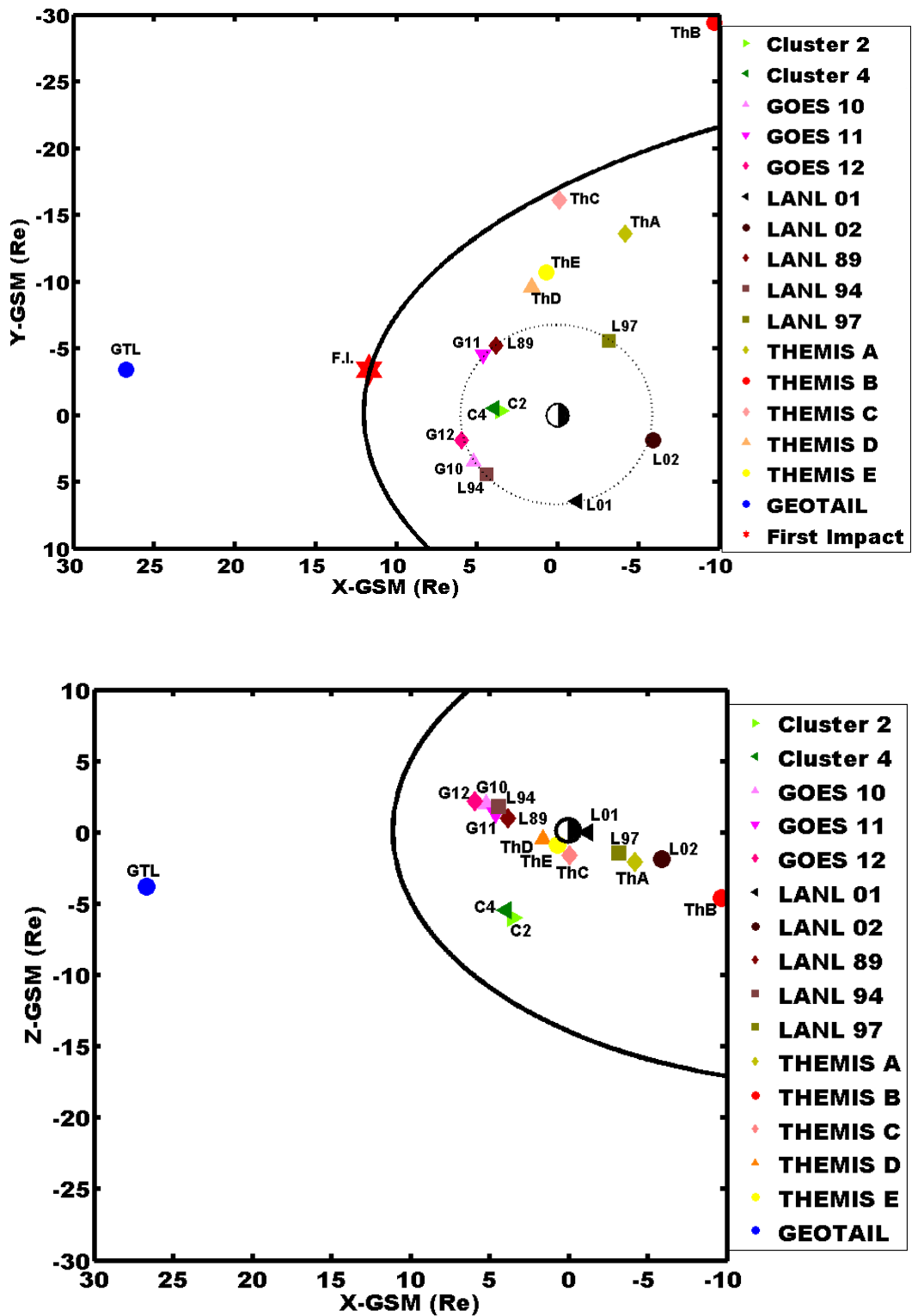
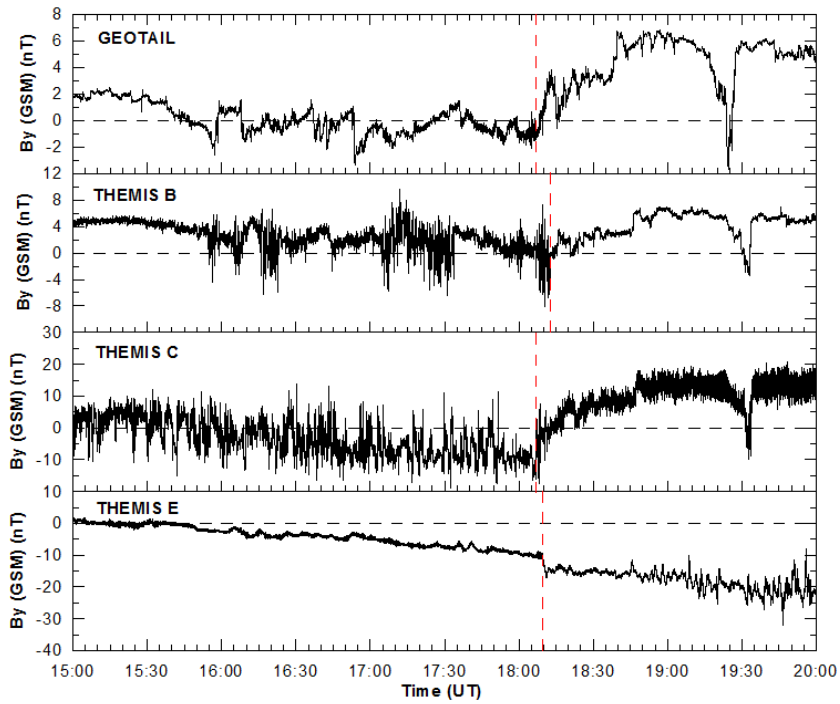
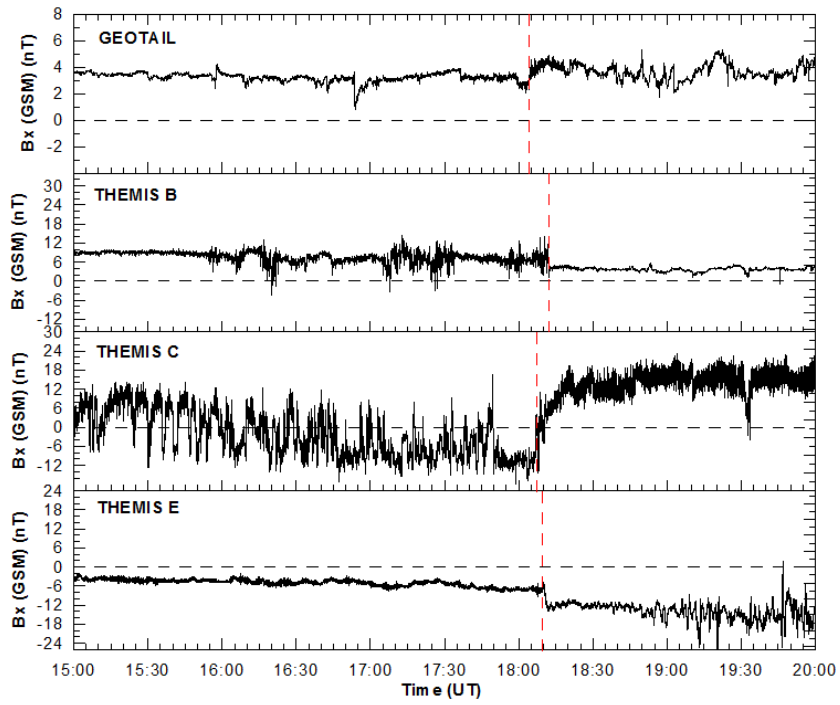


Figura 2.7. En els plans XY i XZ (coordenades GSM), dibuixem la Terra, la magnetopausa i les posicions dels satèl·lits GEOTAIL, CLUSTER, THEMIS, GOES i LANL dintre de la magnetosfera. La línia discontinua indica l'òrbita geosincrònica.

Continuant en la figura 2.8, entre les 1555 UT i les 1810 UT, però encara abans del SC, el THEMIS B mostra un camp magnètic pertorbat, que es coherent amb les oscil·lacions observades pel GEOTAIL, altra vegada es tracta d'una mostra de l'estructura de gran abast del camp magnètic interplanetari. A les 1812 UT podem veure passar el front d'ona, en aquest moment la *magnetosheath* sofreix una compressió i el THEMIS B mesura els mateixos valors que el GEOTAIL, que mesura el camp magnètic interplanetari, IMF. Deduïm que el THEMIS B ha sofert el pas del *bow shock*. També al voltant de les 1930 UT, el THEMIS B mostra la mateixa estructura magnètica que el GEOTAIL, especialment en el component Y.

El THEMIS C es trobava molt a prop de la magnetopausa i entre les 1500 UT i les 1810 UT sofreix un camp magnètic pertorbat en els tres components. Quan el signe del camp magnètic té signe positiu, en els components X i Y, aquests valors estan en concordança amb els valors de la *magnetosheath* enregistrats pel THEMIS B. Quan el signe del camp magnètic és negatiu els valors del camp concorden amb els que enregistra el THEMIS E situat dintre de la magnetosfera. Durant aquest període el component Z es manté sempre positiu. A partir d'aquests fets observats assumim que el THEMIS C sofreix oscil·lacions de la magnetopausa. Després de passar el front de xoc, el THEMIS C enregistra valors i estructures en concordança amb els enregistrats a la *magnetosheath*, la més clara estructura es veu al component Y. Resumint, amb aquests quatre satèl·lits hem pogut identificar l'arribada del front de xoc i les compressions de la *magnetosheath* i la magnetopausa.



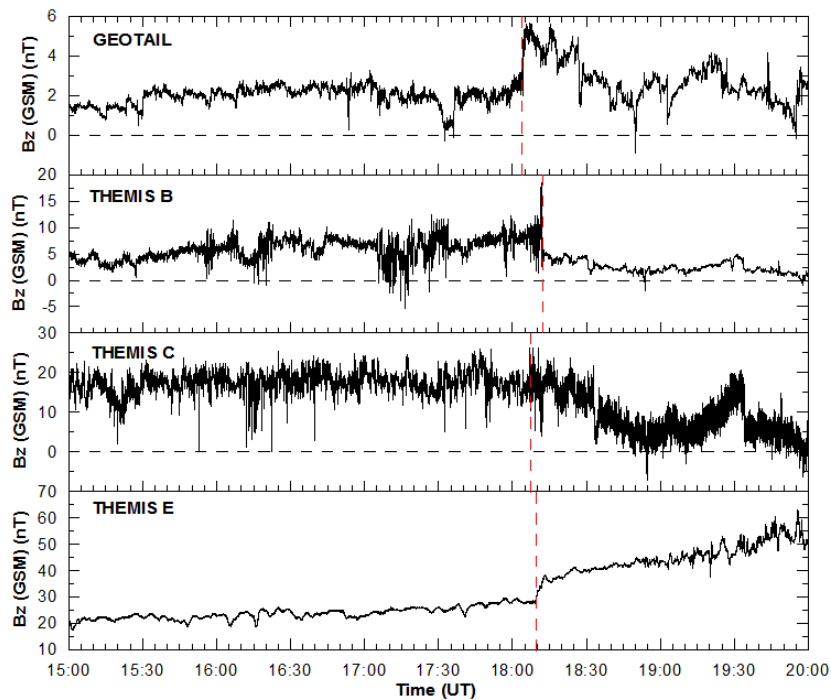


Figura 2.8. Tres panells, un per a cada component del camp magnètic en coordenades GSM. En cada panell, el camp mesurat per quatre satèl·lits: el GEOTAIL situat per damunt del *bow shock*, el THEMIS B situat en la *magnetosheath*, el THEMIS C situat a la magnetosfera, molt a prop de la magnetopausa, i el THEMIS E situat dintre de la magnetosfera. En línia vermella discontinua es marca l'arribada del front de xoc.

Amb l'objectiu de precisar els temps d'arribada del front de xoc, a la figura 2.9 hem dibuixat el camp magnètic enregistrat pels satèl·lits GEOTAIL, THEMIS B i C amb una escala de temps més petita, entre les 1800 UT i les 1830 UT. El THEMIS B estava a la *magnetosheath* abans de les 1812 UT, un sobtat augment del component B_z just després de les 1811 UT indica l'arribada del xoc interplanetari. L'abrupte descens de B_z sobre les 1812 UT es deu a que el THEMIS B travessa el *bow shock* ja que després de les 1812 el THEMIS B es troba a l'espai interplanetari.

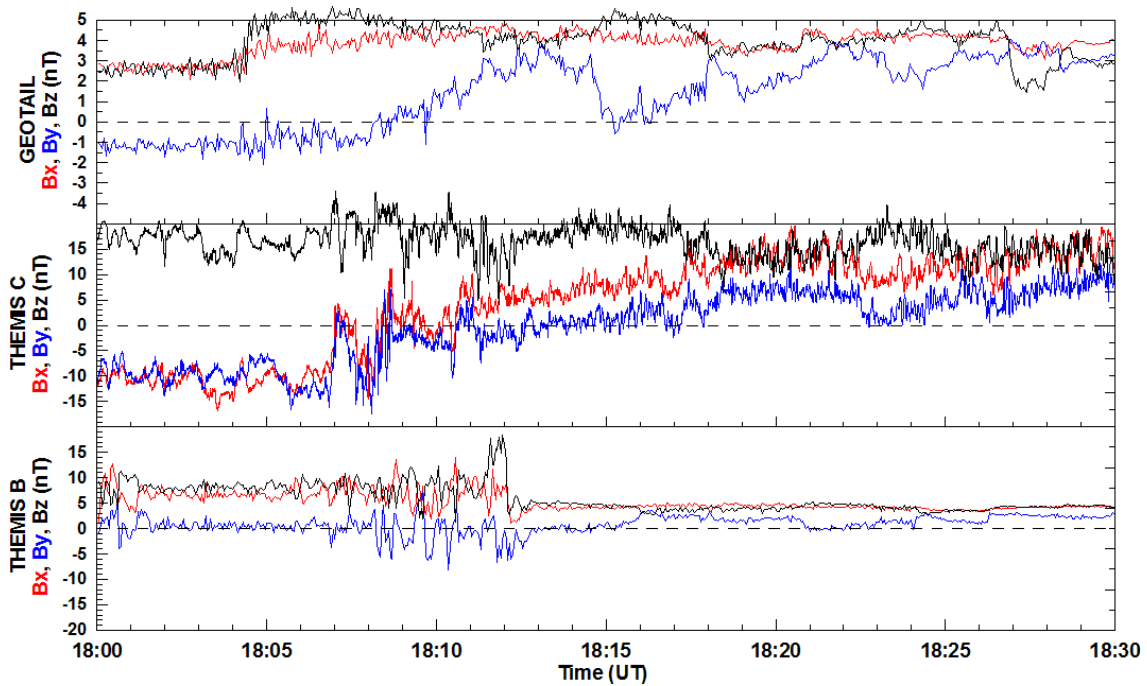


Figura 2.9. Variacions del camp magnètic enregistrades pel GEOTAIL, THEMIS C i THEMIS B.

El satèl·lit GEOTAIL es trobava a l'espai interplanetari i el component B_z augmenta sobtadament unes 2.5 nT a les 1804 UT. Respecte al THEMIS B, l'amplitud del xoc va ser al voltant de 12 nT, cinc cops més gran que en el cas del GEOTAIL. Aquests fets mostren com és de diferent l'activitat magnètica en les diferents regions.

El satèl·lit THEMIS C es trobava molt a prop de la magnetopausa i és realment complicat determinar un clar temps d'arribada del front de xoc. Això es deu a que el camp magnètic està pertorbat i l'amplitud del xoc no es molt gran, l'arribada del xoc es pot confondre molt fàcilment amb una oscil·lació del camp pertorbat.

Com a resum, hem pogut observar la propagació del front de xoc interplanetari i hem pogut determinar els temps d'arribada per cada satèl·lit, així per l'ACE a les 1712 UT, per al WIND a les 1722 UT, a les 1804 UT per al GEOTAIL i a les 1812 UT per al THEMIS B.

Un cop establerts els temps d'arribada del front de xoc als satèl·lits situats a la zona fronterera de la magnetosfera, és l'hora d'examinar com es

propaga el front d'ona dintre de la magnetosfera. Com hem comentat anteriorment a la figura 2.7 hem dibuixat la localització dels satèl·lits dintre la magnetosfera, amb la inclinació calculada a la secció 2.3.1.1 hem determinat el lloc on primer arriba el front de xoc a la magnetopausa a les 1807 UT, *First Impact* a la figura 2.7. Les coordenades del lloc de la primera arribada del xoc són: $X= 11.7 R_e$, $Y= -3.4 R_e$ i $Z=2.3 R_e$. La figura 2.10 mostra els valors del camp magnètic enregistrats dintre la magnetosfera pels satèl·lits GOES i THEMIS, ordenats en ordre de la l'arribada a cada satèl·lit, entre les 1805 i les 1820 UT. En tots sis satèl·lits es pot observar una pujada del camp magnètic, al component H_p (paral·lela al camp) pels satèl·lits GOES, i al component B_z (coordenades GSM) pels satèl·lits THEMIS, cada satèl·lit utilitza el seu propi sistema de coordenades depenent de com han estat dissenyats els seus instruments. A la taula 2.2 hem resumit els temps d'arribada, el temps de pujada i l'amplitud del mòdul del camp magnètic quan succeeix el SC observat per aquests satèl·lits. En tots ells el SC és suficientment clar tot i que l'amplitud és molt petita, especialment en el cas del THEMIS A amb una amplitud de només 1.3 nT.

Un aspecte important que ens ajudarà a relacionar els fets observats pels satèl·lits amb el que s'observa a la superfície terrestre recau en la polarització del camp magnètic. Posteriorment relacionarem aquestes polaritzacions amb les polaritzacions observades a terra. Entenent la polarització com l'evolució temporal del vector magnètic, fruit de la variació sincrònica dels seus components. Concretament, utilitzarem els satèl·lits GOES, així pel GOES 11, el component H_e (direcció cap a la Terra) disminueix i el component H_n (direcció cap a l'est respecte el camp magnètic) augmenta, aquesta composició és l'equivalent a una polarització horària, o en el sentit de les agulles del rellotge. En canvi pels satèl·lits GOES 10 i GOES 12, situats al sector tarda, tant H_e com H_n disminueixen, el que equival a una polarització antihorària, o en el sentit contrari a les agulles del rellotge.

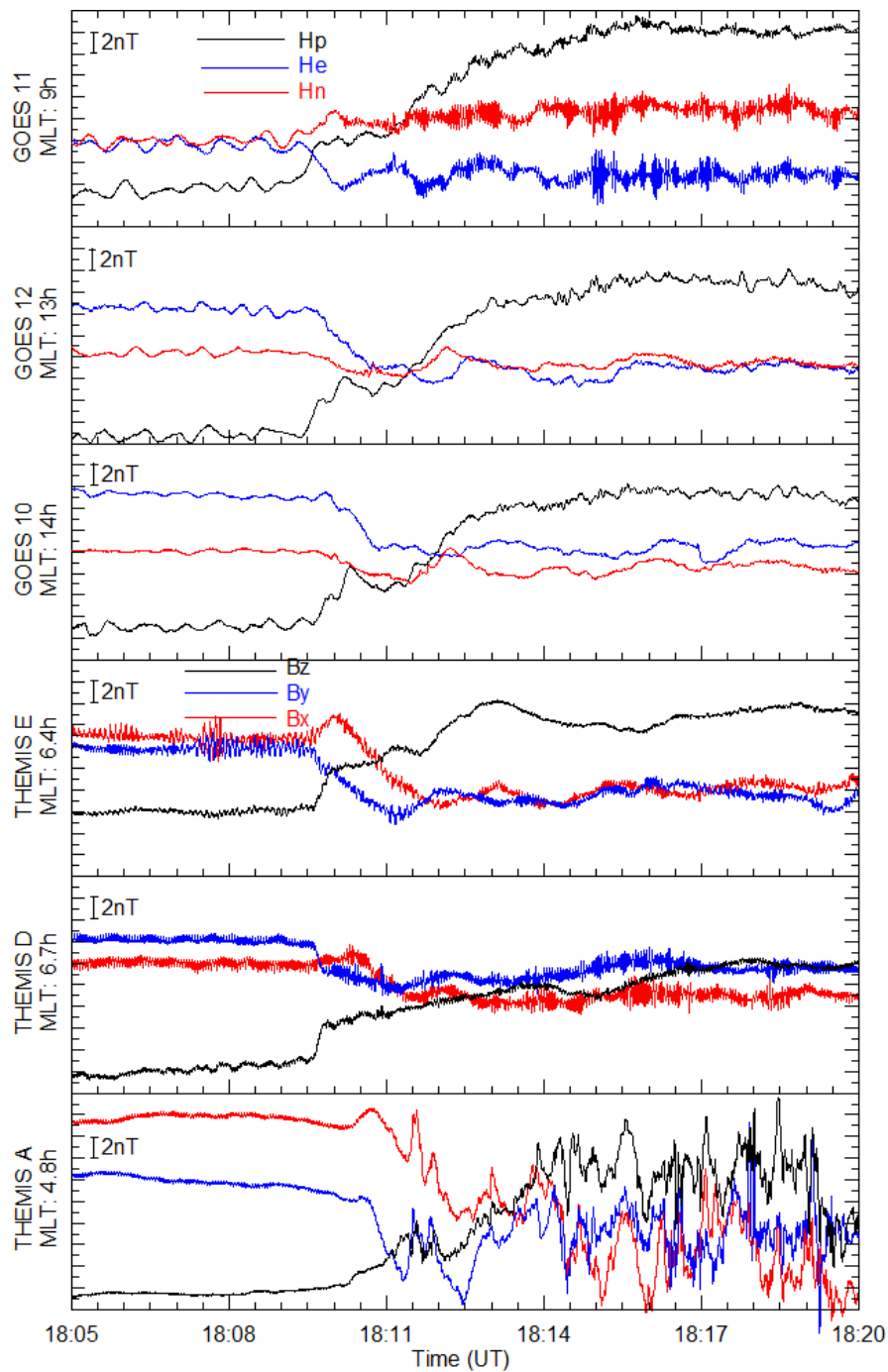


Figura 2.10. Sèrie temporal corresponent al camp magnètic enregistrat pels satèl·lits situats dintre la magnetosfera. Pels GOES, component Hp, paral·lela al camp magnètic, He, direcció cap a la Terra i Hn, normal a línia del camp magnètic. Pels THEMIS, Bx, By i Bz en coordenades GSM.

Satèl·lit	Temps d'inici (UT)	Temps de pujada (s)	Amplitud (nT)	Latitud Magnètica (°)	Temps Local (h)	Distància a la Terra (Re)
GOES-11	18:09:09	34.2	3.8	4.5	9	6.6
GOES-12	18:09:23	48.6	5.6	10	13	6.6
GOES-10	18:09:36	41.7	5.4	4.5	14	6.6
THEMIS-E	18:09:38	15	2.9	-5.0	6.4	10.7
THEMIS-D	18:09:39	8	2.6	-3.3	6.7	9.7
THEMIS-A	18:10:13	17.8	1.3	-8.6	4.8	14.4
LANL-89	18:09:18	-	-	4.6	9.3	6.6
LANL-94	18:09:42	-	-	4.7	14.5	6.6
CLUSTER-2	18:10:45	74	27.3	1.3	11.2	4.1
CLUSTER-4	18:11:30	142	30.2	1.6	11.4	4.5

Taula 2.2. Temps de pujada i amplitud del SC pels satèl·lits situats dintre la magnetosfera ordenats segons els temps d'inici de l'SC. Els satèl·lits LANL mesuren partícules, per tant no podem expressar l'amplitud en nT, així mateix, els temps de pujada tampoc son comparables.

A més de les dades del camp magnètic preses pels satèl·lits descrits anteriorment, disposem de dades de partícules gràcies al projecte de *Los Alamos National Laboratory*, LANL, [McComas *et al.*, 1993] (figura 2.11). Ens interessa establir els temps d'arribada de la pertorbació als 5 satèl·lits de LANL per determinar la propagació de la pertorbació dintre la magnetosfera, en canvi, només podem determinar un clar temps d'arribada als satèl·lits LANL 89 i 94, localitzats al sector diürn. La raó per la que només podem determinar el temps d'arribada pels satèl·lits situats al sector diürn, és que per accelerar les partícules hauria d'haver-hi un gran camp elèctric, induït pels canvis temporals del camp magnètic. Al costat diürn, els canvis temporals són més sobtats, així que es crea un fort camp elèctric i pot accelerar partícules. En canvi, al costat nocturn, el punt d'arribada del xoc queda més lluny, els canvis del camp magnètic són menys abruptes i per tant, s'indueix un petit camp elèctric i no s'observa cap fluctuació clara del flux de partícules. També disposem de dades magnètiques dels satèl·lits CLUSTER (figura 2.12, en coordenades B_{para} paral·lel al camp magnètic, B_{rad} direcció radial i B_{azi} direcció azimutal) on podem utilitzar els satèl·lits CLUSTER 2 i 4 per determinar els temps d'arribada [Balogh *et al.*, 1997].

Hem investigat com respon la magnetosfera interna a la compressió que provoca el SC al voltant de les 1810 UT. Tenint en compte el temps que triga el front d'ona a arribar entre cada parell de satèl·lits de la taula 2.2 hem estimat la velocitat de propagació dintre de la magnetosfera en uns 900 km/s, més gran que la propagació del vent solar.

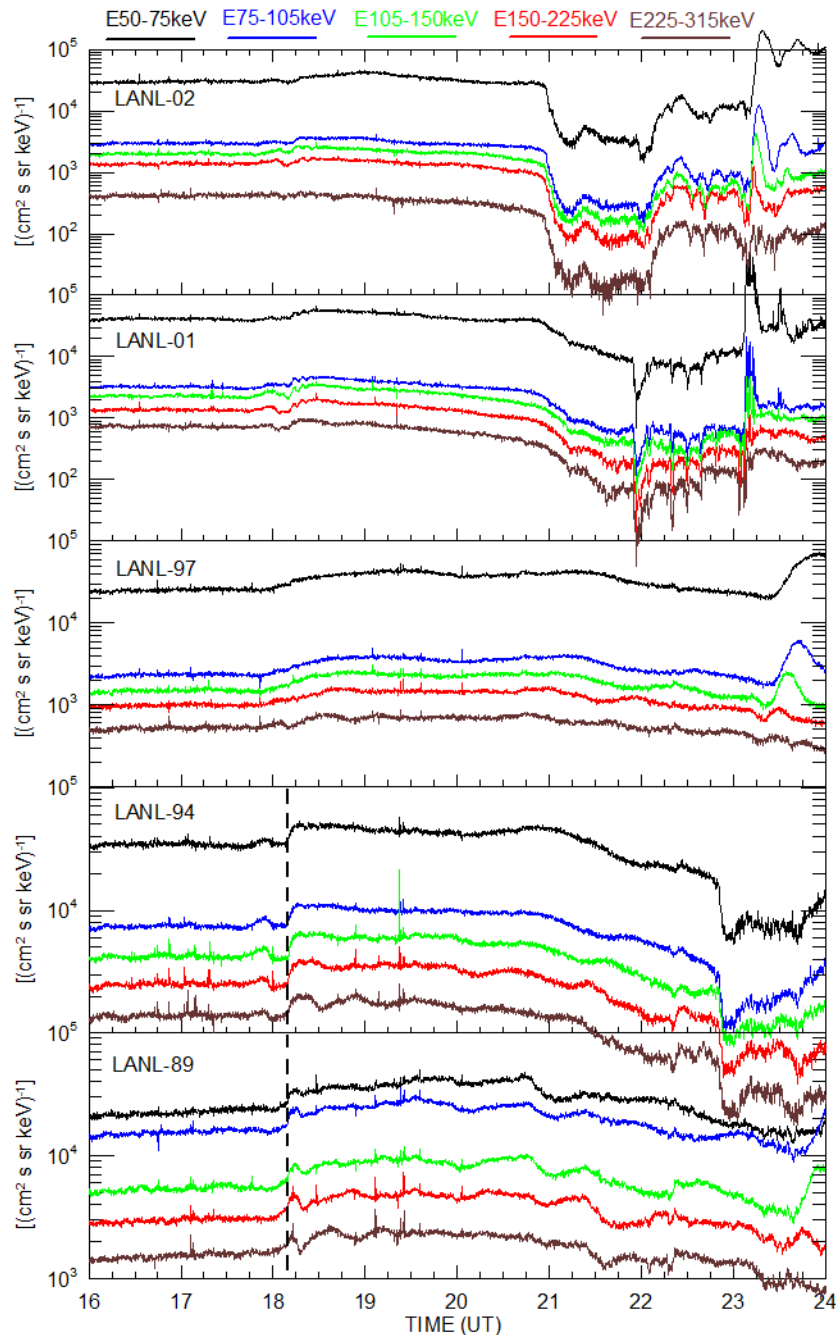


Figura 2.11 Dades de partícules enregistrades pels satèl·lits del projecte de *Los Alamos National Laboratory*. En línies de punts s'indica el temps d'arribada del front de xoc. Les estructures de la dreta de la imatge es corresponen en les fluctuacions de partícules durant la fase principal de la tempesta magnètica.

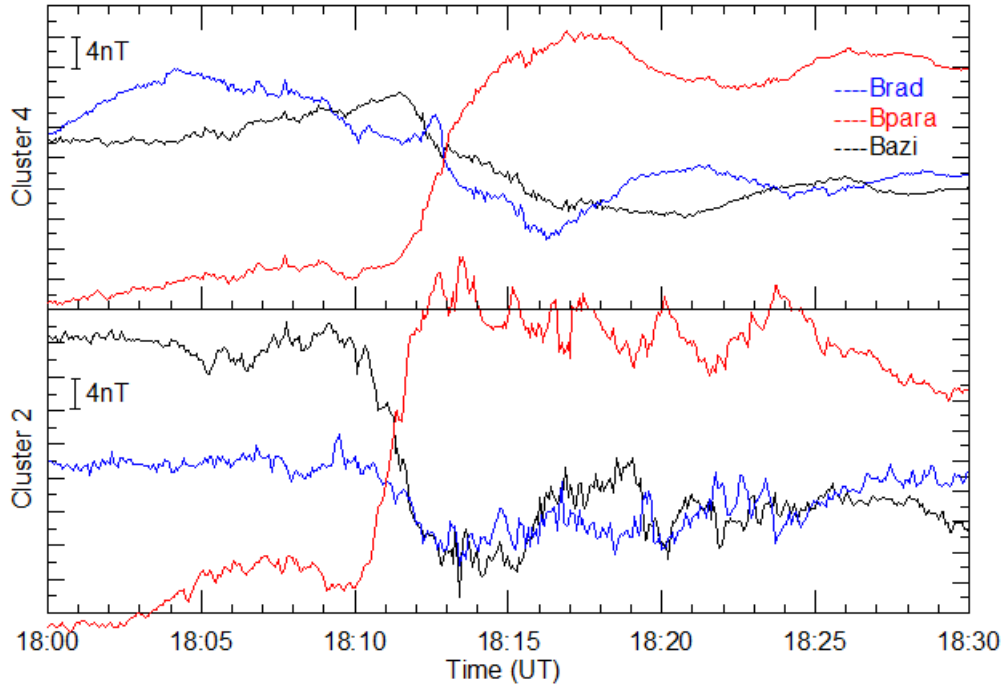


Figura 2.12. Camp magnètic enregistrat pels satèl·lits CLUSTER.

Amb els temps d'arribada de tots aquests satèl·lits tenim suficients punts per utilitzar un mètode d'interpolació per calcular la propagació del front d'ona dintre la magnetosfera (línies negres a la figura 2.13). A la mateixa figura hem dibuixat en diferents colors un mode d'alta velocitat de la velocitat d'Alfven [Keika *et al.*, 2009] calculat utilitzant pel camp magnètic el model de Tsyganenko [1989] i un model empíric [Carpenter *and* Anderson, 1992] per a la densitat, tal com:

$$n = 200 \left(\frac{5}{r} \right)^4 m \quad (2.4)$$

$$n = 0.6 \left(\frac{10}{r} \right)^4 m \quad (2.5)$$

$$n = \frac{0.6}{(1 - \exp(-r/12))} m \quad (2.6)$$

on n és la densitat en $[\text{kg cm}^{-3}]$, r és la distància radial en $[R_E]$, i m és la massa dels protons. La equació (2.4) és vàlida a la plasmasfera (figura 1.2), la equació (2.5) és vàlida per la *plasmatarough*, regió amb molt poca densitat de partícules situada als flancs de la magnetopausa, i l'equació (2.6) és vàlida per la làmina de plasma (figura 1.2). S'observa una deformació de l'ona compressional a la

part central de la magnetosfera que és consistent en les variacions de la velocitat d'Alfven degudes a àrees amb diferents densitats. La deformació al sector nocturn és menys creïble ja que segurament es deu a un problema amb el mètode d'interpolació ja que en aquell sector disposàvem de molts menys punts d'observació.

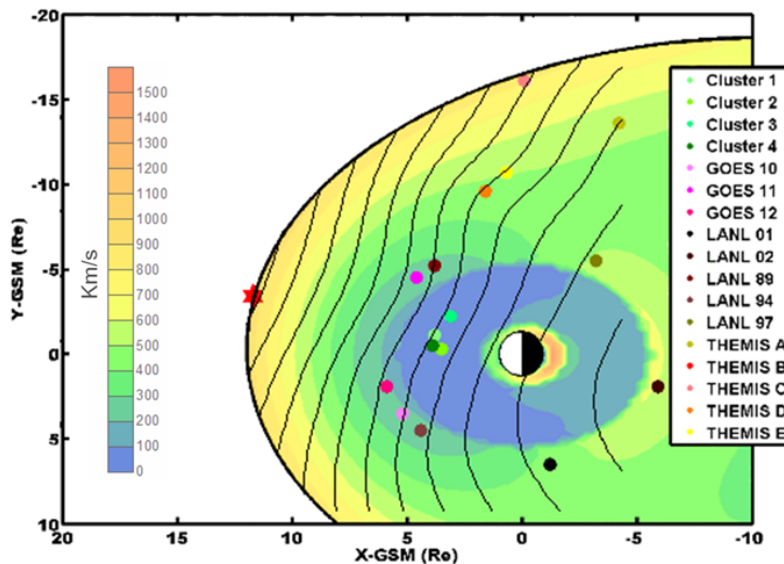


Figura 2.13. En línies negres contínues hem dibuixat la propagació del front d'ona dintre la magnetosfera, calculat en base als temps d'arribada als diferents satèl·lits. En diferents colors hem dibuixat la velocitat d'Alfven.

2.3.2. Observacions al terra

Per tenir una visió global de com s'observa el SC a terra hem analitzat un grup complet de dades magnètiques de diferents observatoris, amb mostreig de dades cada minut, per descriure el comportament d'aquest SC. Estem interessats en la forma d'ona i en la seva polarització comparant-ho amb el model d'Araki [Araki, 1997].

La figura 2.14 mostra la distribució de la forma d'ona de l'SC en diferents observatoris terrestres, en els components H i D, ordenats segons la latitud magnètica i l'hora local (la taula 2.3 presenta les coordenades geogràfiques dels observatoris emprats en la figura 2.14). Respecte al component D, en

línies discontinües a la figura 2.14, podem explicar la seva forma d'ona en base al model de Tsunomura [Tsunomura *and* Araki, 1984]. Aquest model proposa una distribució dels corrents ionosfèrics basada en distribucions realistes de la conductivitat elèctrica. El model prediu que el component Nord-Sud dels corrents ionosfèrics canvia de signe quatre cops, depenent de la posició de l'observatori entre les latituds 30° i 70° , i la major amplitud d'aquest component apareix durant les hores del matí. Llavors, el component geomagnètic de D ha de presentar una col·lecció de fronteres, o canvis de comportament de la forma d'ona, depenent del temps local i la latitud, on hi ha un increment de D a l'altra banda de la frontera hi haurà un descens. Les estacions magnètiques dibuixades en la segona fila de la figura 2.14, KAK i HON, presenten un petit increment del component D, d'acord amb el model de Tsunomura. També d'acord amb aquest model, SJG i MBO presenten un petit descens. Les estacions situades en la tercera fila en la figura 2.14, com CMO i NAQ, presenten un comportament oposat respecte les estacions de la segona fila, la raó d'aquest canvi és una frontera extra per altes latituds també proposada en el model de Tsunomura.

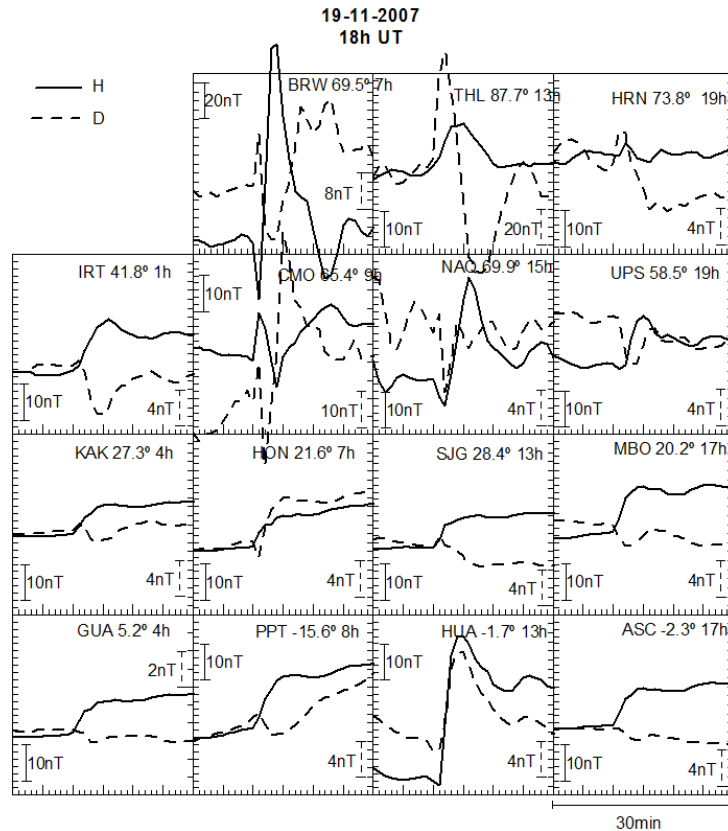


Figura 2.14. Resum dels SC enregistrats a diferents observatoris terrestres. A les columnes els observatoris ordenats segons la latitud i les files ordenades segons l'hora magnètica local.

Codi IAGA	Nom	Latitud geogràfica	Longitud geogràfica
ASC	Ascension Island	-7.952°	345.623°
BRW	Barrow	71.320°	203.380°
CMO	College	64.870°	212.140°
GUA	Guam	13.590°	144.870°
HON	Honolulu	21.320°	202.000°
HRN	Hornsund	77.000°	15.550°
HUA	Huancayo	-12.038°	284.682°
IRT	Irkutsk	52.167°	104.450°
KAK	Kakioka	36.232°	140.186°
MBO	M'Bour	14.384°	343.033°
NAQ	Narsarsuaq	61.200°	314.600°
PPT	Papeete	-17.567°	210.426°
SJG	San Juan	18.110°	293.850°
THL	Thule	77.483°	290.833°
UPS	Uppsala	59.903°	17.353°

Taula 2.3. Observatoris emprats en la figura 2.14, amb les coordenades geogràfiques i el nom abreviat de la IAGA.

Respecte al component H, dibuixat en línies contínues a la figura 2.14, en les dues últimes files d'aquesta figura podem observar la forma d'ona per estacions de baixa i mitja latitud, on el component DL del camp pertorbat del SC és el dominant i en conseqüència, la forma d'ona s'assembla a una funció esglaó. Cal remarcar la variació enregistrada a Huancayo (-1.7° Glat.) localitzada sota l'equador geomagnètic, i en el moment concret d'aquest SC a la part diürna. En la figura 2.14, per l'estació de HUA, els subcamps DL i DP estan superposats i es pot observar un PRI (impuls preliminar invers, *Preliminary Reverse Impuls*). A més, un altre fet important de HUA és l'amplitud, molt més gran que a qualsevol altra estació de baixa latitud, aquest fet es degut a l'augment de la conductivitat elèctrica en aquesta àrea (habitualment es coneix com l'electrojet equatorial).

A la tercera fila podem observar com les formes d'ona varien depenent de l'hora local. A prop del sector nit, per exemple IRT, el component predominant encara és el DL, però a primera hora del matí i a la tarda el component predominant és el DP, així podem distingir diferents comportaments

de la forma d'ona depenent de l'hora local entre les estacions de CMO i NAQ, on el component DP està invertit. Podem estimar una frontera per aquest diferent comportament al voltant de les 9-15 hores (hora local magnètica). Un altre aspecte rellevant de la figura 2.14 està relacionat amb el canvi de comportament depenent de la latitud geomagnètica quan comparem la tercera i quarta fila.

Per mostrar amb més detall en quina latitud hi ha el canvi de comportament, o on està situada la frontera, presentem la figura 2.15 on dibuixem el camp geomagnètic, en els components X i Y, del conjunt d'observatoris del projecte IMAGE [Lühr, 1994], una xarxa d'observatoris dels països nòrdics d'Europa situats a la mateixa hora local. La frontera estava localitzada al voltant dels 67° de latitud nord, entre les estacions de SOR i TRO. Respecte al component X, el camp DP és el dominant, llavors, tant els subcamps PI i MI poden ser observats. Per a l'impuls preliminar, PI, les estacions situades per damunt SOR mostren un impuls positiu que indica un corrent ionosfèric en la direcció est, i les estacions per sota de TRO mostren un impuls negatiu que indica un corrent ionosfèric en direcció oest. Respecte a l'impuls principal, MI, les estacions per damunt de SOR mostren un impuls negatiu que es correspon a un corrent ionosfèric amb direcció oest, i les estacions per sota TRO mostren un impuls positiu que indica un corrent ionosfèric de direcció est. Llavors assumim que la frontera entre els vòrtexs de corrent ionosfèrics està situada al voltant de la latitud 67° . Per damunt de la latitud 67° hi ha un vòrtex girant en direcció oest, i per sota la latitud 67° el vòrtex de corrent gira en sentit est.

Com hem comentant anteriorment, volem relacionar les observacions fetes pels satèl·lits i les observacions de les estacions terrestres. De la mateixa manera que hem trobat diferent tipus de polaritzacions entre els satèl·lits GOES 11 i els satèl·lits GOES 10 i 12, el primer localitzat al costat diürn i els altres dos al costat de la tarda, esperem trobar el mateix comportament a terra. De fet, hem trobat que la polarització dels observatoris situats al costat matí és horària, igual que el GOES 11, i els observatoris situats al costat tarda tenen polarització antihorària, com els satèl·lits GOES 10 i 12. Per tant, al terra hi ha

d'haver una zona de transició entre ambdues polaritzacions, la figura 2.16 mostra la polarització del camp geomagnètic d'observatoris situats prop de l'hora local del primer contacte del xoc de front amb la magnetopausa calculat anteriorment (la taula 2.4 mostra les seves coordenades geogràfiques). Els observatoris de les dues columnes de l'esquerra mostren una polarització lineal, aquests estan situats justament a la zona de transició, els observatoris dels panells de la dreta tenen una polarització anti-horària ja que estan situats a la zona de la tarda respecte al punt del primer contacte del front de xoc amb la magnetopausa, al igual que els satèl·lits GOES 10 i 12. D'aquesta manera podem relacionar les observacions en satèl·lits fetes a la magnetosfera amb les observacions al terra. Es comprova que tant en l'òrbita geosincrònica com a terra la polarització té un comportament similar, en canvi, com hem vist anteriorment, la forma d'ona dels SCs no compleix les mateixes regles a l'òrbita geosincrònica i al terra.

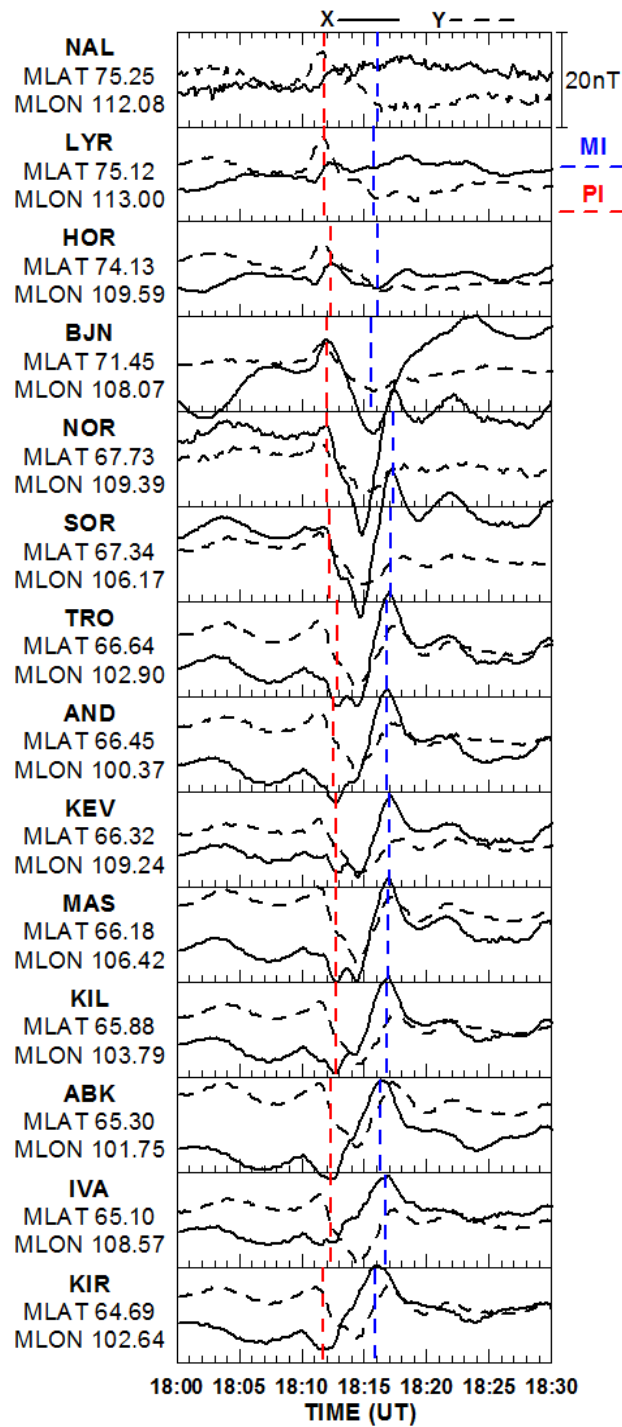


Figura 2.15. Magnetogrames dels observatoris del projecte IMAGE, ordenats segons la seva latitud magnètica.

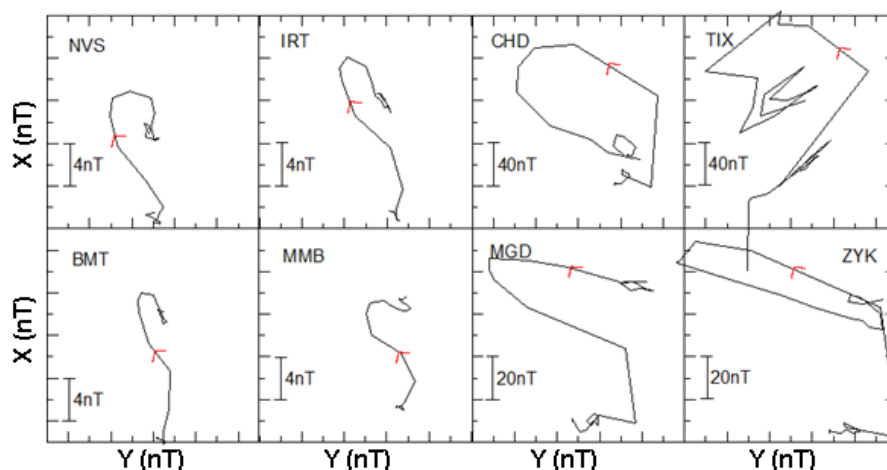


Figura 2.16. Per representar la polarització com l'evolució temporal del vector magnètic, fruit de la variació sincrònica dels seus components, es dibuixa el component X del camp magnètic en funció del component Y. Polarització del camp magnètic per estacions al voltant de la mateixa hora local que la primera arribada del front d'ona a la magnetopausa. Als dos panells de l'esquerra la polarització és lineal, les estacions estan situades just abans de l'hora de la primera arribada del front d'ona a la magnetopausa. Als dos panells de la dreta, a les estacions situades just després del temps de la primera arribada a la magnetopausa, la polarització és en el sentit contrari a les agulles del rellotge.

Codi IAGA	Nom	Latitud geogràfica	Longitud geogràfica
BMT	Beijing Ming Tombs	40.300°	116.200°
CHD	Chokurdakh	70.620°	147.890°
IRT	Irkutsk	52.167°	104.450°
MGD	Magadan	60.120°	151.020°
MMB	Memambetsu	43.910°	144.189°
NVS	Novosibirsk	55.030°	82.900°
TIX	Tixie	71.590°	128.780°
ZYK	Zyryanka	62.750°	150.780°

Taula 2.4. Observatoris emprats en la figura 2.16, amb les seves coordenades geogràfiques i el codi IAGA.

2.3.3. Discussió i conclusions

L'objectiu d'aquest apartat és aportar una visió completa d'un cas concret de SC, des de l'augment de la pressió dinàmica del vent solar, de la seva arribada a la magnetosfera fins les seves característiques observades a terra. Hem utilitzat una gran col·lecció de dades que mostren diferents aspectes del fenomen. Gràcies a les posicions d'alguns satèl·lits hem pogut observar en detall els efectes del pas del front d'ona a través de la *magnetosheath* i la magnetopausa i com aquestes parts de la magnetosfera reaccionen a la compressió.

El cas que hem estudiat té un petit increment de la pressió dinàmica del vent solar, només 2 nPa, i un increment del camp geomagnètic al voltant de 10 nT. Fins i tot amb aquesta petita amplitud, aquest SC presenta totes les característiques principals d'aquests tipus de fenòmens, el que posa de rellevància que més que l'amplitud, el que determina les característiques d'un SC és la brusquedat del fenomen.

Fora de la magnetosfera, la velocitat de propagació de la pertorbació era només de 450 km/s, lluny de la major part de casos estudiats, on normalment la velocitat està al voltant dels 600 o 900 km/s, com ja hem comentat es tracta d'un augment molt petit.

Gràcies a la particularment afortunada posició dels satèl·lits THEMIS B i C en el moment del SC, hem pogut observar una sèrie de creuaments de la magnetopausa, observacions de la *magnetosheath* i del *bow shock*. Abans del pas del front de xoc, amb condicions de calma, hem detectat oscil·lacions de la magnetopausa a les dades de THEMIS C. A més hem obtingut registres del camp magnètic a la *magnetosheath* del satèl·lit THEMIS B, aquests valors són molt més alts que els enregistrats fora de la magnetosfera, però mantenen les mateixes estructures. Després de passar el front de xoc, hem pogut descriure la compressió de tota la magnetosfera. Llavors el THEMIS B enregistra el camp magnètic del IMF, i el THEMIS C, el de la *magnetosheath*.

El quocient entre l'increment del camp magnètic, ΔB , i l'increment de l'arrel quadrada de la pressió del vent solar, $R = \Delta B / (P_2^{1/2} - P_1^{1/2})$ [Siscoe *et al.*, 1968] al terra és $R = 15.5 \text{ nT/nPa}^{1/2}$, aquest valor és consistent amb altres valors estimats a la literatura. A l'òrbita geosincrònica, R mostra diferències entre GOES 11, situat a les hores del matí, i els GOES 10 i 12, situats al sector tarda, amb valors més petits que els de GOES 11. A més, hi ha una clara diferència entre THEMIS A, situat al sector nit, i THEMIS D i E, situats a la matinada. Les observacions obtingudes dels satèl·lits revelen una gran varietat en les amplituds depenent de l'hora local, sempre amb valors més suaus al sector nit.

La superposició de les diferents contribucions magnetosfèriques i ionosfèriques fa que la manifestació del SC a terra sigui molt més complexa que en l'òrbita geosincrònica. Típicament la forma d'ona del SC és més simple a baixes latituds, lluny dels corrents ionosfèrics d'alta latitud i lluny del sistema de corrents de l'equador. En alguns casos, com ja hem comentat anteriorment, el salt en el camp magnètic es precedit per un fenomen que no apareix en les mesures fetes a la magnetosfera o al IMF, per exemple, en alguns casos s'observa un PRI (és el cas de l'estació UPS), o un doble pols que es pot veure en estacions situades a altes latituds. Aquests aspectes són interpretats com manifestacions a terra del sistema de corrents ionosfèrics. En el cas estudiat, hem presentat una compilació de fets observacionals consistents amb el model d'Araki [Araki, 1994]. A més de l'efecte de la compressió produït pel front de xoc, apareix l'efecte d'un corrent elèctric en sentit del capvespre cap a l'alba al llarg del front d'ona, que indueix un sistema de corrents ionosfèrics de doble vòrtex que al final produeixen un impuls preliminar d'origen polar (DP_{PI}). D'altra banda, si l'increment de la pressió del vent solar es manté després de la discontinuïtat, la convecció magnetosfèrica s'ha d'ajustar a un estat de compressió de la magnetosfera, el que provoca l'aparició d'un sistema de doble vòrtex a la regió polar (DP_{MI}) que s'oposa al camp DP_{PI} i correspon al camp principal, MI. Gràcies a les dades del projecte IMAGE hem pogut determinar la localització de la frontera entre els dos sistemes de corrents ionosfèrics, en el cas del nostre estudi estava localitzada al voltant de la latitud 67° .

Capítol 3. Detecció de SCs

Un cop conegut be el comportament dels SC's anem a escometre el problema de la seva detecció. I més concretament, ens centrarem en la detecció automàtica de SCs. Primerament presentarem la problemàtica de com s'elaboren en l'actualitat les llistes dels SCs, després presentarem el nou mètode per elaborar les noves llistes. Aquest nou mètode està basat en les xarxes neuronals, i per tant farem una breu descripció de que són i com funcionen les xarxes neuronals. Tot seguit presentarem una aplicació de les xarxes en l'àmbit dels índexs geomagnètics, com un exemple més senzill de la utilització de les xarxes. Finalment ens centrarem en l'objectiu principal d'aquest treball, la detecció automàtica de SCs mitjançant xarxes neuronals.

3.1. Detecció manual

Des de l'any 1975 l'Observatori de l'Ebre és l'organisme encarregat d'elaborar les llistes oficials de SCs. Aquesta feina va ser encomanada per la *International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA)*, i a tal efecte es va crear el Servei de Variacions Magnètiques Ràpides (SRMV). Aquesta

feina s'ha fet i encara es fa de manera manual. El Servei parteix de les dades que subministren una sèrie d'observatoris col·laboradors, que envien una llista mensual amb possibles candidats a ser classificats com a SCs. Ja en aquest punt inicial, ens trobem en la primera dificultat del Servei, la irregular distribució dels observatoris col·laboradors. Com l'aparència dels SCs depèn de la localització de l'observatori, depèn de la latitud i l'hora local, la distribució dels observatoris col·laboradors en les tasques d'identificació ha estat fonamental per garantir la integritat de les llistes. La distribució desigual dels observatoris magnètics al voltant del món ha dificultat l'estudi de fenòmens com els SCs. Aquest tema ja va ser discutit en les primeres assemblees de la IAGA on es va posar de manifest la necessitat d'ordenar una sèrie d'observatoris latitudinalment i longitudinalment ben distribuïts i equipats amb la instrumentació més moderna. Després de la proposta de Mayaud [1975], el SRMV utilitza, a més, els registres de cinc observatoris de baixa latitud, no equatorial, distribuïts uniformement a tot el món per determinar els veritables SCs de les llistes de candidats a SCs i mesurar els seus paràmetres. Els observatoris de baixa latitud seleccionats són M'Bour (MBO), Alibag (ABG), Honolulu (HON), Kanoya (KNY) i Fuquene (FQN), excepte pel cas de KNY també s'han establert els seus observatoris suplents, Apia (API) per a HON, Guimar (GUI) per a MBO, Hyderabad (HYB) per a ABG i San Juan (SJJ) per a FQN.

Tal com s'ha explicat en la secció 1.3 la falta d'una definició clara i precisa del fenomen ha suposat certa incertesa en l'estudi i sobretot en l'elaboració de les llistes d'esdeveniments. Un cop establerta la definició i les regles morfològiques per part de Mayaud [1973], els observadors encarregats d'inspeccionar els magnetogrames dels observatoris col·laboradors amb el Servei, van disposar de regles per decidir si un esdeveniment tenia prou entitat per a ser considerat com a possible candidat a esdevenir SC, però tot i així, al tractar-se de regles morfològiques, la decisió depenia de la perícia o la subjectivitat de l'observador en qüestió. No va ser fins l'any 2009, a l'Assemblea de la IAGA de Sopron, on s'introdueix de manera efectiva un criteri numèric o objectiu basat en el pendent del salt brusc [Curto *et al.*, 2007].

Un cop el Servei rep els informes del observatoris col·laboradors ha de decidir quins d'aquests candidats mereixen ser classificats com a veritables SCs, a més de mesurar diferents paràmetres com l'hora d'inici, la durada i l'amplitud. Per a tal efecte es consulten les dades dels cinc observatoris de baixa latitud, on la signatura dels SCs s'assembla més a una funció esglaó [Tsunomura, 1998], i si es necessari també es consulten dades del vent solar a partir de diferents satèl·lits com els GOES o l'ACE. Un cop presa la decisió de quins candidats són realment SCs, finalment es publiquen les llistes definitives de SCs.

Ja hem comentat breument el problema de la distribució irregular d'observatoris, però aquest no és el principal problema de la forma de treballar del Servei. Avui en dia, el nombre d'observatoris col·laboradors està disminuint com a conseqüència de l'automatització de molts observatoris on ara ja no hi ha persones encarregades d'examinar les dades i presentar un informe de possibles candidats. Un altre problema és la tardança de tot el procés ja que requereix cert temps, en oposició, les dades magnètiques cada cop són més accessibles via internet. Per tot això, cada cop és més urgent canviar la forma de detectar i elaborar les llistes de SCs, a ser possible utilitzant un mètode automàtic. Però no es pot fer un canvi de mètode sense tenir en compte que el nou mètode ha de ser coherent amb les llistes actuals, no per canviar de mètode podem afegir incerteses o desconfiança en la feina feta pel Servei després de tants anys de treball.

3.2. Breu introducció a les xarxes neuronals

Un cop posats de manifest els problemes actuals de la detecció manual, des de l'Observatori de l'Ebre es van iniciar treballs per obtenir un mètode automàtic. Paral·lelament, altres autors s'han interessat també per aquesta problemàtica [per exemple, Takano *et al.*, 1999; Shinohara *et al.*, 2005; Hafez and Ghamry, 2011 o Ghamry *et al.*, 2013]. A l'Observatori, primerament es van fer estudis morfològics per intentar obtenir valors llindars dels diferents paràmetres dels SCs. A partir d'aquests treballs inicials es van fer altres estudis

[Curto *and* Blanch, 2004], fent detecció amb una anàlisi de *wavelets* sobre el pendent del camp magnètic. Amb aquest mètode es van obtenir bons resultats pels casos de SCs clars, amb molt pendent i amb una gran amplitud, en canvi, pels casos de SCs amb amplituds petites i pendents petits els resultats no varen ser gaire satisfactoris. Amb la intenció d'aprofitar la experiència acumulada al Servei, es va escollir treballar amb xarxes neuronals per aprofitar la seva capacitat d'aprendre a partir dels diferents casos. Per tant, a continuació presentem breument una descripció sobre les xarxes neuronals i després una aplicació pràctica en els camp dels índexs magnètics.

3.2.1. Metodologia, xarxes neuronals

Una xarxa neuronal artificial la podem definir com una forma de computació inspirada en models biològics. S'anomenen xarxes neuronals perquè s'assemblen al cervell humà en dos aspectes, el coneixement és adquirit per la xarxa a través de l'aprenentatge i els pesos sinàptics, o forces en que estan connectades les neurones, s'utilitzen per emmagatzemar la informació [Rojas, 1996; Haykin, 1999].

Les xarxes neuronals es van començar a desenvolupar durant la primera meitat del segle XX, amb les primeres idees de la intel·ligència artificial. Però no ha estat fins la dècada dels vuitanta, paral·lelament al desenvolupament dels ordinadors, s'han establert com una disciplina amb grans possibilitats per realitzar les més diverses tasques, en camps molt diversos, des de la psicologia, enginyeria, economia, entre altres.

Una xarxa neuronal està composta d'elements simples, les neurones, treballant en paral·lel. Aquests elements estan inspirats en el sistema nerviós dels animals. Com en la natura, el funcionament de la xarxa ve determinat per les connexions entre els elements individuals [Kröse *and* Van der Smagt, 1996]. Es pot entrenar una xarxa per fer una determinada funció ajustant els valors de les connexions (pesos) de les seves neurones. Els pesos s'ajusten a mesura que la informació flueix per la xarxa.

Generalment per entrenar la xarxa se li introdueix una sèrie de variables o *inputs*, i se li proporciona també la sortida desitjada o *targets*. Llavors la xarxa va creant una sèrie de connexions, és a dir, modifica els pesos o funcions de probabilitat, segons detecti que una variable és més o menys rellevant respecte a la sortida final. Així, al final de l'entrenament, després de que la informació circuli per xarxa repetides vegades, les variables més significatives tenen un pes més gran que les que no ho són gaire.

Una neurona simple la podem descriure a través de la seva funció de transferència o activació (f), del seu pes (w) i del seu *bias* (b), un paràmetre propi de la neurona que el podríem associar a una certa tendència (figura 3.1). La sortida (a) que produeix la neurona serà $f(wp+b)$ [Demuth *and* Beale, 1994]. Tant w com b són paràmetres ajustables de la neurona, així entrenant la neurona per a una determinada feina aquests paràmetres es van ajustant fins a minimitzar l'error de la sortida, a . Si l'entrada és un vector, el pes deixa de ser un escalar i es converteix en una matriu, la matriu de pesos W , i la sortida seria $a=f(Wp+b)$.

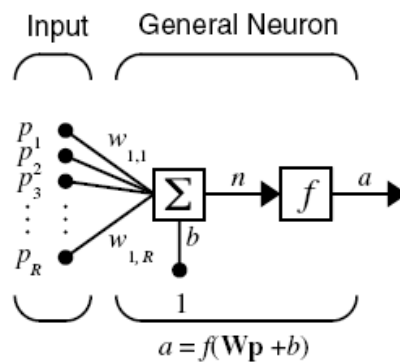


Figura. 3.1. Esquema simple d'una neurona [Demuth *and* Beale, 1994]

En una xarxa hi pot haver un nombre elevat o no de neurones, tot depèn de la tasca per a la que està dissenyada. Cada neurona té una feina relativament senzilla, rep un *input* dels veïns o de l'exterior, calcula una sortida i la propaga a les altres neurones. A més fa una segona tasca, ajustar els pesos. El sistema és paral·lel en el sentit que moltes neurones poden lliurar els seus càlculs al mateix temps.

En les xarxes es defineixen tres tipus de neurones (figura 3.2), les neurones d'entrada (caracteritzades pel subíndex *i*) que reben l'*input* de fora de la xarxa, les de sortida (subíndex *o*) que envien la seva sortida fora de la xarxa i les neurones ocultes (subíndex *h*) que tant el seu *input* com l'*output* no surten de la xarxa.

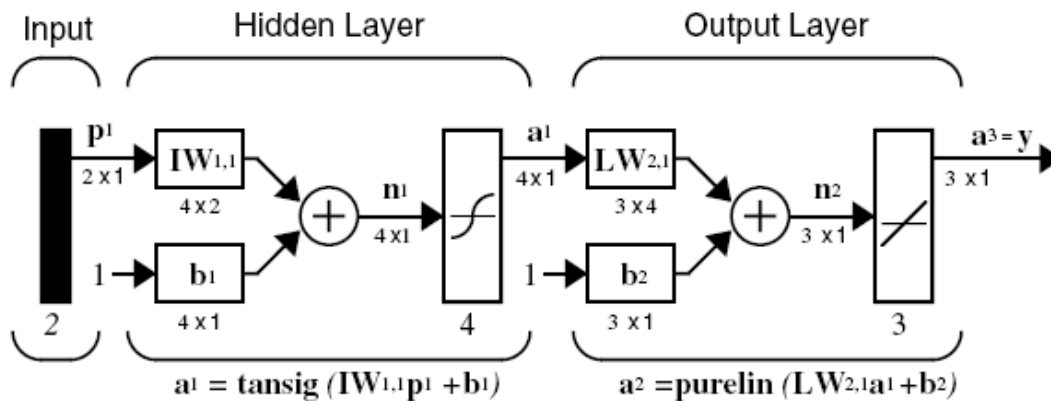


Figura. 3.2. Esquema d'una xarxa amb tres capes, una capa que rep les dades (*input*), una interna (*hidden*) i una capa de sortida (*output*) [Demuth and Beale, 1994].

Depenent del tipus de xarxa la informació o *inputs* pot fluir en una direcció, cap avant, o en les dues, avant i enrere, tot depèn de com es dissenyi i la tasca que ha de realitzar [Caudill and Butler, 1992]. En el cas de que la informació circuli cap avant, assumim que cada neurona té un efecte additiu sobre l'*input* de la neurona a la que està connectada. L'*input* p_k total d'una neurona *k* és la suma del producte dels pesos pels *outputs* de les neurones a les que està connectada (equació 3.1) més un cert biaix:

$$p_k(t) = \sum_j w_{jk} a_j(t) + b_k(t) \quad (3.1)$$

La contribució d'un w_{jk} positiu es considera una excitació i la d'un w_{jk} negatiu una inhibició. Hi ha altres regles de propagació, però aquesta és la més usada.

També necessitem una regla que ens doni l'efecte de l'*input* total sobre la sortida de la neurona (equacions 3.2 i 3.3) [Rojas, 1996]. Necessitem una funció f_k que agafi l'*input* total $p_k(t)$ i la sortida actual i produeixi un nou valor d'activació a la neurona *k* (exemples a la figura 3.3).

$$a_k(t+1) = f_k(a_k(t), p_k(t)) \quad (3.2)$$

Habitualment la funció d'activació o de transferència (figura 3.3) és una funció no decreixent de l'*input* total

$$a_k(t+1) = f_k(p_k(t)) = f_k\left(\sum_j w_{jk}(t)a_j(t) + b_k(t)\right) \quad (3.3)$$

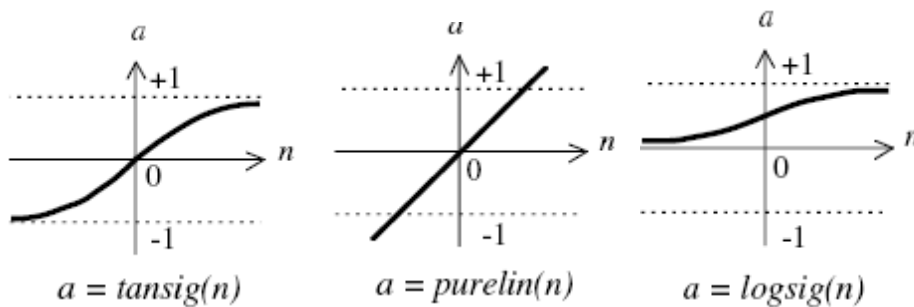


Figura. 3.3. Diferents funcions de transferència o activació [Demuth *and* Beale, 1994].

En el cas que la informació circuli cap enrere, la sortida de la xarxa en general i de cada neurona en particular, seria l'entrada per a les neurones situades a l'esquerra. Es fa servir la mateixa formulació però s'utilitzen dos subíndexs dependent si la informació circula cap avant o cap enrere. D'aquesta manera es creen una sèrie de bucles on s'han d'imposar algunes condicions per dir-li a la xarxa que pari.

3.2.1.1. Tipus de xarxes

Les xarxes neuronals es poden classificar de moltes maneres diferents, però les classificacions més generalistes depenen del tipus de connexions i del tipus d'aprenentatge [Caudill *and* Butler, 1992]. Així, segons les seves connexions podem dividir les xarxes en dos grans grups:

- *Feed-forward*, en que les dades van de l'*input* a l'*output* de cada neurona estrictament cap avant. El processat de les dades pot estendre's sobre múltiples neurones, però no hi ha connexions cap enrere ni dintre de la capa.
- Xarxes recurrents, inclouen connexions cap enrere.

Una altra manera de classificar les xarxes és segons el tipus d'aprenentatge [Fornells, 2007]. Hi ha diferents mètodes per reforçar les connexions entre neurones per tal que la xarxa vagi aprenent. Una manera és seleccionar els pesos específicament, fent servir coneixement a priori. Una altra manera és entrenant la xarxa de manera que vagi aprenent els patrons de les dades modificant els pesos d'acord amb alguna regla d'aprenentatge. D'aquesta manera es distingeix entre entrenament [Demuth *and* Beale, 1994]:

- Supervisat, en que s'introdueix un conjunt d'entrades ordenades d'alguna manera on a priori ja se sap com serà la sortida.
- No supervisat o autoorganitzat, on no hi ha cap tipus d'ordre en les dades i se suposa que el sistema es capaç de reconèixer patrons per si sol, sense cap tipus d'informació a priori.

Per una descripció matemàtica de com funcionen els algoritmes d'aprenentatge veure Annex.

3.2.1.2. *Back-propagation*

Les primeres xarxes neuronals que es van crear eren d'una sola capa de neurones, pel que tenien força limitacions. El problema principal d'una xarxa amb varies capes de neurones era trobar la manera d'ajustar els pesos de la capa oculta. La resposta la varen donar Rumelhart, Hinton i Williams [Rumelhart *et al.*, 1986].

La idea principal d'aquesta solució és que els errors de les neurones de la capa oculta són determinats per *back-propagation* (propagació cap enrere) dels errors de la capa de sortida. Bàsicament el procés *back-propagation* consisteix en dues passades a través de les diferents capes de la xarxa, una cap avant i l'altra cap enrere. Durant la passada cap avant s'aplica a la capa d'entrada un patró o vector d'entrada, aquest es propaga a través de les diferents capes i produeix un vector de sortida. Durant aquest procés els pesos sinàptics de la xarxa són fixos i no es modifiquen. Durant l'altra passada, cap enrere, en canvi, els pesos si que es modifiquen d'acord amb la regla

d'aprenentatge. El senyal de sortida real es compara amb el senyal de sortida desitjat i com a resultat s'obté un senyal d'error, que es propaga en direcció contrària a través de la xarxa modificant els pesos, de manera que, al tornar a passar el vector d'entrada cap avant, el senyal de sortida s'assembla més al senyal de sortida desitjat. Amb la solució *back-propagation* ja és factible crear xarxes amb diferents capes de neurones (figura 3.4):

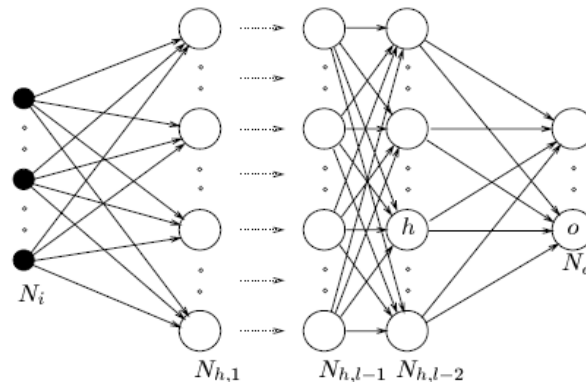


Figura. 3.4. Estructura de capes [Kröse and Van der Smagt, 1996].

Hi ha alguns aspectes que fan que aquest mètode no sempre tingui èxit. Dos dels principals problemes que poden succeir són la paràlisi de la xarxa i un mínim local. La paràlisi de la xarxa es pot produir si durant l'entrenament de la xarxa els pesos es poden ajustar a valors grans [Kröse and Van der Smagt, 1996]. Llavors l'*input* total d'una neurona oculta o de sortida pot agafar valors també molt grans, i com a conseqüència la funció d'activació pot agafar valors molt propers a 1 o a 0. Com l'ajust dels pesos és proporcional a $a_k^l(1-a_k^l)$ pot ser 0, el que implicaria una aturada del procés.

L'altre problema que pot aparèixer és un mínim local. La superfície de l'error d'una xarxa complexa està plena de màxims i mínims locals, si el procés per minimitzar l'error queda atrapat en un mínim local ja no podrà sortir per continuar l'entrenament fins el mínim absolut [Kröse and Van der Smagt, 1996]. Hi ha mètodes probabilístics que ajuden a superar aquest inconvenient però fan molt lent tot el procés. Una altra alternativa es augmentar el nombre de neurones ocultes, s'augmenta el treball que ha de fer la xarxa però la

probabilitat que es caigui en un mínim local disminueix, encara que no desapareix.

Cap xarxa en principi és exacta, l'error que fa la xarxa pot estar influenciat per diversos factors [Kröse and Van der Smagt, 1996]:

- L'algoritme d'entrenament i el nombre d'iteracions. Determina com de bé ha estat minimitzat l'error en l'etapa d'entrenament.
- El nombre de dades utilitzades per l'entrenament. És important que les dades d'entrenament representin bé la funció que es vol trobar, així com que estiguin ben distribuïdes.
- El nombre de neurones en la capa oculta. Determinen el "poder d'expressivitat" de la xarxa. Per una funció suau només són necessàries unes poques neurones, per una funció molt oscil·lant necessitem moltes més neurones en la capa oculta.

Primer hem de definir una mesura adequada de l'error. Tots els algoritmes d'entrenament intenten reduir l'error en les dades d'entrenament. L'error mig per mostra (per l'aprenentatge) es defineix com:

$$E_{aprenentatge} = \frac{1}{P_{aprenentatge}} \sum_{p=1}^{P_{aprenentatge}} E^p \quad (3.4)$$

on P indica les iteracions del procés d'aprenentatge i E^p és la diferència entre la sortida desitjada i l'actual sortida en la fase d'entrenament (veure Annex). Aquest és l'error mesurable durant el procés d'entrenament.

És obvi que l'error real de la xarxa es diferent d'aquest error que acabem de definir ja que depèn de la localització i la representativitat de la mostra. La diferència entre la sortida desitjada i la sortida actual de la xarxa s'ha d'integrar per tot l'*input* per tenir una visió més realista de l'error de la xarxa.

El nombre de dades que fem servir per entrenar la xarxa és un aspecte fonamental en la bona resolució de la xarxa, i tant important com el nombre, la bona distribució [Kröse and Van der Smagt,1996]. Es necessiten dades que siguin significatives. Per exemple, si volem obtenir una funció (figura 3.5), al

voltant dels màxims i mínims necessitem més densitat de mostres, si les mostres no son significatives, en el sentit de que no reflecteixen un comportament determinat, serà molt difícil que la xarxa pugui reproduir el resultat desitjat.

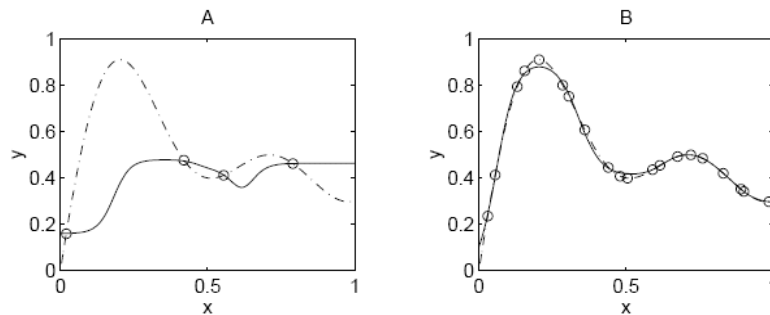


Figura. 3.5. En línia discontinua es representa la funció que volem obtenir i en cercles les mostres de que disposem per entrenar la xarxa, es evident que en la baixa densitat de mostres de la figura (A) obtindrem una mala representació de la funció, en la figura (B) amb una gran densitat de mostres s'obté un resultat molt bo [Kröse and Van der Smagt, 1996].

Un altre aspecte a tenir en compte és el nombre de neurones en la capa interna. No per més neurones i en teoria més potència de càlcul s'obtenen millors resultats [Kröse and Van der Smagt, 1996]. Un cas típic passa quan es treballa amb dades reals afectades per soroll, en que un gran nombre de neurones internes poden amplificar aquest soroll, com en la figura 3.6, on a l'augmentar el nombre de neurones internes el soroll queda amplificat i s'obtenen resultats força dolents. Alhora de dissenyar una xarxa neuronal, trobar el nombre adequat de neurones de la capa oculta és un dels principals reptes.

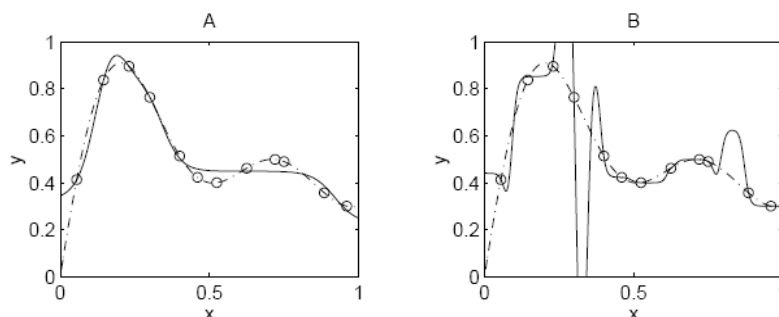


Figura. 3.6. Fent servir la mateixa funció que a la figura anterior, es representa el resultat de modificar el nombre de neurones en la capa interna. En la figura (A) s'han fet servir 5 neurones internes, en línia contínua es representa el resultat de la xarxa. En la figura (B) s'han utilitzat 20 neurones internes [Kröse and Van der Smagt, 1996].

En tot el que segueix, la part pràctica, destacar que hem fet servir un conjunt de llibreries pròpies d'un llenguatge popular en a comunitat científica com el MATLAB. Per tant, hem utilitzat un conjunt de funcions d'activació i algorismes d'entrenament de la xarxa ja programats. El mèrit pràctic d'aquesta tesi no rau en la programació d'una nova xarxa neuronal, sinó en la tria de variables representatives del problema físic i la cerca dels paràmetres propis de la xarxa òptims per entrenar la xarxa per fer una tasca concreta.

3.3. Exemple d'aplicació de les xarxes neuronals a un problema d'estimació de l'activitat magnètica.

Com una aplicació pràctica per veure com funcionen les xarxes neuronals descriurem un mètode per transformar índexs d'activitat magnètica. Concretament es tracta d'una aplicació per obtenir índex d'activitat magnètica locals, K , a partir dels índexs d'activitat globals, K_p . Fins ara, per estimar l'activitat magnètica en zones sense observatoris magnètics només es podia fer a partir dels índexs globals. Amb els índexs calculats amb la xarxa neuronal obtindrem una millor estimació de l'activitat magnètica local, especialment en els casos d'activitat moderada o alta.

3.3.1. Presentació del problema

Les variacions enregistrades als magnetogrames són diferents a cada observatori, principalment depenent de la latitud i el temps local. Els índexs d'activitat magnètica s'utilitzen com una mesura quantitativa independent de l'hora local. Aquests índexs sovint son utilitzats com a *inputs* de diferents models regionals que descriuen el comportament magnètic o ionosfèric [per exemple, Pietrella, 2012; Pietrella *and* Perrone, 2008; Zolesi *and* Cander, 1998] Hi ha una gran varietat d'índexs cadascun creat per mesurar algun aspecte concret, ens fixarem només en dos, l'índex K i l'índex K_p .

L'índex K és un índex local. Va ser introduït per Bartels l'any 1939 [Bartels *et al.*, 1939]. Cada observatori assigna un dígit entre 0 i 9 per als

components del camp magnètic H i D cada tres hores (en temps universal, UT). El valor assignat es basa en l'amplitud de la variació magnètica normalitzada per una escala quasi-logarítmica [Mayaud, 1980]. Cada observatori utilitza la seva pròpia escala, especificant la variació que correspon a $K=9$, en nT. Bartels va establir les diferents escales amb l'objectiu de que cada observatori tingués la mateixa distribució en freqüència de l'índex K. Alhora d'establir el valor de l'índex trihorari s'ha de tenir en compte que l'únic que ens interessa és la variació irregular, per tant s'ha d'extreure la variació diürna [Mayaud, 1967]. Com la variació diürna és diferent dia a dia, els observadors, en el cas que l'escala sigui feta a mà, o els algorismes, en el cas d'escales automàtiques, han de tenir molta cura en estimar-la [Menvielle *et al.*, 1995]. En algunes ocasions és realment difícil extreure la variació diürna, especialment durant la fase de recuperació després d'una tempesta magnètica.

L'altre índex que tindrem en consideració és l'índex K_p , es tracta d'una generalització de l'índex K. És un índex global, la p es refereix a "planetari". Va ser introduït per Bartels l'any 1949 [Bartels, 1949]. K_p s'indica amb un valor entre 0 i 9 amb una subdivisió en terços (0, 0+, 1-, 1, 1+,...) per cada interval de tres hores. L'índex K_p es deriva de l'índex K d'un grup escollit de 13 observatoris (11 de l'hemisferi nord i només 2 de l'hemisferi sud, figura 3.7), aquesta distribució irregular implica certa desviació dels valors del K_p cap a l'hemisferi nord. L'objectiu de l'índex K_p és mesurar i comparar diferents períodes d'activitat magnètica pertorbada en diferents èpoques de temps. Per aquesta raó cada mesura de l'índex K, dels observatoris escollits, es transporta mitjançant taules estadístiques a un lloc concret, l'observatori de Niemegek, i a una època concreta, la tardor, per poder comparar diferents K_p sota les mateixes condicions. L'índex K_p ens proporciona informació de l'activitat magnètica planetària, però és un índex abstracte ja que no dona informació d'un lloc concret en una moment concret [Bartels, 1949].

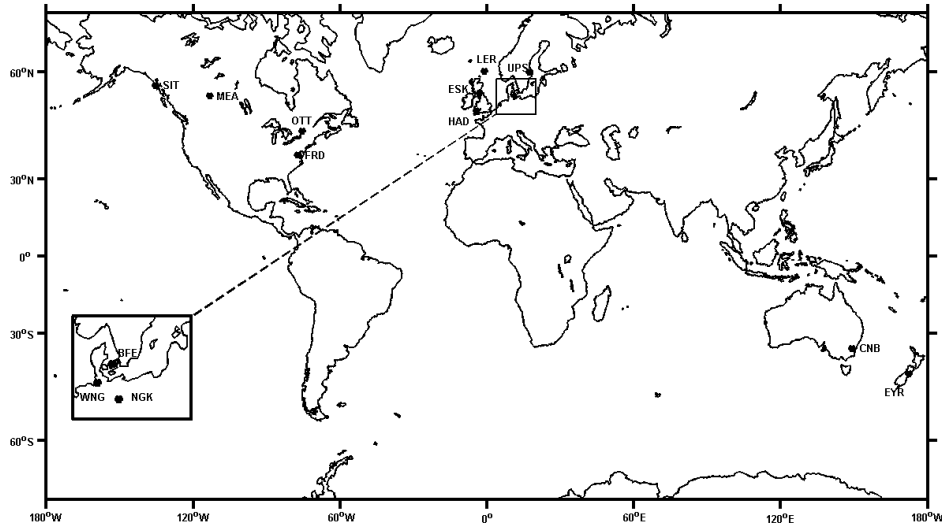


Figura 3.7. Els observatoris escollits per calcular Kp (els que encara s'utilitzen actualment, inicialment eren d'altres però s'han anat substituint per observatoris propers).

Un problema general de tots els índexs magnètics és la distribució irregular dels observatoris, molt nombrosa a l'hemisferi nord i molt escassa al sud, tot i així són la font fonamental per als índexs locals. El nostre objectiu és obtenir índexs locals a partir dels globals, no és una tasca fàcil ja que no hi ha cap algorisme que els relacioni. El procés de construcció del Kp implica una transformació dels índexs locals K mitjançant taules estadístiques, llavors, amb els observatoris seleccionats es fa una mitja i s'obté l'índex Kp. Per obtenir índexs locals a partir dels globals en un lloc concret necessitem la taula estadística per aquell lloc i a més ser capaços de desfer la mitja [Mayaud, 1980]. El principal problema per fer aquest procés invers està en les taules estadístiques, aquestes taules estan construïdes per a que en tots els observatoris hi hagi la mateixa distribució de K, i hi ha diferències importants en cada taula.

La distribució dels observatoris al món és molt irregular, amb el temps el nombre d'observatoris ha augmentat molt però encara així, hi ha grans zones sense observatoris, figura 3.8. El nostre interès rau en avaluar l'activitat geomagnètica en zones remotes poc cobertes per observatoris. Tenir una valoració de l'activitat geomagnètica en àrees sense observatoris pot ser útil per tenir una visió completa de l'activitat en alguna zona de la Terra. Hi ha

diferents opcions per fer aquesta tasca, si no es disposa del valor de l'índex K d'un observatori, la manera més senzilla per tenir una aproximació és utilitzar el valor de l'índex K de l'observatori més proper. Tant mateix, estem interessats en zones remotes amb un nombre d'observatoris molt baix, i aquesta manera de fer pot no ser factible. Una altra opció seria fer una interpolació utilitzant altres observatoris, però el baix nombre d'observatoris i la seva irregular distribució també fan que descartem aquesta opció.

Finalment, la tercera opció seria desfer el procés del càlcul d'un índex global com el K_p per avaluar l'activitat local, en aquest sentit proposem un mètode basat en les xarxes neuronals per obtenir índexs locals a partir d'índexs globals.

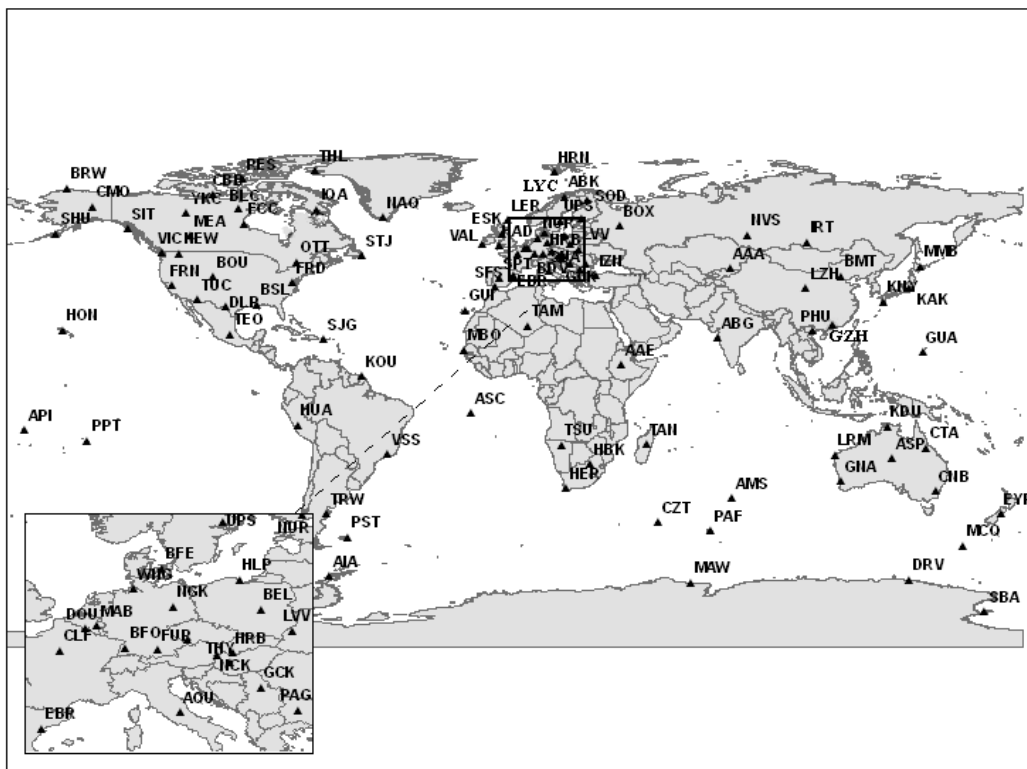


Figura 3.8. Distribució de la xarxa d'observatoris d'INTERMAGNET. Obtinguda de: <http://www.intermagnet.org/imos/imomap-eng.php>

Per validar el nostre mètode calcularem els valors de K per un lloc remot, Livingston (LIV) ($62^{\circ}39'44''S$, $60^{\circ}23'41''W$, coordenades geogràfiques; $52^{\circ}50'13''S$, $8^{\circ}57'42''E$, coordenades geomagnètiques). L'observatori de

Livingston és un observatori situat a la zona antàrtica, desatès la major part de l'any. Els índexs K es calculen amb el mètode FMI quan es recuperen les dades durant l'època estival.

3.3.2. Inputs de la xarxa

A la secció 3.2.1 ja hem parlat de les xarxes i del seu entrenament. Alhora de crear una xarxa per fer un feina específica s'han de determinar tant els paràmetres físics del problema a resoldre, que determinaran els *inputs*, com els paràmetres de la xarxa, nombre de capes, nombre de neurones per capa, funcions de transferència i altres paràmetres, aquests dos conjunts de tries s'han de fer en paral·lel [Nakamura *et al.*, 2007].

Per triar els *inputs* de la xarxa hem de tenir en compte la física del problema. Per tant, agafarem com a *input* la latitud i longitud geomagnètiques ja que depenent de la seva situació, els observatoris enregistren efectes diferents. També agafarem com a *input* l'hora i el dia de l'any ja que les variacions diürnes i estacionals contribueixen a modular les variacions irregulars. Així doncs, el "vector" *input* per cada observatori seria: latitud i longitud geomagnètica, l'hora, el dia de l'any i l'índex Kp corresponent. Per a l'entrenament de la xarxa utilitzarem com a objectiu, *target*, o sortida desitjada el corresponent índex K de les estacions que farem servir durant l'entrenament. Per validar la xarxa utilitzarem les dades de LIV, per tant, aquest ha d'estar exclòs dels observatoris utilitzats per entrenar la xarxa.

Hem treballat amb els valors de K dels anys 2003, 2004 i 2005 obtinguts d'INTERMAGNET (*International Real-time Magnetic Observatory Network*). Per cada any tenim 68, 72 i 78 observatoris respectivament d'acord amb la seva disponibilitat. A més a més, tenim les dades de l'estació de Livingston (LIV) pel mateix període [Marsal *et al.*, 2004 i 2005] que ens servirà per avaluar l'èxit de la xarxa.

3.3.3. Conjunt de dades

Després de definir les variables del problema físic a tenir en compte, hem de seleccionar els observatoris que farem servir en el procés d'entrenament de la xarxa. No podem introduir directament tots els observatoris disponibles per la seva irregular distribució. Si ho féssim, els resultats estarien esbiaixats cap a les zones superpoblades d'observatoris, quan estem més interessats en àrees remotes. Com la nostra estació test és LIV hem de triar els observatoris a utilitzar amb molta més cura. Ens plantejem dues opcions, agafar observatoris de tot el planeta, però ben distribuïts, o agafar observatoris propers a LIV, agafar una xarxa global o una de local. Provarem les dues opcions.

Respecte a la xarxa global d'observatoris, necessitem una distribució regular d'observatoris, especialment pel que fa el nombre d'observatoris en els dos hemisferis. La figura 3.9 mostra la distribució global d'observatoris que hem utilitzat, en total una suma de 42.

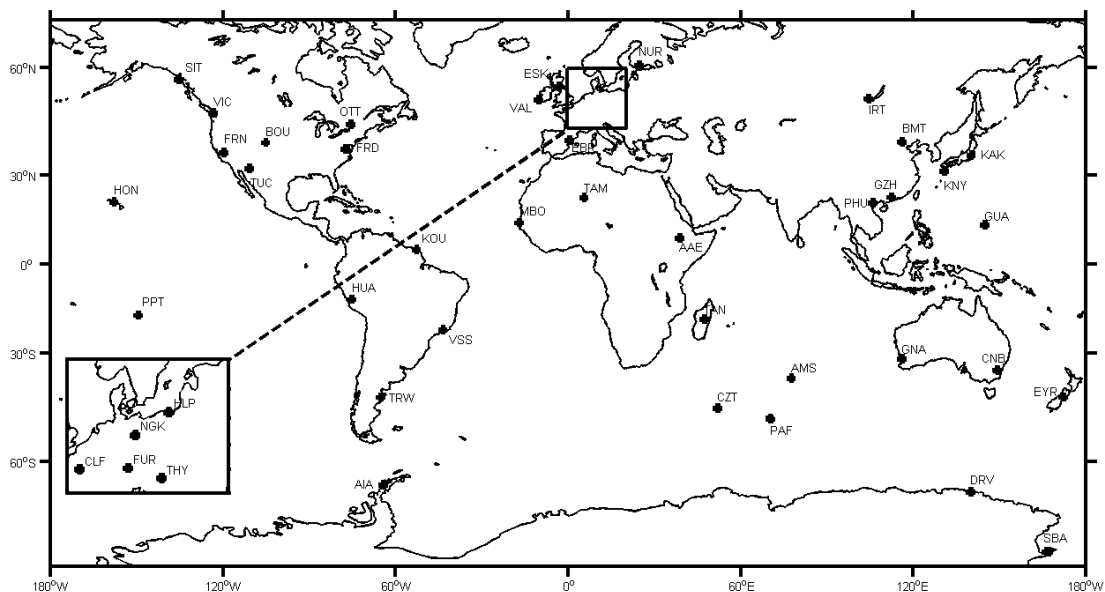


Figura 3.9. Distribució d'observatoris utilitzada en la xarxa global.

Respecte la xarxa local d'observatoris, la distribució d'observatoris la mostrem a la figura 3.10, hem agafat tots els observatoris de l'hemisferi sud excepte els situats a la zona auroral, ja que aquests últims enregistren efectes

diferents dels de la nostra estació test. Livingston tot i ser geogràficament una estació antàrtica, des del punt de vista geomagnètic és una estació de latitud mitja, com es dedueix de les seves coordenades geomagnètiques. D'aquesta forma disposem d'11 observatoris en front dels 42 de la xarxa global. LIV no s'inclou en cap d'aquestes distribucions d'observatoris sinó que es manté a part només per servir de test del mètode. A la taula 3.1 es compilen les coordenades geogràfiques i geomagnètiques dels observatoris utilitzats en les figures 3.9 i 3.10.

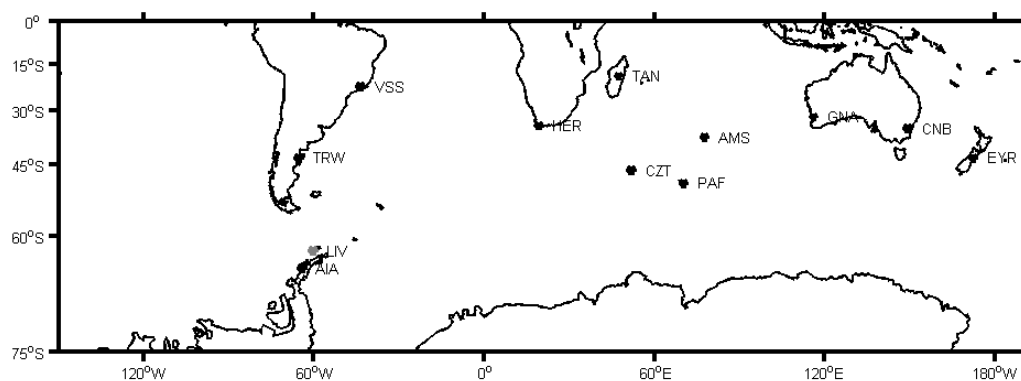


Figura 3.10 Distribució d'observatoris utilitzada en la xarxa local.

Codi IAGA	Nom	Latitud geogràfica	Longitud geogràfica	Latitud geomagnètica	Longitud geomagnètica
AAE	Addis Abeba	9.03°	38.76°	5.360°	112.16°
AIA	Argentine Island	-65.25°	295.73°	-55.33°	5.84°
AMS	Martin De Vives	-37.79°	77.57°	-46.22°	144.93°
BMT	Beijing Ming Tombs	40.30°	116.20°	30.41°	187.44°
BOU	Boulder	40.13°	254.76°	48.24°	321.28°
CLF	Chambon-La-Forêt	48.02°	2.26°	49.75°	85.80°
CNB	Canberra	-35.31°	149.36°	-42.47°	227.23°
CZT	Crozet	-46.43°	51.86°	-51.31°	114.05°
DRV	Dumont d'Urville	-66.66°	140.00°	-74.24°	231.04°
EBR	Ebre	40.82°	0.49°	43.06°	81.49°
ESK	Eskdalemuir	55.31°	356.80°	57.69°	83.76°
EYR	Eyrewell	-43.41°	172.35°	-46.96°	254.00°
FRD	Fredericksburg	38.20°	282.63°	48.14°	353.93°
FRN	Fresno	37.09°	240.28°	43.42°	305.93°

FUR	Furstenfeldbruck	48.16°	11.27°	48.32°	94.73°
GNA	Gnangara	-31.78°	115.94°	-41.65°	189.30°
GUA	Guam	13.59°	144.87°	5.56°	216.08°
GZH	Guangzhou	23.09°	113.34°	13.15°	185.25°
HLP	Hel	54.60°	18.81°	53.23°	104.68°
HON	Honolulu	21.32°	202.00°	21.71°	270.27°
HUA	Huancayo	-12.03°	284.68°	-2.07°	356.97°
IRT	Irkutsk	52.16°	104.45°	42.20°	177.24°
KAK	Kakioka	36.23°	140.18°	27.65°	209.21°
KNY	Kanoya	31.42°	130.88°	22.17°	201.19°
KOU	Kourou	5.21°	307.26°	14.61°	20.08°
MBO	M'Bour	14.38°	343.03°	19.90°	57.83°
NGK	Niemegk	52.07°	12.67°	51.84°	97.71°
NUR	Nurmijarvi	60.50°	24.65°	57.89°	113.15°
OTT	Ottawa	45.40°	284.44°	55.37°	355.88°
PAF	Port Aux Francais	-49.35°	70.26°	-56.81°	133.56°
PHU	Phu Thuy	21.02°	105.95°	11.05°	178.27°
PPT	Papeete	-17.56°	210.42°	-15.13°	285.49°
SBA	Scott Base	-77.85°	166.78°	-78.99°	289.18°
SIT	Sitka	57.06°	224.67°	60.36°	281.27°
TAM	Tamanrasset	22.79°	5.53°	24.55°	82.07°
TAN	Tananarive	-18.91°	47.55°	-23.62°	116.33°
THY	Tihany	46.90°	17.89°	45.96°	100.60°
TRW	Trelew	-43.24°	294.68°	-33.33°	6.01°
TUC	Tucson	32.17°	249.20°	39.73°	316.74°
VAL	Valentia	51.93°	349.75°	55.65°	74.70°
VIC	Victoria	48.52°	236.58°	54.08°	298.38°
VSS	Vassouras	-22.40°	316.35°	-13.56°	27.05°

Taula 3.1. Coordenades geogràfiques i geomagnètiques dels observatoris emprats en les figures 3.9 i 3.10.

3.3.4. Paràmetres de la xarxa neuronal

Els altres elements que s'han de triar són els paràmetres de la xarxa, com el nombre de capes, el nombre de neurones per capa, la funció de transferència inclosa en cada neurona o l'algoritme d'entrenament. Després

d'una sèrie de tests preliminars, ens centrarem en les possibilitats d'una xarxa amb 2, 3 o 4 capes i amb un màxim de 40 neurones per capa.

Com hem comentat anteriorment, utilitzarem una xarxa neuronal amb el mètode *back-propagation* per minimitzar l'error, ja que van ajustant els pesos a mesura que la informació flueix per la xarxa. La funció de transferència serà una funció sigmoïdal per la capa o capes ocultes i una funció lineal per a les capes d'entrada i de sortida [Lundstedt, 1991]. El mètode d'entrenament serà un algoritme de gradient conjugat per minimitzar l'error, que es basa en buscar la direcció del gradient negatiu. Per accelerar el procés usem la condició de Power-Beale [Demuth *and* Beale, 1994]. Aquestes decisions han estat preses després de força tests, ja que presentaven els millors resultats.

Per triar entre els diferents paràmetres possibles de la xarxa neuronal hem de comparar els resultats obtinguts en cada cas. Creem i entrenem la xarxa i llavors comparem els resultats obtinguts en cada cas amb les dades reals de l'estació de Livingston. Després d'aquests tests decidim utilitzar una xarxa de 3 capes amb 20, 10 i 1 neurona per capa respectivament, ja que aquesta es capaç de cobrir tot el rang de valors de K .

Un cop escollits els paràmetres propis de la xarxa, ara hem de decidir quina xarxa d'observatoris utilitzem durant l'entrenament, si la global o la local. De fet, tant aquesta com les anteriors decisions s'han fet en paral·lel. Procedim de la mateixa forma, fem una sèrie de tests utilitzant la xarxa global i la local, el criteri per seleccionar la millor és el mateix, necessitem una xarxa capaç de produir valors alts i baixos de K_n , n de *network*. Si fem servir la xarxa global d'observatoris, la xarxa no cobreix tot el rang de valors de K , en canvi, si fem servir la xarxa local d'observatoris, la xarxa neuronal sí que ho fa. Llavors deduïm que la millor opció és utilitzar la xarxa local d'observatoris. Aquest fet es degut a que quan entrenem la xarxa amb observatoris de diferents regions, la xarxa no és capaç de reconèixer certs patrons i llavors intenta fer una espècie de mitjana, però si entrenem la xarxa amb observatoris de la mateixa regió sí que és capaç de reconèixer els patrons de comportament dels índexs K ja que els observatoris enregistren els efectes dels mateixos fenòmens

magnetosfèrics [Hagan *et al.*, 1996]. No obstant això, hem de verificar la distribució en freqüència de cada xarxa, o sigui el percentatge de cada classe que la xarxa és capaç de donar, entenent per cada classe el període de tres hores amb la mateixa activitat magnètica sent aquest determinat pel valor de K . També hem de verificar si la xarxa funciona millor per valors de K alts o baixos. La figura 3.11 mostra la distribució en freqüència per una xarxa local, en color gris, per una xarxa global, en color blanc, i el valors reals de l'índex K a Livingston, en color negre. Comparant les K_n , n de *network*, obtingudes amb la xarxa local amb les K_n obtingudes amb la xarxa global, són clares les avantatges d'utilitzar la xarxa local d'observatoris, especialment per valors moderats de K .

La figura 3.11 il·lustra una altra qüestió, la xarxa presenta un mal comportament tant per K baixes, $K \leq 1$, i per $K \geq 5$, per tant hem d'ajustar els llindars. Totes les xarxes produeixen molt pocs valors de $K_n=0$. Suposem que la xarxa converteix un nombre significant de $K_n=0$ a $K_n=1$. Hem detectat aquest problema durant tota la sèrie de tests realitzats. Assumim que es pot tractar d'un problema sistemàtic de valors frontera. La xarxa ens dona un valor enter entre 0 i 9, però si no apliquem aquesta condició hi ha una gran quantitat de casos en que el valor de la K_n està entre 0.5 i 0.7. Si agafem els valors $K_n < 0.7$ com els valors de $K=0$ podem ajustar molt millor els resultats. Totes les figures i resultats que mostrarem a continuació s'han obtingut sota aquest criteri. Respecte la frontera per sobre, els valors $K=9$, la xarxa no arriba a donar cap valor $K_n=9$, així que tenim un altre problema però de diferent origen, la xarxa aprèn a partir de casos però en tres anys de dades només el 0.6% dels casos estan entre $K=7$ i $K=9$, en aquestes condicions es comprensible que li sigui difícil donar un valor extrem, ja que hi ha pocs casos per fer un bon entrenament.

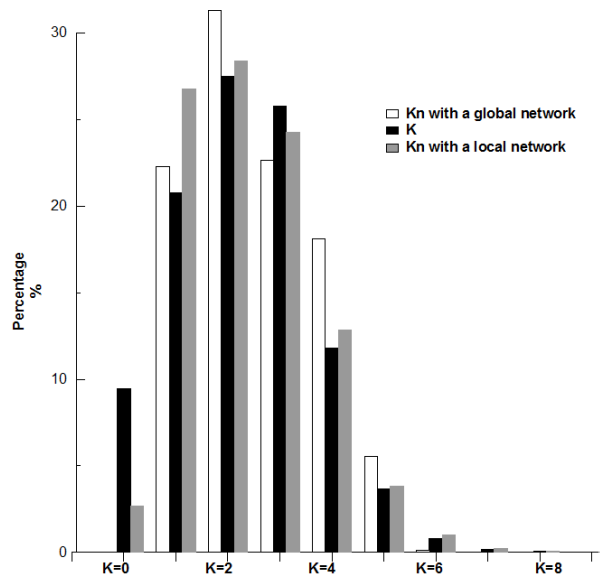


Figura 3.11. Comparació de les distribucions en freqüència dels valors de K_p amb una xarxa global d'observatoris, barra en color blanc, o amb una xarxa local d'observatoris, barra de color gris. En negre la distribució real de valors de K a l'estació geomagnètica de Livingston.

3.3.5. Resultats

Amb la xarxa neuronal que hem seleccionat, una xarxa de tres capes amb 20, 10 i 1 neurona per capa respectivament i entrenant la xarxa amb les dades locals, a la figura 3.12 presentem les diferències per cada classe entre K_p , les K proporcionades per la xarxa, i l'índex K real per l'estació de Livingston. En un sentit estricte, un èxit serà quan la diferència entre la K_p i la K és 0. Tanmateix, per determinar si els resultats són correctes podem agafar un marge d'error de ± 1 , ja que hi ha una certa incertesa alhora de determinar l'índex K de forma manual, principalment pel problema de l'extracció de la variació diürna. Una diferència de dos unitats s'ha de considerar problemàtica, i en cas d'una diferència de 3 unitats el resultat és inacceptable.

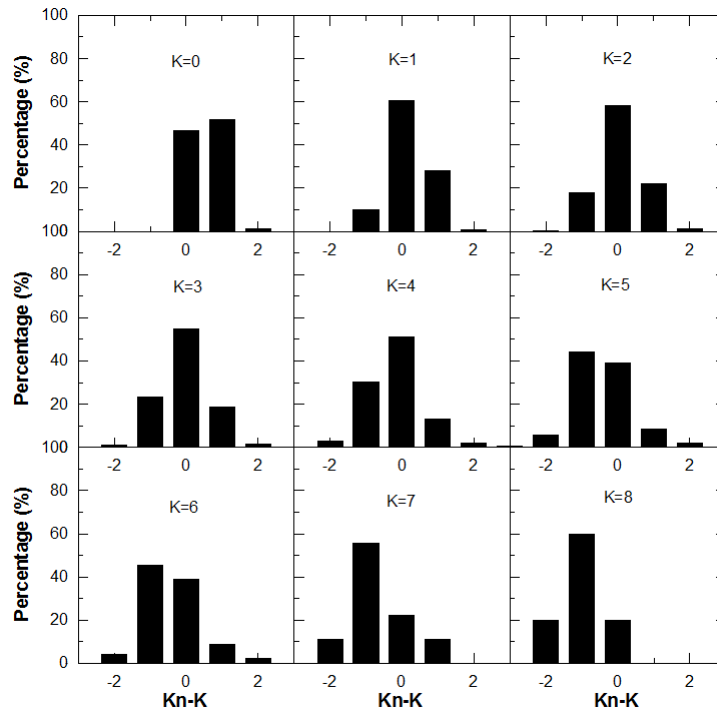


Figura 3.12. Histogrames per cada classe de l'índex K per les diferències entre K_n i el K real a l'estació geomagnètica de Livingston.

Per veure clarament els avantatges d'usar les K_n enlloc d'usar directament les K_p en el cas de no disposar les K , a la figura 3.13 presentem la distribució en freqüència entre K_n i K_p , aquí veiem que per a valors baixos de K la distribució de K_p s'ajusta millor a la de K real que la de les K_n . Però per K moderades o altes, les situacions més interessants des del punt de vista de l'*Space Weather*, la distribució de les K_n s'ajusta molt millor que la de les K_p si les comparem amb la distribució real de K . Per tant, com es mostra a la figura 3.13, la distribució de K_n és millor que agafar directament K_p , en el cas de no disposar de la K .

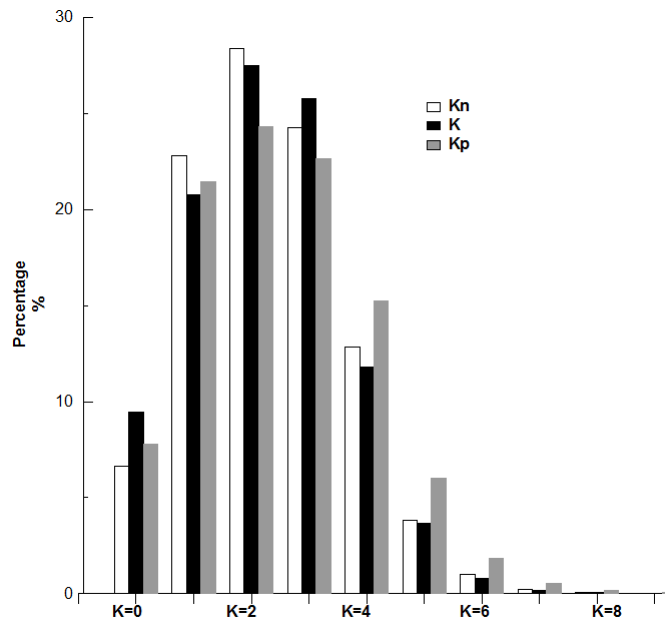


Figura 3.13. Comparació de les distribucions en freqüència dels valors de Kn, barra en color blanc, Kp, barra de color gris. En negre la distribució real de valors de K a l'estació geomagnètica de Livingston.

En base a les desviacions entre les amplituds en les distribucions en freqüència, és a dir, el mateix criteri que va fer servir Bartels per establir el límit $K=9$ per cada observatori i la seva escala logarítmica [Bartels *et al.*, 1939], podem comparar les diferències entre ambdues distribucions. Si agafem l'índex K_p com l'índex K local, la diferència és el 3% per les $K=1$, l'11% per $K=2$, i les diferències s'incrementen per valors més alts de K (un 29% per $K=4$ i un 65% per $K=5$). En canvi, si agafem K_n com a índex K local, les diferències són més grans per K baixes (9.5% per $K=1$), però per valors més grans que $K=2$ les diferències disminueixen i es mantenen constants al voltant del 5% entre $K=2$ i $K=5$.

Fins ara aquest mètode ha estat aplicat pel cas de Livingston i és obvi que en condicions pertorbades del camp magnètic les K_n són una millor opció que les K_p en el cas de no disposar les K reals. En aquest punt, val la pena comprovar si la mateixa xarxa es pot aplicar a altres observatoris de la mateixa zona, l'hemisferi sud. No podem agafar un altre observatori per fer el test directament ja que aquest ha estat inclòs durant l'entrenament de la xarxa, per tant, hem d'eliminar les dades de l'observatori en qüestió de la base de dades d'entrenament, tornar a entrenar la xarxa i fer servir l'observatori en qüestió

com a test. A la figura 3.14 presentem les distribucions en freqüència de 4 observatoris, Eyrewell (EYR), Gnamara (GNA), Martin de Vives-Amsterdam Island (AMS) i Trelew (TRW). La xarxa respon suficientment bé per tots 4 observatoris. Podem concloure que per la zona de latituds mitges a l'hemisferi sud és millor agafar les K_n calculades amb la xarxa que directament les K_p en el cas de no disposar de les K reals, especialment en condicions d'activitat magnètica moderada o alta.

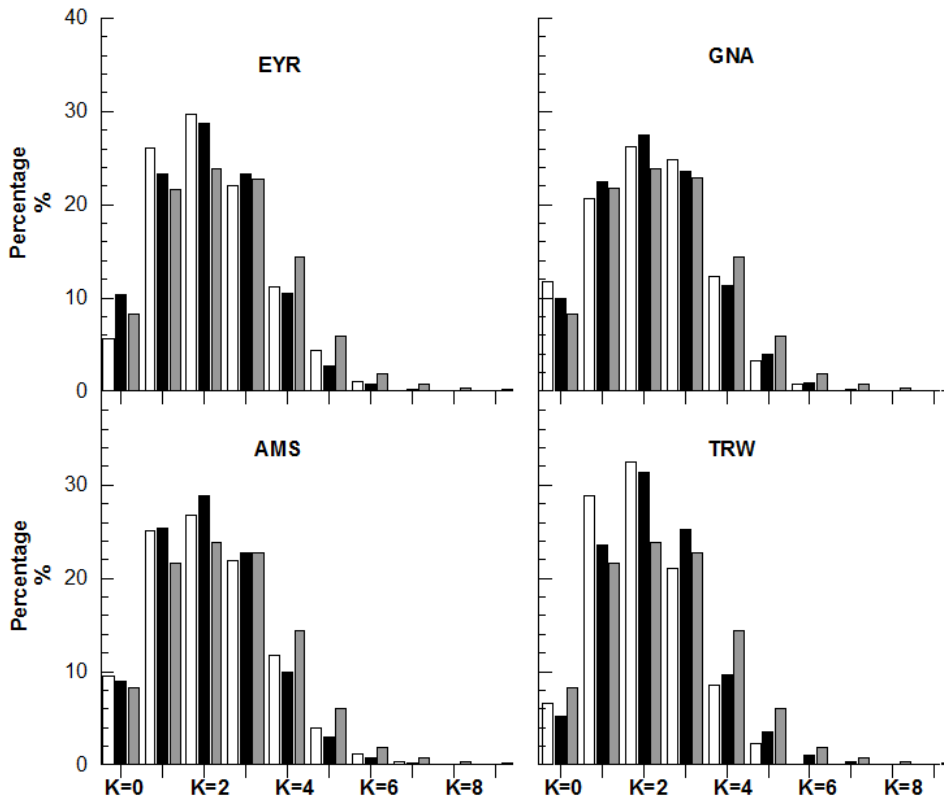


Figura 3.14. Comparació de les distribucions en freqüència per 4 observatoris de l'hemisferi sud. La barra de color blanc correspon a K_n , en negre la distribució K real, i en gris la distribució de K_p .

3.4. Detecció automàtica de SC

Acabem de veure la utilitat de les xarxes neuronals en el camp dels índexs magnètics. És l'hora d'afrontar la detecció automàtica de SCs, el principal objectiu d'aquesta tesi. Cal recordar que l'Observatori de l'Ebre és el responsable d'elaborar les llistes de SCs seguint les regles morfològiques descrites per Mayaud [Mayaud, 1973]. Avui en dia aquesta tasca es fa de forma manual i presenta algunes dificultats, la més preocupant és el descens d'observatoris col·laboradors amb el servei. La necessitat d'un mètode automàtic és ja una urgència. Presentem un mètode basat en les xarxes neuronals. Per tenir èxit hem fet un treball previ de caracterització i parametrització dels SCs. Ens hem centrat en la determinació dels paràmetres apropiats per ser utilitzats com a entrades (*inputs*) de la xarxa. Un criteri que diferencia aquest mètode d'altres intents és el manteniment de la coherència amb les llistes tradicionals manuals.

Els SCs són fenòmens estudiats des de fa molt anys. L'any 1973, Mayaud va introduir canvis en la definició i en la identificació del fenomen. De fet, la definició per ell proposada encara s'utilitza avui en dia: "començaments abruptes seguits d'una tempesta magnètica o per un increment de l'activitat almenys durant una hora" [Mayaud, 1973]. Segons aquesta definició és més important el canvi de ritme de l'activitat magnètica que l'amplitud de la tempesta magnètica, i, de fet, hi ha força SCs inclosos a les llistes que no són seguits d'una tempesta magnètica. Malauradament aquest canvi de ritme no ha estat definit mai, més aviat es tracta d'una instrucció per als observadors de fer servir la seva perícia per detectar canvis en l'activitat magnètica.

Tradicionalment, diferents observatoris envien candidats a esdevenir SC a l'Observatori de l'Ebre. A partir d'aquests candidats, l'OE compara les dades del vent solar amb les dades magnètiques de cinc observatoris de baixa latitud (Alibag, Honolulu, Kanoya, M'Bour i San Juan) i finalment elabora les llistes definitives. Aquesta tasca presenta algunes dificultats com la subjectiva interpretació de les regles morfològiques de Mayaud per part dels cada cop menys nombrosos observadors col·laboradors. Després de l'Assemblea de la

IAGA de Sopron (Hongria), l'any 2009, tenint en compte alguns treballs previs com [Joselyn, 1985] i [Curto *et al.*, 2007], es va establir un criteri més objectiu per seleccionar els esdeveniments a considerar SCs: aquests han de tenir un pendent puntual de com a mínim 3nT/min almenys en 3 dels 5 observatori de baixa latitud. Aquest criteri va ser testejat per a que les llistes amb el nou criteri siguin coherents amb les llistes anteriors. La figura 3.15 mostra un exemple d'un candidat a SC rebutjat per no complir aquest criteri, concretament aquest candidat va ser rebutjat ja que els pendents en els cinc observatoris de baixa latitud eren: ABG 2.7nT/min; HON 2.4 nT/min; KNY 3.3 nT/min; MBO 3.3 nT/min; SJG 1.6 nT/min. Cal destacar que tot i la quantificació del criteri, encara ara no resulta una feina gaire fàcil el fer el judici ja que "falsos" SC realment poden presentar una morfologia molt pareguda als "vertaders" SCs.

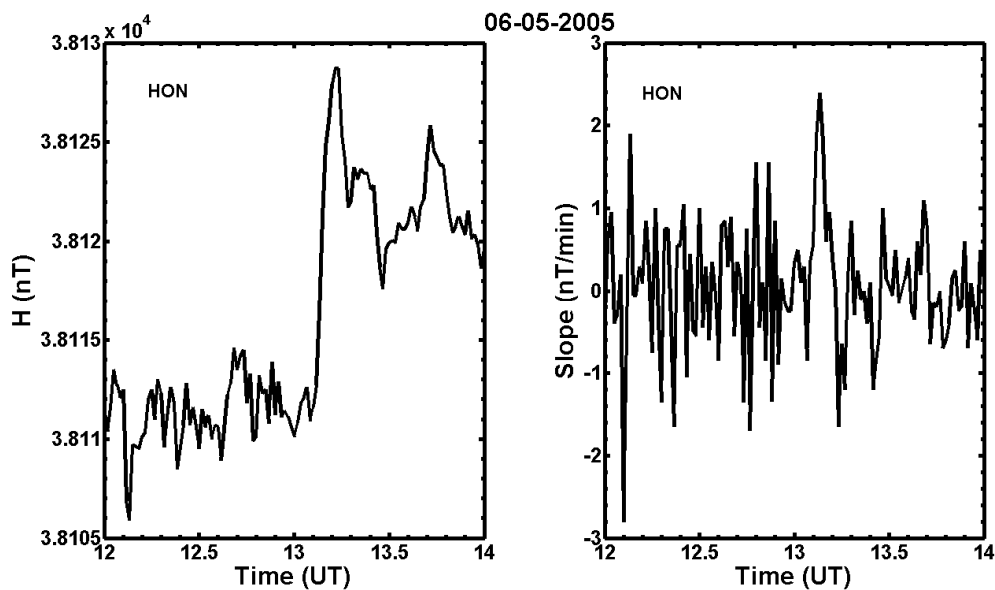


Figura 3.15. Exemple d'un candidat a SC rebutjat perquè només en dos dels cinc observatoris de baixa latitud presenta un pendent major de 3 nT/min.

Hi ha més autors interessats en la detecció automàtica de SCs [per exemple, Takano *et al.*, 1999; Shinohara *et al.*, 2005 o Hafez and Ghamry, 2011]. En general, aquests autors només usen un subconjunt d'esdeveniments molt remarcables i exclouen de la seva base de dades els SCs amb una amplitud petita i centren els seus mètodes de detecció en l'amplitud i el temps d'inici. Nosaltres ens hem plantejat un problema més realista, sense excloure cap esdeveniment, tenint en compte l'estat del camp magnètic abans i després

del començament sobtat, i amb l'objectiu molt important de mantenir coherència amb les antigues llistes.

Proposem un mètode de detecció de SC basat en l'anàlisi automàtic del camp magnètic. Utilitzem una xarxa neuronal per al procés automàtic ja que les xarxes neuronals poden reconèixer patrons ocults dintre de complexes bases de dades i, a més, les xarxes aprenen en base de diferents casos, amb l'experiència, el que representa una oportunitat d'incorporar tot el coneixement acumulat sobre el fenomen en el procés de detecció.

3.4.1. Selecció de candidats a esdevenir SC

Les xarxes neuronals amb diferents arquitectures han estat provades per resoldre problemes complexos en el camp del geomagnetisme o del *Space Weather* [per exemple Lundstedt, 1991; Lundstedt *and* Wintoft 1994; Calvo *et al.*, 1995]. Això es degut a que les xarxes neuronals tenen la capacitat d'aprendre dels casos i poden afrontar problemes difícils que no es poden resoldre amb algorismes matemàtics. Les dades que farem servir per entrenar la nostra xarxa són dades d'un minut de resolució dels anys 2000 al 2007. En una primera aproximació farem servir només les dades de l'Observatori de l'Ebre, i en una segona aproximació utilitzarem les dades dels 5 observatoris de baixa latitud (Alibag, Honolulu, Kanoya, M'Bour i San Juan) obtingudes de la xarxa d'observatoris INTERMAGNET, la taula 3.2 mostra les seves coordenades geogràfiques i geomagnètiques, a més de la institució que els hi dona suport. El fet de fer una primera aproximació del problema només amb dades d'Ebre rau en la necessitat de conèixer les possibilitats de ser autosuficients per un possible servei en temps real i davant la possibilitat de la falta de dades d'altres observatoris.

Codi IAGA	Latitud Geogràfica (°)	Longitud Geogràfica (°)	Latitud Geomagnètica (°)	Longitud Geomagnètica (°)	Organització
Alibag (ABG)	18.63	72.87	10.37	146.55	<i>Indian Institute of Geomagnetism</i>
Ebro (EBR)	40.82	0.49	43.06	81.49	Observatori de l'Ebre
Honolulu (HON)	21.32	202.00	21.71	270.27	<i>United States Geological Survey</i>
Kanoya (KNY)	31.42	130.88	22.17	201.19	<i>Japan Meteorological Agency</i>
M'Bour (MBO)	14.38	343.03	19.90	57.83	<i>Institut de Recherche pour le Développement</i>
San Juan (SJG)	18.11	293.85	28.04	6.54	<i>United States Geological Survey</i>

Taula 3.2. Coordenades geogràfiques i geomagnètiques dels observatoris utilitzats en aquest mètode. A més, les institucions que els hi donen suport.

Metodològicament parlant, adoptarem un procés en dues etapes. Primer entrenarem la xarxa i després la posarem en fase operativa de detecció. Per a la fase d'entrenament necessitem una base de dades amb un acurat nombre d'esdeveniments, si el nombre d'esdeveniments és massa petit, potser que la base de dades no sigui prou representativa de totes les solucions del problema, i si el nombre d'esdeveniments és massa gran, la xarxa potser que acabi presentant alguna mena de biaix [Hagan *et al.*, 1996].

Primerament, per preparar la base de dades per a l'entrenament, necessitem buscar en les dades magnètiques possibles candidats a esdevenir SC, per això fem una parametrització de les principals característiques dels SCs i busquem els criteris per seleccionar els candidats. Per tant, necessitem una col·lecció de característiques dels esdeveniments i els possibles valors llindars d'aquestes característiques per decidir els esdeveniments que poden

esdevenir SC, o sigui buscar candidats. Amb aquesta intenció hem analitzat les principals característiques dels SCs: l'amplitud, el canvi de ritme i el pendent. Els SCs són fenòmens globals però presenten una gran variabilitat morfològica depenent de la latitud i l'hora local de l'observatori. Hem calculat l'amplitud, el canvi de ritme i el pendent dels 188 SCs de la llista oficial que han estat enregistrats a l'Observatori de l'Ebre durant aquest període, figura 3.16. Enlloc de l'amplitud hem treballat amb el canvi de nivell per evitar algunes incerteses com els possibles impulsos preliminars inversos (PRI). El canvi de nivell ha estat calculat amb la diferència del camp magnètic abans i després de l'hora d'inici del SC, fent una mitjana 10 minuts abans i després de l'SC. El canvi de ritme ha estat calculat amb la diferència de la desviació estàndard de la derivada del camp magnètic abans i després del SC, fent una mitjana de 60 minuts abans i després. Observades les dades, no es veuen valors llindars clars pel que fa al canvi de ritme ni de nivell, per tant ens fixarem amb el pendent. Si agaféssim com a valor llindar el valor dels observatoris de latitud baixa, 3 nT/min, exclouríem de la selecció de candidats un 13% dels esdeveniments. Com l'amplitud decreix amb la latitud, per estacions de latitud mitja com Ebre, és raonable agafar com a valor llindar 2 nT/min. Amb aquest valor, només excloem de la selecció de candidats un 1.6% dels casos. Si agafem un valor llindar més baix el nombre de candidats puja exponencialment i el posterior procés d'entrenament no es viable ja que el nombre de casos significatius és molt petit dintre de tot el conjunt de dades que s'introdueixen a la xarxa. Amb el valor llindar de 2 nT/min per al pendent seleccionem els candidats a esdevenir SC, la quantitat de candidats és de 586, aquí estan inclosos 185 del total de 188 que figuren a les llistes oficials. La figura 3.17 mostra un exemple de 3 candidats inclosos en aquesta selecció, el primer candidat és un SC clar, i els altres dos candidats no ho són ja que es troben dintre d'un període de tempesta magnètica.

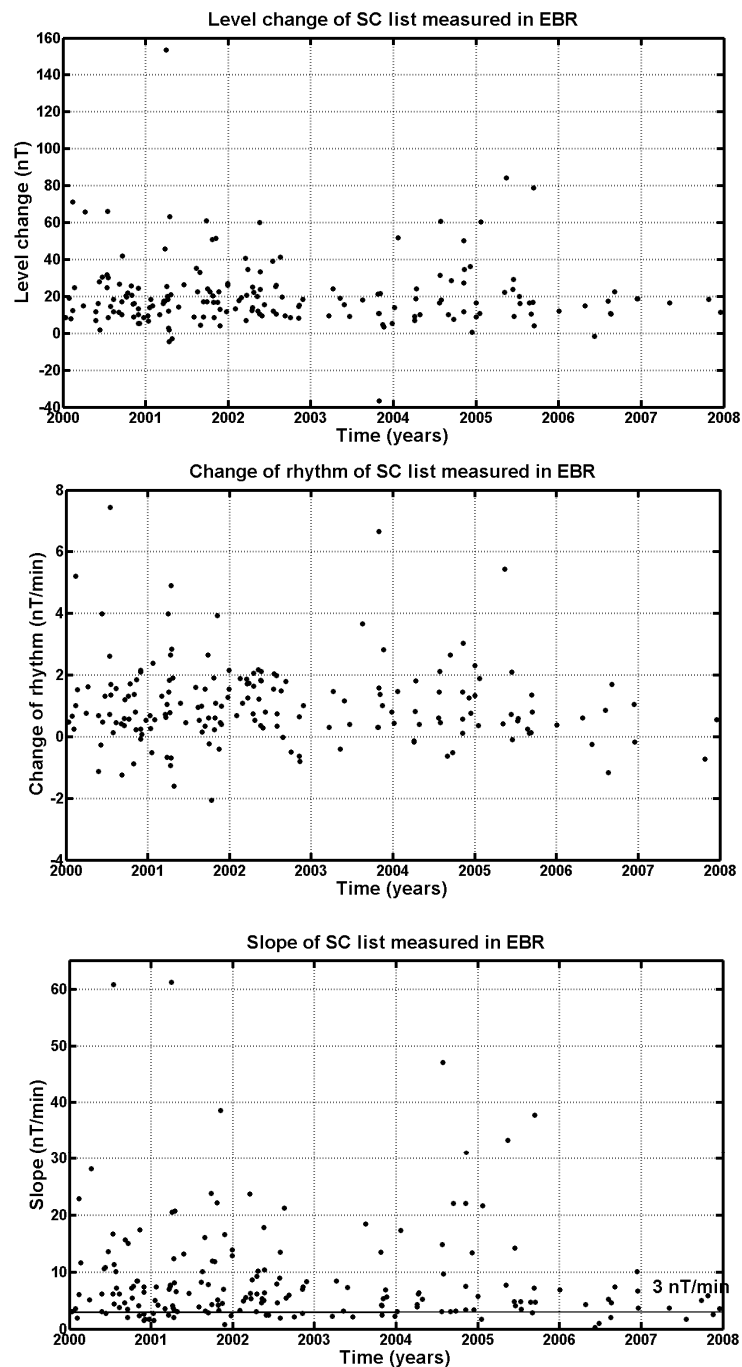


Figura 3.16. El panell superior mostra el canvi de nivell dels SC enregistrats a Ebre. El panell intermedi mostra el canvi de ritme dels SC enregistrats a Ebre. En el panell inferior es mostra el pendent dels SC enregistrats a Ebre. Amb un línia negra mostrem el valor llindar de 3nT/min, recomanat per estacions de baixa latitud, com Ebre és una estació de latitud mitja si agaféssim aquest valor exclouríem un 13% dels casos.

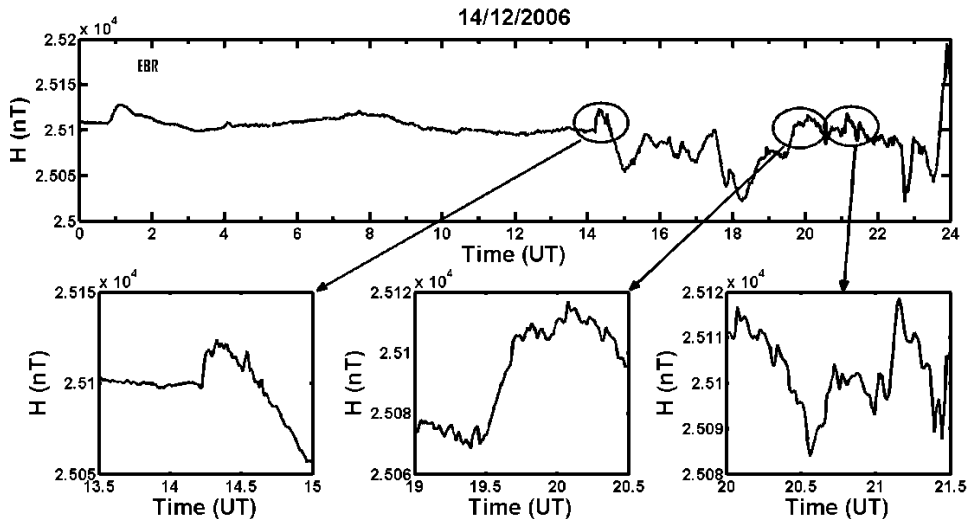


Figura 3.17. Exemple de tres casos seleccionats com a candidats sota el criteri d'agafar els esdeveniments que superin en valor llindar del pendent superior a 2nT/min.

Respecte a la xarxa neuronal, hi ha una multitud de diferents arquitectures de xarxes neuronals. Hem fet servir una xarxa *feed-forward back-propagation* ja que aquests tipus de xarxes són capaces de reconèixer patrons ocults en una base de dades complexa [Hertz *et al.*, 1991; Caudill *and* Butler, 1992]. L'algoritme d'entrenament està modificat segons la cerca del gradient descendent anomenat *back-propagation* [Rumelhart *et al.*, 1986; Vogl *et al.*, 1988; Hagan *et al.*, 1996].

L'arquitectura de la xarxa ha estat obtinguda en base d'entrenar i validar la xarxa de manera repetida fins trobar la millor arquitectura. Hem fet servir dues bases de dades, una amb dades de l'any 2000, usada per validar la xarxa, i l'altra amb dades del període 2001-2007 usada per entrenar la xarxa. Cal diferenciar entre el període 2000-2002 amb una gran ocurrència de SCs i l'altre entre 2003 i 2007 amb una ocurrència de SCs molt baixa. Després d'una sèrie extensa de tests amb diferents arquitectures, la xarxa amb un error més baix de la sortida respecte del *target* ha estat triada com la xarxa òptima, aquesta té una estructura de tres capes, una capa d'entrada, una capa oculta i una capa de sortida, amb 5, 10 i 2 neurones en cada capa, respectivament.

3.4.2. Entrenant la xarxa

Quan entrenem la xarxa, el que busquem són els pesos que minimitzen l'error de la sortida respecte del *target*. L'entrenament es fa de forma iterativa mostrant a la xarxa parells de *inputs* i *outputs* coneguts, i en conseqüència calculant l'error i modificant els pesos. Respecte als parells de *inputs* i *outputs*, com a *inputs* hem fet servir la parametrització dels SCs, la data, el pendent, el canvi de nivell en els components X i Y (els dos en nT) i el canvi de ritme; com a *output* hem fet servir un dígit de valor "1" si realment es tracta d'un SC de la llista oficial, o un "0" si el candidat no està a les llistes. La figura 3.18 mostra un representació esquemàtica de la xarxa. Després de l'entrenament, per validar la capacitat de la xarxa, li entrem a la xarxa només els *inputs* d'una base de dades que ha estat exclosa de la fase d'entrenament. Llavors, comparem la resposta de la xarxa (l'*output*) amb la llista oficial.

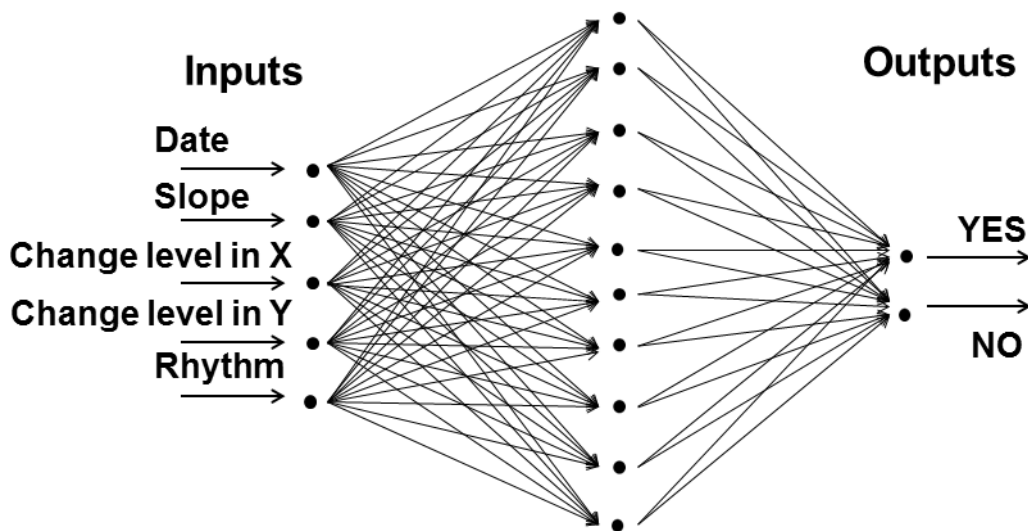


Figura 3.18. Representació esquemàtica de la xarxa utilitzada. Com a entrada de la xarxa o *inputs*, la data, el pendent, el canvi de nivell en els components X i Y, i el canvi de ritme de cada candidat. Com a sortida o *outputs* utilitzem un dígit "1" o "0" si el candidat és realment un SC o no ho és respectivament.

3.4.3. Resultats

Un cop acabat l'entrenament, ens centrem en la fase operativa de la xarxa. Presentem els resultats del test de validació. Utilitzant només les dades de l'Observatori de l'Ebre de l'any 2000 com a test, després de la fase de selecció de candidats vàrem obtenir 139 candidats a ser SC. Per aquest període, d'acord amb les llistes oficials, només 41 d'aquests eren realment SC. Amb el mètode automàtic basat en una xarxa neuronal vàrem obtenir els següents resultats: 35 esdeveniments van ser detectats correctament, 6 esdeveniments no van ser detectats, i 14 van ser falsos positius [Segarra *and* Curto, 2013]. A la figura 3.19 comparem les dues llistes, el nombre de casos en la llista obtinguda amb el mètode tradicional apareix com una àrea de color rosa pàl·lid i la llista produïda amb el nou mètode, amb la xarxa neuronal, apareix representada per una àrea marcada de color lila, cal mencionar que les àrees dels rectangles són proporcionals als percentatges que els hi corresponen en cada cas.

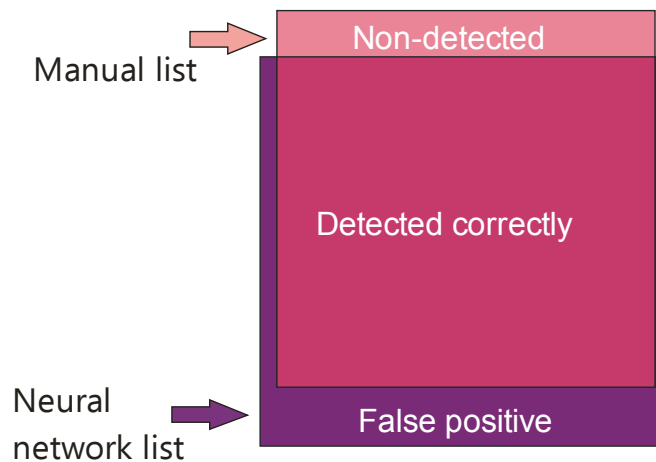


Figura 3.19. Comparació entre la llista manual, àrea de color rosa pàl·lid, i la llista obtinguda amb la xarxa neuronal, àrea de color lila. Resultats utilitzant només les dades de l'Observatori de l'Ebre [Segarra *and* Curto, 2013].

La figura 3.20 mostra un exemple de fals positiu i la figura 3.21 un exemple de cas no detectat. L'alt nombre de casos detectats correctament es remarcable si tenim en compte que només hem fet servir dades d'un observatori, i que aquest està localitzat en una regió de latitud mitja. Per altra banda, estem interessats en crear un mètode automàtic per detectar SCs però

amb la important condició que aquest mètode mantingui la coherència amb el nombre de casos detectats amb el mètode tradicional o manual, d'acord amb les normes de Mayaud. Treballant amb dades de només un observatori, l'Ebre, tenim el benefici de controlar tot el procés d'adquisició de dades i la seva disponibilitat en temps real, però el sistema de detecció presenta un nombre de falsos positius que fa que no sigui adequat per mantenir la coherència amb les llistes antigues.

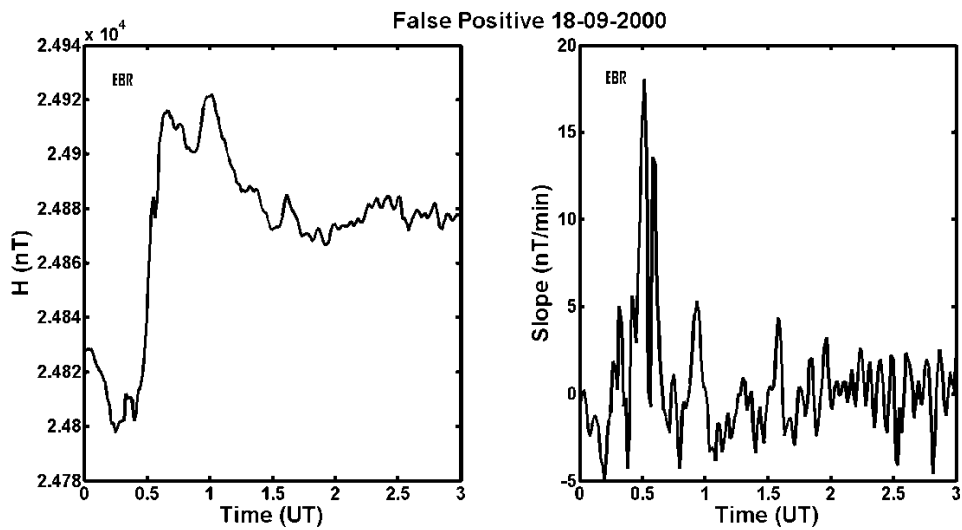


Figura 3.20. Exemple d'un cas de fals positiu. A l'Ebre presenta un pendent força marcat, però en els observatoris de baixa latitud el pendent és inferior a 3 nT/min.

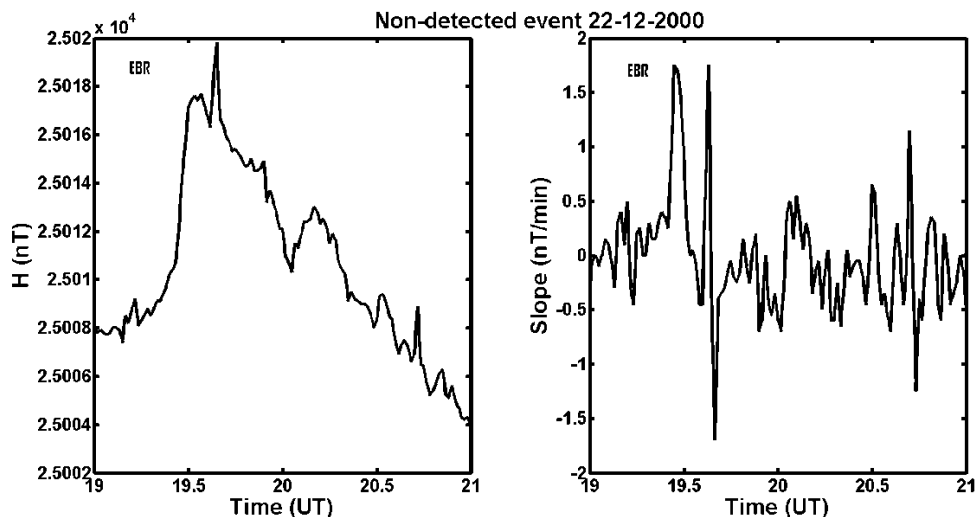


Figura 3.21. Exemple d'un cas no detectat. Aquest cas figura a la llista obtinguda amb el mètode tradicional, però a l'Ebre mostra un pendent molt petit.

Per superar aquest inconvenient i gràcies a les facilitats de la xarxa d'observatoris INTERMAGNET podem agafar dades de cinc observatoris de baixa latitud, Alibag, Honolulu, Kanoya, M'Bour i San Juan, on els SCs presenten unes característiques més clares, com són que la forma d'ona s'assembla més a una funció esglaó i on rarament apareixen impulsos preliminars en sentit contrari [Araki, 1994]. Amb l'arquitectura de la xarxa descrita a la secció 3.4.1, repetim tot el procés amb una nova base de dades: selecció de candidats, entrenant la xarxa una altra cop, i finalment fent el test de validació del mètode. La selecció de candidats es fa per cada observatori, d'aquesta manera tenim una base de dades de candidats diferent per a cada observatori. Com el més important de tot el mètode és la fase d'entrenament, s'entrena una xarxa per cada observatori, per tant al final es tenen 5 xarxes, amb la mateixa arquitectura però cadascuna entrenada amb dades d'un observatori diferent de baixa latitud. En aquest punt imposem un altre criteri, la simultaneïtat de l'esdeveniment almenys en 3 dels 5 observatoris de baixa latitud. Amb aquestes condicions, ara la xarxa obté un major èxit, com era d'esperar. Ara la xarxa presenta 38 casos detectats correctament, 3 casos no detectats i només 5 falsos positius [Segarra *and* Curto, 2013]. Els resultats es mostren a la figura 3.22, comparant el nou mètode amb el tradicional, les àrees dels rectangles són proporcionals als corresponents percentatges.

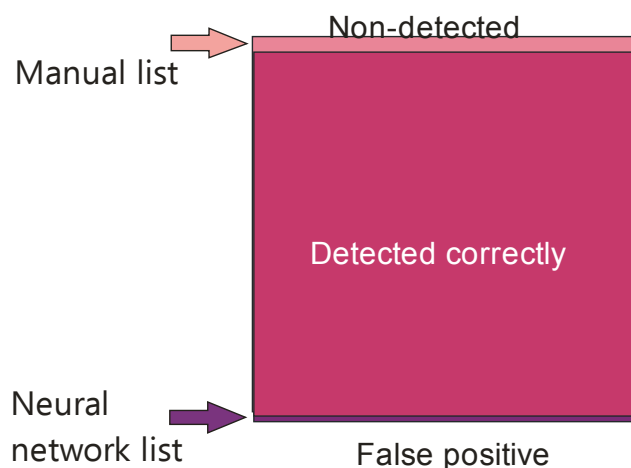


Figura 3.22. Comparació entre la llista manual, àrea de color rosa pàl·lid, i la llista obtinguda amb la xarxa neuronal, àrea de color lila. Resultats obtinguts amb les dades dels cinc observatoris de baixa latitud, ABG, HON, KNY, MBO i SJG [Segarra *and* Curto, 2013].

Aquest nou mètode obté resultats satisfactoris fins i tot utilitzant dades de pocs observatoris. Però, si treballem amb suficients observatoris, podem assegurar que la llista produïda amb la xarxa és totalment coherent amb les llistes tradicionals. Aquesta és una de les condicions que validen la capacitat de la xarxa per solucionar adequadament el nostre problema. Podríem esperar que el major nombre de falsos positius aparegueren durant una tempesta magnètica, però la xarxa es capaç de rebutjar aquests casos, això es degut a que una de les variables és el canvi de ritme. Volem remarcar que el canvi de ritme és fonamental per fer una acurada classificació de SC.

El nombre de casos detectats correctament utilitzant dades de només un observatori de latitud mitja, EBR, indica que la xarxa neuronal és capaç de reconèixer les característiques dels SCs fins i tot quan se l'alimenta amb poques dades i, a més, rebutjar fenòmens d'aparença similar als SCs. En canvi, el nombre de falsos positius utilitzant només dades d'EBR no és apropiat per al nostre objectiu: crear llistes exhaustives d'esdeveniments, i en conseqüència necessitem afegir dades d'altres observatoris, de fet això ja passa quan s'elaboren les llistes de forma manual.

Per suposat, la xarxa neuronal treballa millor quan la forma del SC s'assembla més a una funció esglaó i té una amplitud gran. Però, en casos de baixa amplitud i un llarg temps de pujada, treballant de forma manual costa força decidir si es classifica com a SC o no, i s'ha de demanar dades a altres observatoris i fins i tot utilitzar dades de satèl·lits.

Capítol 4. Conclusions

L'objectiu d'aquesta tesi és la detecció automàtica de començaments abruptes de tempestes magnètiques (*Sudden Commencements*, SC). Per assolir aquest objectiu hem començat el treball situant el fenomen d'estudi, els SCs, dintre del marc general del geomagnetisme. Un cop establert el marc general, ens hem centrat en la morfologia dels SCs i en la història del seu estudi per així entendre les dificultats que representa el coneixement del fenomen i l'evolució tant de la nomenclatura com de la seva definició. En aquest punt, hem introduït el model físic de Araki [Araki, 1994], que dona una explicació de la morfologia dels SCs i hem estudiat a fons un cas particular, des de l'increment de la pressió del vent solar fins als registres dels observatoris terrestres. Ja per encarar la detecció automàtica, ens hem centrat en l'estat actual del procés de l'elaboració de les llistes i en "l'estat de l'art" de les xarxes neuronals, l'eina que hem utilitzat en la detecció. A efecte de valorar la idoneïtat de les xarxes neuronals per resoldre problemes en camp del geomagnetisme, les hem aplicat per un problema concret: obtenir índexs d'activitat magnètica locals a partir d'índexs globals. Finalment hem presentat el mètode automàtic que hem desenvolupat per a la detecció de SCs.

Hem estudiat en profunditat un cas concret amb multitud de diferents dades observacionals, aportant així una visió complerta d'un SC, des de l'augment de la pressió dinàmica del vent solar, i de la seva arribada a la magnetosfera fins els seus efectes observats a terra. Gràcies a les posicions d'alguns satèl·lits hem pogut observar en detall el pas del front d'ona a través de la *magnetosheath* i la magnetopausa i com aquestes parts de la magnetosfera reaccionen a la compressió. La superposició de diferents contribucions magnetosfèriques i ionosfèriques fa que la manifestació del SC a terra sigui molt més complexa que en l'òrbita geosincrònica. En el cas estudiat, els fets observacionals són consistents amb el model d'Araki [Araki, 1994].

L'eina que hem utilitzat per a la detecció automàtica són les xarxes neuronals, per la seva capacitat d'aprenentatge. Com a exemple, més simple, d'aplicació de les xarxes neuronals a una tasca concreta dintre de l'àmbit del geomagnetisme, hem desenvolupat una xarxa capaç de calcular índexs d'activitat magnètica local en zones remotes poc cobertes per observatoris. L'índex K és un dels indicadors de l'activitat magnètica més populars. El nostre mètode, basat en les xarxes neuronals, ajusta millor la distribució en freqüència dels valors de l'índex K que en el cas de no disposar d'aquestes dades i utilitzar directament les Kp, especialment amb condicions d'activitat moderada o alta. Hem demostrat la validesa del mètode pel cas del registre de Livingston, situat a una zona remota com l'Antàrtica, però a més, també hem mostrat que el mètode és vàlid per altres zones de l'hemisferi sud, on és de més interès degut a l'escassetat d'observatoris magnètics i es poden modelar alguns efectes de l'*Space Weather* a partir d'índexs d'activitat magnètica [per exemple, Pietrella, 2012; Pietrella *and* Perrone, 2008; Zolesi *and* Cander, 1998].

Com a part fonamental d'aquesta tesi, hem desenvolupat un mètode capaç de detectar els SCs de forma automàtica, ràpida, sistemàtica i essent coherent amb el mètode manual. Aquest nou mètode obté resultats satisfactoris fins i tot utilitzant dades de pocs observatoris. Però, si treballem amb suficients observatoris, podem assegurar que la llista produïda amb la xarxa és totalment coherent amb les llistes tradicionals. Aquesta és una de les condicions que validen la capacitat de la xarxa per solucionar adequadament el nostre

problema. Utilitzant aquest nou mètode podem elaborar llistes de SCs molt més ràpidament que amb l'anterior mètode. En aquest sentit es poden subministrar les llistes als usuaris sense gaire retard. Els SCs i també les llistes de SCs són utilitzades per ells mateixos com un dels fenòmens més interessants per als investigadors de *Space Weather*.

Podríem esperar que el major nombre de falsos positius aparegueren durant una tempesta magnètica, ja que durant una tempesta sovint hi ha fortes pujades que es podrien confondre morfològicament amb un SC, però la xarxa es capaç de rebutjar aquests casos, això es degut a que una de les variables és el canvi de ritme. D'aquesta manera, dintre d'una tempesta no hi ha gaire canvi de ritme abans o després d'un succés concret. En canvi, en el cas d'un SC el que succeeix és que abans del SC el camp magnètic normalment està força tranquil, mentre que després del SC el camp està molt agitat. Volem remarcar que el canvi de ritme és fonamental per fer una acurada classificació de SC.

El nombre de casos detectats correctament utilitzant dades de només un observatori de latitud mitja, EBR, indica que la xarxa neuronal és capaç de reconèixer les característiques dels SCs i a més rebutjar fenòmens d'aparença similar als SCs. En canvi, el nombre de falsos positius utilitzant només dades de EBR no és apropiat per a l'elaboració de les llistes, ja que introduiríem una gran quantitat de casos que no serien SCs i en conseqüència necessitem afegir dades d'altres observatoris, de fet això ja passa quan s'elaboren les llistes de forma manual.

Per suposat, la xarxa neuronal treballa millor quan la forma del SC s'assembla més a una funció esglaió i té una amplitud gran. En els casos de SCs amb baixa amplitud i un llarg temps de pujada, la xarxa neuronal té més dificultats, igual que als observadors quan treballen de forma manual on els hi costa força decidir si es classifica com a SC o no, i s'ha de demanar dades a altres observatoris i fins i tot utilitzar dades de satèl·lits.

Amb aquest treball hem mostrat la utilitat de les xarxes neuronals per detectar SCs. Gairebé obtenim una completa detecció quan utilitzem dades dels cinc observatoris de baixa latitud i imposem la condició de simultaneïtat. Però fins i tot utilitzant dades de només un observatori el nombre d'esdeveniments detectats és acceptable, no així els falsos positius. A diferència d'altres intents de detecció automàtica dels SCs [per exemple, Takano *et al.*, 1999; Shinohara *et al.*, 2005; Ali and Ghamry, 2011; Ghamry *et al.*, 2013], hem treballat en la base de dades sencera dels SCs, no només en casos paradigmàtics. S'ha tingut molta cura de no introduir un nombre excessiu de falsos positius en les llistes, a tal efecte que la llista generada amb el mètode manual i la generada per la xarxa siguin coherents respecte al nombre i la qualitat dels casos.

Amb aquests resultats donem per aconseguit el principal objectiu d'aquesta tesi, la detecció automàtica de SCs. A més a més, pel camí hem aconseguit altres objectius secundaris tot i que igualment remarcables. L'estudi del cas particular ha estat fonamental per entendre tota la complexitat del fenomen SC, fet sense el qual no s'hagués pogut afrontar la seva detecció. El mètode per avaluar l'activitat magnètica, amb els índexs magnètics, amb les xarxes neuronals va ser clau per entendre les complexitats pràctiques de treballar amb les xarxes neuronals, especialment pel que fa al seu entrenament i la importància de triar bases de dades significatives.

Capítol 5. Propostes de futur

Des del punt de vista d'estudi dels SCs pròpiament dit, ens plantegem aprofundir en un futur en dos aspectes: en els SCs inversos per un costat i en com afecta l'orientació del front d'ona al pendent dels SCs, per l'altre. En aquest treball hem parlat de que la font dels SCs és l'augment sobtat de la pressió del vent solar o una discontinuïtat en el flux de partícules del vent solar, però a la pràctica sempre hem considerat només el xoc com a causa dels SCs. Hi ha una sèrie de casos on la discontinuïtat que s'observa al vent solar no és un augment sobtat de la pressió dinàmica sinó un descens igualment sobtat. En aquests casos, el que s'observa a terra és un descens abrupte del camp magnètic, com si fos un SC invers. En principi aquests esdeveniments segueixen les mateixes regles descrites pel model d'Araki, però hi ha aspectes com els PRIs o els PPIs que generen certa controvèrsia, ja que al haver-hi molts pocs casos, estan poc estudiats.

També ens plantegem estudiar de forma més acurada com afecta l'orientació del xoc interplanetari al temps de pujada dels SCs. El nostre interès rau en el fet que els SCs són una de les variacions magnètiques que més afecten a la generació de corrents induïts al terra. Això és així perquè un dels factors que més afecta en la generació de corrents induïts és la rapidesa en la variació del camp magnètic, i en el cas dels SCs es tracta d'una ràpida variació

que pot tenir una amplitud important, que són les característiques constituents dels SCs, per tant pot generar corrents induïts. Com ja s'ha demostrat [Torta *et al.*, 2014], fins i tot en latituds mitges una forta variació del camp magnètic pot generar un fort corrent induït potencialment perillós des del punt de vista de l'*Space Weather*. Si a partir dels satèl·lits situats al punt de Lagrange L1 som capaços de calcular l'orientació del front de xoc del vent solar, podríem fer una predicció a curt termini de com seria el SC al terra i així valorar la possibilitat de que aquesta variació produeixi corrents induïts.

Des d'un punt de vista més pràctic, ens plantegem millorar les dues xarxes neuronals emprades en aquesta tesi, la que utilitzem per a la conversió d'índexs globals a índexs locals i la que utilitzem per a la detecció automàtica dels SCs. Per millorar la xarxa neuronal emprada en la conversió d'índexs globals a locals, la xarxa pot ser millorada essent entrenada amb molts més casos de K altes (K=8 i K=9) gràcies als anys de més alta activitat magnètica. Una altra millora potser l'introduir una nova variable com a *input* -com per exemple el nombre ordinal de l'any dintre del cicle solar o el número de Wolf-, que ens permetria relacionar el valor dels índexs amb la fase del cicle solar.

Com una futura millora del mètode de detecció dels SCs ens plantegem treballar amb mostreig de dades 1 segon enlloc de les dades minut gràcies a que, seguint les recomanacions d'INTERMAGNET, molts observatoris han passat a enregistrar el camp magnètic cada segon. Les dades un segon permetran millorar la precisió en el temps d'inici i, a més a més, fer un seguiment més acurat de les estructures fines dels esdeveniments, com poden ser la simultaneïtat tant de l'inici com dels PRIs o PPIs.

També, en un futur voldríem millorar el mètode de detecció per a que sigui capaç de treballar en temps quasi real i de manera més robusta. Ens plantegem introduir noves variables com a *input*, tals com la pressió del vent solar o algun índex magnètic com el SYM-H, depenent de la seva disponibilitat. Això ens permetria que, condicions adverses com la falta d'algunes dades, afectés el menys possible al funcionament de la xarxa. Aquest producte es podria sumar als que ja ara s'ofereixen en centres de monitorització i predicció en *Space Weather*.

Annex. Sobre les xarxes neuronals

A continuació detallarem la característica que fa més interessant les xarxes neuronals: la seva capacitat d'aprenentatge. Aquesta capacitat és la que ens ha decidit per usar-les com eina bàsica del nostre mètode.

La norma delta constitueix el fonament sobre el que es basa la capacitat d'aprenentatge de les xarxes [Demuth *and* Beale, 1994; Kröse *and* Van der Smagt, 1996]. Per una xarxa amb només una capa i una funció d'activació lineal, la sortida simplement és:

$$a = \sum_j w_j p_j + b \quad (\text{A.1})$$

Si el que volem és que la xarxa ens doni una sortida determinada d^l (el superíndex l ens indicarà que estem en la fase d'aprenentatge, fa referència a tot el conjunt de dades *input* i *output* utilitzat per entrenar la xarxa), per saber el que ens apropem a aquest objectiu farem servir una funció d'error basada en les diferències entre la sortida de la xarxa i la sortida desitjada (A.2), per després poder ajustar els pesos.

$$E = \sum_p E^l = \frac{1}{2} \sum_p (d^l - a^l)^2 \quad (\text{A.2})$$

El procediment LMS busca els valors de tots els pesos que minimitzen la funció d'error, amb un mètode que s'anomena de gradient descendent [Rumelhart *et al.*, 1986]. La idea es fer variar els pesos de manera proporcional a la derivada negativa de l'error, així per cada pes es té:

$$\Delta_l w_j = -\gamma \frac{\partial E^l}{\partial w_j} \quad (\text{A.3})$$

on γ és una constant de proporcionalitat. Amb la regla de la cadena la derivada ens queda:

$$\frac{\partial E^l}{\partial w_j} = \frac{\partial E^l}{\partial a^l} \frac{\partial a^l}{\partial w_j} \quad (\text{A.4})$$

Com estem treballant en neurones lineals d'(A.1), i amb la funció d'error E (A.2):

$$\frac{\partial a^l}{\partial w_j} = p_j \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{\partial E^l}{\partial a^l} = -(d^l - a^l) \quad (\text{A.6})$$

Llavors substituïnt a (A.3):

$$\Delta_l w_j = \gamma \delta^l p_j \quad (\text{A.7})$$

on $\delta^l = d^l - a^l$ és la diferència entre la sortida desitjada i l'actual.

Les xarxes *back-propagation* treballen en una generalització de la norma delta, però ara no tenim només una capa i la funció d'activació no té per que ser lineal. En general la funció d'activació és una funció diferenciable respecte l'*input* total, donada per:

$$a_k^l = f(p_k^l) \quad (\text{A.8})$$

$$p_k^l = \sum_j w_{jk} a_j^l + b_k \quad (\text{A.9})$$

La mesura de l'error la definim com l'error quadràtic total pel patró l (el conjunt d'input output que ens serveix per entrenar la xarxa) a la neurona de sortida.

$$E^l = \frac{1}{2} \sum_{o=1}^{N_o} (d_o^l - a_o^l)^2 \quad (\text{A.10})$$

on d_o^l és l'*output* desitjat per la neurona o . A partir d'ara agafem $E = \sum_p E^l$ com

la suma quadràtica de l'error. Podem escriure:

$$\frac{\partial E^l}{\partial w_{jk}} = \frac{\partial E^l}{\partial p_k^l} \frac{\partial p_k^l}{\partial w_{jk}} \quad (\text{A.11})$$

Fent servir l'equació (A.9) tenim:

$$\frac{\partial p_k^l}{\partial w_{jk}} = a_j^l \quad (\text{A.12})$$

Ara definim:

$$\delta_k^l = -\frac{\partial E^l}{\partial p_k^l} \quad (\text{A.13})$$

Els pesos han de variar segons el gradient descendent de l'error d'acord amb:

$$\Delta_l w_{jk} = \gamma \delta_k^l a_j^l \quad (\text{A.14})$$

L'interessant d'aquest mètode és que el càlcul de les δ_k^l és una simple computació recursiva propagant cap enrere per la xarxa el senyal de l'error.

Per calcular δ_k^l apliquem la regla de la cadena per escriure la derivada parcial com a producte de dos termes, un que reflecteixi el canvi de l'error en funció de la sortida de la neurona i l'altre terme que reflecteixi el canvi en la sortida en funció del canvi en l'entrada. Així:

$$\delta_k^l = -\frac{\partial E^l}{\partial p_k^l} = -\frac{\partial E^l}{\partial a_k^l} \frac{\partial a_k^l}{\partial p_k^l} \quad (\text{A.15})$$

Primer calculem el segon terme de A.15, a partir de $a_k^l = f(p_k^l)$ podem veure que:

$$\frac{\partial a_k^l}{\partial p_k^l} = f'(p_k^l) \quad (\text{A.16})$$

que és simplement la derivada de la funció f per la neurona k avaluada en l'*input* de la xarxa p_k^l . Per calcular el primer factor de A.15 considerem dos casos. El primer, assumim que la neurona k és una neurona de la capa de sortida de la xarxa, $k=o$. En aquest cas podem trobar directament de la definició de la funció d'error (A.10):

$$\frac{\partial E^l}{\partial a_o^l} = -(d_o^l - a_o^l) \quad (\text{A.17})$$

Que és el mateix resultat que en el cas de només una capa i funció d'activació lineal. Ajuntant els dos termes (A.16 i A.17) tenim:

$$\delta_o^l = (d_o^l - a_o^l) f_o'(p_o^l) \quad (\text{A.18})$$

per cada neurona *output* o . En el segon cas la neurona no és de sortida, es troba a la capa oculta, $k=h$. No podem saber directament quina és la contribució de la neurona a l'error de l'*output*. El que fem es escriure l'error mesurat en funció de les entrades provinents de la capa oculta cap a la capa de sortida, $E^l = E^l(p_1^l, p_2^l, \dots, p_j^l, \dots)$ i amb la regla de la cadena podem escriure:

$$\frac{\partial E^l}{\partial a_h^l} = \sum_{o=1}^{N_o} \frac{\partial E^l}{\partial p_o^l} \frac{\partial p_o^l}{\partial a_h^l} = \sum_{o=1}^{N_o} \frac{\partial E^l}{\partial p_o^l} \frac{\partial}{\partial a_h^l} \sum_{j=1}^{N_h} w_{ko} a_j^l = \sum_{o=1}^{N_o} \frac{\partial E^l}{\partial p_o^l} w_{ho} = -\sum_{o=1}^{N_o} \delta_o^l w_{ho} \quad (\text{A.19})$$

Que ajuntant els dos termes (A.16 i A.19) queda:

$$\delta_h^l = f'(p_h^l) \sum_{o=1}^{N_o} \delta_o^l w_{ho} \quad (\text{A.20})$$

Les equacions (A.18) i (A.20) ens donen el procediment recursiu que hem d'utilitzar per calcular les δ per totes les neurones de la xarxa, que llavors amb l'equació (A.14) s'utilitza per calcular els canvis en els pesos.

Treballar amb la generalització de la regla delta implica dues fases, en la primera l'*input* \mathbf{p} es presenta i es propaga per la xarxa fins calcular el valor de l'*output* a_o^l per cada neurona de sortida. Aquest *output* es compara amb el valor desitjat d_o , del que en resulta un senyal de l'error δ_o^l per cada neurona de sortida. La segona fase implica una propagació cap enrere en la xarxa on el senyal de l'error passa per cada neurona i es calcula els canvis que s'han de fer en els pesos.

Aquest procés és general, el que pot canviar són els paràmetres, per exemple la funció d'activació. Si agafem com a funció d'activació el sigmoide, una de les funcions més utilitzades, tindrem:

$$a^l = \Psi(p^l) = \frac{1}{1 + e^{-p^l}} \quad (\text{A.21})$$

llavors la derivada:

$$f'(p^l) = \frac{\partial}{\partial p^l} \frac{1}{1 + e^{-p^l}} = \frac{1}{(1 + e^{-p^l})^2} (e^{-p^l}) = \frac{1}{1 + e^{-p^l}} \frac{e^{-p^l}}{1 + e^{-p^l}} = a^l(1 - a^l) \quad (\text{A.22})$$

Llavors el senyal de l'error es pot escriure com:

$$\delta_o^l = (d_o^l - a_o^l) a_o^l (1 - a_o^l) \quad (\text{A.23})$$

L'error per una neurona de la capa oculta, si fem servir una funció sigmoide, es pot calcular de manera recursiva, a partir del senyal de l'error de les neurones a les que està connectada i els pesos de les seves connexions, al final ens queda:

$$\delta_h^l = f'(p_h^l) \sum_{o=1}^{N_o} \delta_o^l w_{ho} = a_h^l (1 - a_h^l) \sum_{o=1}^{N_o} \delta_o^l w_{ho} \quad (\text{A.24})$$

Si en lloc de tenir una funció sigmoide en tenim una altra, es faria el mateix procediment.

Una important millora de la tècnica general del gradient descendent és el que s'anomena minimització de gradient conjugat [Rojas, 1996]. Consisteix en una modificació de la tècnica general en que el gradient descendent es canvia per un gradient descendent seguint una direcció. La minimització en una direcció \mathbf{u} obliga al gradient d'una funció f a ser perpendicular a la direcció \mathbf{u} . Enlloc de seguir el gradient a cada pas, es construeix un conjunt de direccions conjugades les unes amb les altres, de manera que la minimització en una direcció \mathbf{u}_j no altera la minimització en una altra direcció \mathbf{u}_i , és a dir, no estan interferint les direccions. Així una minimització en la direcció \mathbf{u}_i és suficient, tal que n minimitzacions en un sistema de n graus de llibertat porten el sistema a un mínim.

Si la funció que hem de minimitzar l'aproximem per una sèrie de Taylor:

$$f(\vec{x}) = f(\vec{p}) + \sum_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \Big|_{\vec{p}} x_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \Big|_{\vec{p}} x_i x_j + \dots \approx \frac{1}{2} \vec{x}^T A \vec{x} - \vec{b}^T \vec{x} + c \quad (\text{A.25})$$

on T indica transposat, i $c \equiv f(\vec{p})$, $\vec{b} \equiv -\nabla f|_{\vec{p}}$ i $[A]_{ij} \equiv \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \Big|_{\vec{p}}$

A és una matriu simètrica i definida positiva, la Hessiana de f en \mathbf{p} . El gradient de f el podem escriure com $\nabla f = A\vec{x} - \vec{b}$, com varia en \mathbf{x} , el canvi en el gradient serà $\delta(\nabla f) = A(\delta\vec{x})$.

Ara suposem que f ha estat minimitzada en una direcció \mathbf{u}_i en un punt en que el gradient $-\mathbf{g}_{i+1}$ de f és perpendicular a \mathbf{u}_i , és a dir, $\vec{u}_i^T \vec{g}_{i+1} = 0$. Per estar segurs de que si ens movem sobre \mathbf{u}_{i+1} no fem malbé la minimització al llarg de \mathbf{u}_i necessitem que el gradient de f continuï perpendicular a \mathbf{u}_i , $\vec{u}_i^T \vec{g}_{i+2} = 0$

$$0 = \vec{u}_i^T (\vec{g}_{i+1} - \vec{g}_{i+2}) = \vec{u}_i^T \delta(\nabla f) = \vec{u}_i^T A \vec{u}_{i+1} \quad (\text{A.26})$$

Si es compleix pels vectors \mathbf{u}_i i \mathbf{u}_{i+1} diem que els dos vectors estan conjugats.

Si comencem en algun punt p_0 , la primera minimització en la direcció u_0 l'agafem tal que $\bar{g}_0 = -\nabla f(\bar{p}_0)$, el que resulta en un nou punt p_1 . Per $i \geq 0$, calculem les direccions de la següent manera:

$$\bar{u}_{i+1} = \bar{g}_{i+1} + \gamma_i \bar{u}_i \quad (\text{A.27})$$

on γ_i s'agafa de manera que $\bar{u}_i^T A \bar{u}_{i-1} = 0$ i els successius gradients perpendiculars.

$$\gamma_i = \frac{\bar{g}_{i+1}^T \bar{g}_{i+1}}{\bar{g}_i^T \bar{g}_i} \quad \text{amb } \bar{g}_k = -\nabla f|_{p_k} \quad \text{per tot } k \geq 0 \quad (\text{A.29})$$

Es pot demostrar que totes les direccions així construïdes són conjugades.

En aquest annex hem presentat de manera simple els fonaments de les xarxes neuronals pel que fa a la seva capacitat d'aprenentatge. Com s'ha comentat anteriorment, en el que respecta a l'aplicació pràctica de les xarxes neuronals hem utilitzat les biblioteques existents d'un llenguatge popular com el MATLAB. Més que una dificultat tècnica de programació, la dificultat de treballar en les xarxes neuronals fa referència a la tria dels paràmetres físics del problema a resoldre, trobar les bases de dades adequades que siguin significatives del problema, trobar el disseny de l'arquitectura de la xarxa que sigui capaç de resoldre el problema i trobar el mètode adequat d'entrenament.

Referències

Adams, W. G., Comparison of simultaneous magnetic disturbances at several observatories, *Phil. Trans. London, A*, 183, 131-140, 1892.

Akasofu, S. I. and S. Chapman, The sudden commencements of geomagnetic storms, *URANIA*, v. 44, 250, 321-358, 1959.

Araki, T. and H. Ishizaki, Characteristics of SC* in the low latitude region, *AGA Bulletin no 34*, 138, 1973.

Araki, T., Global structure of geomagnetic sudden commencements, *Planetary and Space Science*, 25, 373-384, 1977.

Araki, T., A physical model of the geomagnetic sudden commencement, *Geophysical Monograph*, 81, 183-200, 1994.

Araki, T., T. Takeuchi and Y. Araki, Rise time of geomagnetic sudden commencement—Statistical analysis of ground geomagnetic data, *Earth Planets Space*, 56, 289-293, 2004.

Araki, T., K. Keika, T. Kamei, H. Yang and M. Alex, Nighttime enhancement of the amplitude of geomagnetic sudden commencements and its dependence on IMF-Bz, *Earth Planets Space*, 58, 45-50, 2006.

Auster, H.U., K. H. Glassmeier, W. Magnes, O. Aydogar, W. Baumjohann, D. Constantinescu, D. Fischer, K. H. Fornacon, E. Georgescu, P. Harvey, O. Hillenmaier, R. Kroth, M. Ludlam, Y. Narita, R. Nakamura, K. Okrafka, F. Plaschke, I. Richter, H. Schwarlz, B. Stoll, A. Valavanoglou and M. Wiedemann, The THEMIS fluxgate magnetometer, *Space Sci. Rev.*, 141, 235-264, doi:10.1007/s11214-008-9365-9, 2009.

Balogh, A., M. W. Dunlop, S. W. H. Cowley, D. J. Southwood, J. G. Thomlinson, K. H. Glassmeier, G. Musmann, H. Luhr, S. Buchert, M. H. Acuna, D. H. Fairfield, J. A. Slavin, W. Riedler, K. Schwingenschuh and M. G. Kivelson, The Cluster magnetic field investigation, *Space Sci. Rev.*, 79, 65–92, 1997

Banerji, S. K., Magnetic, meteorological and seismographic observations made at the government observatories, Bombay and Alibag in the year 1922, *Calcutta: Central Publication Branch*, 1926.

Bartels J., N. H. Heck and H. F. Johnston, The three-hour-range index measuring geomagnetic activity, *Terr. Magn. Atmos. Elec.*, 44, 455, 1939.

Bartels J., The standardized index, Ks, and the planetary index, Kp, *IATME Bull.* 12b, 97, IUGG Pub. Office, Paris, 1949.

Bauer, L. A., Transactions of Rome Assembly, May, 1922, *Section of Terrestrial Magnetism and Electricity*, Bulletin n°3, 170, 1923.

Belian, R. D., G. R. Gisler, T. Cayton and R. Christensen, High-z energetic particles at geostationary orbit during the great solar proton event series of October 1989, *J. Geophys. Res.*, 97, 16897, 1992.

Blanch, E., S. Marsal, A. Segarra, J. M. Torta, D. Altadill and J. J. Curto, Space Weather effects on Earth's environment associated to the 24-25 October 2011 geomagnetic storm, *Space Weather*, 11, 1–16, doi:10.1029/2012SW000879, 2013.

Brown, R. R., Sudden commencement and sudden impulse absorption events at high latitudes, *J. Geophys. Res.*, 78, 5698-5702, 1973.

Burlaga, L. F. and K. W. Ogivile, Causes of sudden commencements and sudden impulses, *J. Geophys. Res.*, 74, 2815, 1969.

Burlaga, L. F., Discontinuities and shock waves in the interplanetary medium and their interaction with the magnetosphere, *Solar Terrestrial Physics, Part II*, 135-158, 1970.

Calvo, R. A., H. A. Ceccatto and R. D. Piacentini, Neural network prediction of solar activity, *The Astrophysical Journal*, 444:916-921, 1995.

Campbell, W.H., Introduction to Geomagnetic Fields, *2nd ed.*, Cambridge: Cambridge University Press, 352 pp., 2003.

Carpenter, D. L. and R. R. Anderson, An ISEE/whistler model of equatorial electron-density in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 97, 1097-1108, doi:10.1097/91JA01549, 1992.

Caudill, M. and C. Butler, Understanding Neural Networks: Computer Explorations, Vols. 1 and 2, Cambridge, MA: The MIT Press, 1992.

Chapman, S., On the times of sudden commencements of magnetic storms, *Proc. Phys. Soc.*, 30, 205-214, 1918.

Chapman, S. and V. C. A. Ferraro, A new theory of magnetic storms, *Terr. Mag.*, 36, 77-97, 171-186, 1931.

Chapman, S. and V. C. A. Ferraro, A new theory of magnetic storms, *Terr. Mag.*, 37, 147-156, 421-429, 1932.

Chapman, S. and V. C. A. Ferraro, A new theory of magnetic storms, *Terr. Mag.*, 38, 79-96, 1933.

Chapman, S. and J. Bartels, *Geomagnetism*, Oxford and the Clarendon Press, Oxford, 1962.

Chree, C., Sudden Commencements (S.C.s) of magnetic storms: observation and theory, *Proc. Phys. Soc.*, 38, 35-46, 1925.

Colburn, D. S. and C. P. Sonett, Discontinuities in the solar wind, *Space Sci. Rev.*, 5, 439, 1966.

Curto, J. J., and E. Blanch, SSC detection, *Proceedings IV Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, Figueira da Foz, 455-456, 2004.

Curto, J. J., T. Araki and L. F. Alberca, Evolution of the concept of sudden commencements and their operative identification, *Earth Planets and Space*, v. 59, 11, i-xii, 2007.

Demuth H. and M. Beale, *Neural Network Toolbox for use with MATLAB*. The Mathworks, Inc, Natick, MA, 1994.

Dessler, A. J. and E. N. Parker, Hydromagnetic theory of geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 64, 2239-2252, 1959.

Dessler, A. J., W. E. Francis and E. N. Parker, Geomagnetic storm sudden commencement rise times, *J. Geophys. Res.*, 65, 2715-2719, 1960.

Ellis, W., On the simultaneity of magnetic variations at different places on occasions of magnetic disturbance, and on the relations between magnetic and earth current phenomena, *Proc. Roy. Soc.*, 102, 191, 1892.

Ferraro, V. C. A. and H. W. Unthank, Sudden commencements and sudden impulses in geomagnetism: their diurnal variation in amplitude, *Geofísica pure appl.*, 20, 2730, 1951.

Ferraro, V. C. A., W. C. Parkinson and H. W. Unthank, Sudden commencements and sudden impulses in geomagnetism, Cheltenham, Tucson, San Juan, Honolulu, Huancayo and Watheroo, *J. Geophys. Res.*, 56, 177-195, 1951.

Fornells A., Marc integrador de les capacitats de Soft-Computing i de Knowledge Discovery dels Mapes Autoorganitzatius en el Raonament Basat en Casos. Tesi Doctoral URL, 2007.

Frank, L. A., K. L. Ackerson, W. R. Paterson, J. A. Lee, M. R. English and G. L. Pickett, The Comprehensive Plasma Instrumentation (CPI) for the Geotail spacecraft, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 46, 23-37, 1994.

Gerard, V. B., The propagation of world-wide sudden commencements of magnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 64, 593-596, 1959.

Ghamry, E., A. G. Hafez, K. Yumoto and H. Yayama, Effect of SC on frequency content of geomagnetic data using DWT application: SC automatic detection, *Earth Planets Space*, 65, 1007-1015, 2013.

Gold, T., Gas dynamics of cosmic clouds, ed. by H. C. van de Hulst and J. M. Burgers, *North-Holland Publ. Co.*, Amsterdam, 103, 1955.

Hagan, M. T., H. B. Demuth and M. H. Beale, *Neural Network Design*, Boston, MA: PWS Publishing, 1996.

Haykin, S., *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, 2nd ed., *Englewood Cliffs*, NJ: Prentice-Hall, 1999.

Hafez, A.G. and E. Ghamry, Automatic detection of geomagnetic sudden commencements via time-frequency clusters, *Advances in Space Research*, 48, 1537-1544, 2011.

Hertz, J. A., A. Krogh and R. G. Palmer, Introduction to the Theory of Neural Computation, lecture notes vol. 1, Santa Fe Institute Studies in the science of complexity, 327 pp., Addison-Wesley, Redwood City, CA 94065, 1991.

Hines, C. O., On the geomagnetic storm effect, *J. Geophys. Res.*, 62, 491-492, 1957.

Howe, H., An unusual magnetic disturbance, *Terr. Mag. and Atmos. Elec.*, 44, 339-340, 1939.

Iyemori, T. and S. Tsunomura, Characteristics of the association between an SC and a substorm onset, *Memoirs of National Institute of Polar Research*, 26, 139-147, 1983.

Iyemori, T., Storm-time magnetospheric currents inferred from mid-latitude geomagnetic field variations, *J. Geomag. Geoelec.*, 42, 1249-1265, 1990.

Joselyn, J. A., The automatic detection of geomagnetic-storm sudden commencements, *Adv. Space Res.*, 5(4), 193-197, 1985.

Joselyn, J. A. and B. T. Tsurutani, Geomagnetic sudden impulses and storm sudden commencements. A note on terminology, *EOS*, 20, 1808-1809, 1990.

Keika, K., R. Nakamura, W. Baumjohann, V. Angelopoulos, P.J. Chi, K.H. Glassmeier, M. Fillingim, W. Magnes, H.U. Auster, K.H. Fornacon, G.D. Reeves, K. Yumoto, E.A. Lucek, C.M. Carr and I. Dandouras, Substorm expansion triggered by a sudden impulse front propagating from the dayside magnetopause, *Journal of Geophysical Research*, vol. 114, A00C24, 10.1029/2008JA013445, 2009.

Kikuchi, T. and T. Araki, Transient response of uniform ionosphere and preliminary reverse impulse of geomagnetic storm sudden commencement, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 41, 917-925, 1979.

Kokubun, S., R. L. McPherron and C. T. Russell, Triggering of substorms by solar wind discontinuities, *J. Geophys. Res.*, 82, 74-86, 1977.

Kokubun, S., Characteristics of storm sudden commencement at geostationary orbit, *J. Geophys. Res.*, 88, 10025-10033, 1983.

Kokubun, S., T. Yamamoto, M. H. Acuña, K. Hayashi, K. Shiokawa and H. Kawano, The Geotail magnetic-field experiment, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 46, 7-21, 1994.

Kröse B. and P. Van der Smagt, An introduction to Neural Networks. University of Amsterdam, Amsterdam, 1996.

Langel, R. A., International Geomagnetic Reference Field: The sixth generation, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 44, 679-707, 1992.

Lanzerotti, L. J., Space Weather Effects on Technologies, in Space Weather (Ed. P. Song, H. J. Singer and G. L. Siscoe), American Geophysical Union, Washington, D. C.. doi: 10.1029/GM125p0011, 2013.

Lepping, R. P., M. H. Acuña, L. F. Burlaga, W. M. Farrell, J. A. Slavin, K. H. Schatten, F. Mariani, N. F. Ness, F. M. Neubauer, Y. C. Whang, J. B. Byrnes, R. S. Kennon, P. V. Panetta, J. Scheifele and E. M. Worley, The Wind magnetic field investigation, *Space Sci. Rev.*, 71, 207-299, doi:10.1007/BF00751330, 1995.

Lin, R. P., K. A. Anderson, S. Ashford, C. Carlson, D. Curtis, R. Ergun, D. Larson, J. McFadden, M. McCarthy, G. K. Parks, H. Rème, J. M. Bosqued, J. Coutelier, F. Cotin, C. D'Uston, K. P. Wenzel, T. R. Sanderson, J. Henrion, J. C. Ronnet and G. Paschmann, A three-dimensional plasma and energetic particle

investigation for the Wind spacecraft, *Space Sci. Rev.*, 71, 125-153, doi:10.1007/BF00751328, 1995.

Lühr, H., The IMAGE Magnetometer Network. *STEP International*, 4, No. 10, 4-6, 1994.

Lundstedt, H., Neural network predictions of geomagnetic activity, in IAGA Programs and Abstracts, XX General Assembly, IUGG, Vienna, 1991.

Lundstedt, H. and P. Wintoft, Prediction of geomagnetic storms from solar wind data with the use of a neural network, *Ann. Geophys.*, 12, 19-24, 1994.

Lyons, L. R., D. Y. Lee, C. P. Wang and S. B. Mende, Global auroral responses to abrupt solar wind change; Dynamic pressure, substorm, and all null events, *J. Geophys. Res.*, 110, A08208, doi:10.1029/2005JA011089, 2005.

Maeda, H., K. Sakurai, T. Ondoh and M. Yamamoto, Solar terrestrial relationships during the IGY and IGC, *Ann. Geophysique*, 18, 305-333, 1962.

Marsal S., J. M. Torta, L. Gaya-Piqué, J. J. Curto, E. Sanclement, J. G. Solé, D. Altadill, A. Ugalde, A. De Santis, E. M. Apostolov, L. F. Alberca and A. García, Observaciones geomagnéticas de la isla Livingston, Antártida 2003 y campaña 2003-2004, 2004.

Marsal S., J. M. Torta, L. Gaya-Piqué, J. J. Curto, E. Sanclement, J. G. Solé, D. Altadill, A. Ugalde, A. De Santis, E. M. Apostolov, L. F. Alberca and A. García, Observaciones geomagnéticas de la isla Livingston, Antártida 2004 y campaña 2004-2005, 2005.

Matsushita, S., On sudden commencements of magnetic storms at higher latitudes, *J. Geophys. Res.*, 62(1), 162-166, 1957.

Matsushita, S., Studies on sudden commencements of geomagnetic storms using IGY data from United States stations, *J. Geophys. Res.*, 65, 1423-1435, 1960.

Matsushita, S., On geomagnetic sudden commencements, sudden impulses and storm durations, *J. Geophys. Res.*, 67, 3753-3777, 1962.

Matuura, N., Characteristics of Large Amplitude Geomagnetic Pulsations, *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, 15, 192-214, 1961.

Mayaud P. N., Atlas des indices K, *IAGA Bull.* 21, 113 pp., IUGG Publ. Office, Paris, 1967.

Mayaud, P. N., A hundred year series of geomagnetic data, 1868-1967: indices aa, storm sudden commencements, *IAGA Bulletin no. 33*, IUGG Publ. Office, Paris, 256, 1973.

Mayaud, P. N., Analysis of storm sudden commencements for the years 1868-1967, *J. Geophys. Res.*, 80(1), 111-122, 1975.

Mayaud P. N., Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices, Geophysical monograph 22, *American Geophysical Union*, Washington D.C., 1980.

McComas, D. J., S. J. Bame, B. L. Barraclough, J. R. Donart, R. C. Elphic, J. T. Gosling, M. B. Moldwin, K.R. Moore and M.F. Thomsen, Magnetospheric plasma analyzer: initial three-spacecraft observations from geosynchronous orbit, *J. Geophys. Res.*, 98, 13.453, 1993.

McNish, A. G., Sudden commencements at Watheroo, *Comptes Rendues Assemblée de Lisbonne*, 1933, IATME Bull. 9, 234-238, 1934.

Menvielle M., N. Papitashvili, L. Häkkinen and C. Sucksdorff, Computer production of K indices: review and comparison of methods. *Geophys. J. Int.*, 123, 866-886, 1995.

Moos, N. A. F., Colaba magnetic data, 1846 to 1905, Part II, The phenomenon and its discussion, *Central Government Press.*, Bombay, 1910.

Nagata, T. and S. Abe, Notes on the distribution of SC* in high latitudes, *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, 9, 33-44, 1955.

Nakamura M. I., T. Maruyama and Y. Shidama, Using a neural network to make operational forecasts of ionospheric variations and storms at Kokubunji, Japan, *Earth Planets Space*, 59, 1231-1239, 2007.

Neugebauer, M. and C. W. Snyder, Solar Plasma Experiment, *Science*, 138, 1095, 1962.

Newton, H. W., "Sudden commencements" in the Greenwich magnetic records (1879-1944) and related sunspot data, *Mon. Not. Geophys. Supplem.*, 5, 159-185, 1948.

Nishida, A., Transmission of storm sudden commencements through the interplanetary space: shock wave mode and non-shock mode, *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, 18, 295, 1964.

Nishida, A., Interpretation of SSc rise time, *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, 20, 42-44, 1966.

Nishida, A., N. Iwasaki and T. Nagata, The origins of fluctuations in equatorial electrojet, a new type of geomagnetic variation, *Annales Geophysicae*, 22, 478-484, 1966.

Nishida, A., Geomagnetic diagnosis of the magnetosphere, 1-37, *Springer-Verlag*, New York, 1978.

Olsen, N. and C. Stole, Satellite Geomagnetism, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 40, 441-65. DOI: 10.1146/annurev-Earth-042711-105540, 2012.

Ondoh, T., Longitudinal distribution of SSC rise time, *J. Geomag Geoelectr.*, 14, 198-207, 1963.

Osada, S., Numerical calculation of geomagnetic sudden commencement, *Master Thesis*, Faculty of Science, Kyoto University, March 1992.

Parkinson, W. D., Introduction to Geomagnetism, *Scottish Academy Press*, Edimburgh, 1983.

Piddington, J. H., The transmission of geomagnetic disturbances through the atmosphere and interplanetary space, *Geophys. J.*, 2, 173, 1959.

Pietrella, M., and L. Perrone, A local ionospheric model for forecasting the critical frequency of the F2 layer during disturbed geomagnetic and ionospheric conditions, *Ann. Geophys.*, 26, 323–334, 2008.

Pietrella, M., A short-term ionospheric forecasting empirical regional model (IFERM) to predict the critical frequency of the F2 layer during moderate, disturbed, and very disturbed geomagnetic conditions over the European area, *Ann. Geophys.*, 30, 343–355, doi:10.5194/angeo-30-343-2012, 2012.

Pisharoty, P. R. and B. J. Srivastava, Rise times versus magnitudes through the atmosphere and interplanetary space, *J. Geophys. Res.*, 67, 2189-2192, 1962.

Ramesh, K. B., Coronal mass ejections and sunspots – solar cycle perspective, *The Astrophysical Journal Letters*, 712, 77-80, 2010.

Rastogi, R. G. and N. S. Sastri, Occurrence of SSC(-+) at geomagnetic observatories in India, *J. Geomag. Geoelectr.*, 26(6), 529-537, 1974.

Rodés, L., On the non-simultaneity of magnetic storms, *Terr. Mag. And Atmos. Electr.*, 27(4), 161-166, 1922.

Rodés, L., Período diurno anual y secular en las perturbaciones súbitas, *Terr. Mag.*, 37, 273-277, 1932.

Rodés, L., Report to the President of the Committee on Sudden Commencements. Transactions of the Edinburg Meeting, [Sept.17-24, 1936], *IATME Bull* nº 10. 177-179, 1937.

Rojas, R., Neural Networks – A Systematic Introduction, chapter 7 The backpropagation algorithm, *Springer-Verlag*, Berlin, 1996.

Romañà, A., “Report General” with the Provisional Atlas of Rapid Variations, *Annals of the Int. Geophys. Year*, 2B, 668-709, 1959.

Rumelhart, D. E., G. E. Hinton and R. J. Williams, Learning representation by back-propagating errors, *Nature*, 323, 533-536, 1986.

Russell, C. T., M. Ginskey, S. M. Petrinec and G. Le, The effect of solar wind dynamic pressure changes on low and mid-latitude geomagnetic records, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 1227-1230, 1992.

Russell, C. T. and M. Ginskey, Sudden impulses at low latitudes: transient response, *Geophys. Res. Lett.*, 20, 1015-1018, 1993.

Russell, C. T., M. Ginskey and S. M. Petrinec, Sudden impulses at low latitude stations: Steady state response for southward interplanetary magnetic field, *J. Geophys. Res.*, 99(A7), 13403-13408, 1994.

Segarra, A. and J. J. Curto, Automatic detection of sudden commencements using neural networks, *Earth Planets Space*, vol. 65, 7, 791-797, 2013.

Shinohara, M., T. Kikuchi and K. Nozaki, Automatic realtime detection of sudden commencements of geomagnetic storms, *J. NICT* 52 (3/4), 197-205, 2005.

Shue J. H., P. Song, C. T. Russell, J. T. Steinberg, J. K. Chao, G. Zastenker, O. L. Vaisberg, S. Kokubun, H. J. Singer, T. R. Detman and H. Kawano, Magnetopause location under extreme solar wind conditions, *J. Geophys. Res.*, 103, 17.691-17.700, 1998.

Siscoe, G. L., V. Formisano and A. J. Lazarus, Relation between geomagnetic sudden impulses and solar wind pressure changes – An experimental investigation, *Journal of Geophysical Research*, vol. 73, 15, 1968.

Smith, C. W., J. L'Heureux, N. F. Ness, M. H. Acuña, L. F. Burgala and J. Scheifele, The ACE Magnetic Fields Experiment, *Space Sci. Rev.*, 86, 613-632, doi:10.1023/A:1005092216668, 1998.

Sonett, C. P., D. S. Colburn, L. Davis Jr., E. J. Smith and P. J. Coleman Jr., Evidence for a collision-free magnetohydrodynamic shock in interplanetary space, *Physical Rev. Letts.*, 13, 153-156, 1964.

Sugiura, M., The solar diurnal variation in the amplitude of sudden commencements of magnetic storms at the geomagnetic equator, *J. Geophys. Res.*, 58, 558-559, 1953.

Sugiura, M. and D. J. Poros, Hourly values of equatorial Dst for years 1957 to 1970, Rep. X-645-71-278, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 1971.

Takano, S., T. Minamoto, H. Arimura, K. Nijima, T. Iyemori and T. Araki, Automatic detection of geomagnetic sudden commencements using lifting wavelet filters, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1721. Springer, Berlin, Heidelberg, 1999.

Takeuchi, T., C. T. Russell and T. Araki, Effect of the orientation of interplanetary shock on the geomagnetic sudden commencement, *J. Geophys. Res.*, 107, 1423, 2002.

Tamao, T., Hydromagnetic interpretation of geomagnetic ssc*, *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, 18, 16-31, 1964.

Tanakade, A., Short preliminary report on three sudden commencements of geomagnetic storms, *Comptes Rendues Assemblée de Lisbonne, 1933, UGGI, Assoc. Magnetism Electr. Bull.*, 9, 149-157, 1934.

Torta, J. M, S. Marsal and M. Quintana, Assessing the hazard from geomagnetically induced currents to the entire high-voltage power network in Spain, *Earth, Planets and Space*, DOI: 10.1186/1880-5981-66-87, 2014.

Tsunomura, S. and T. Araki, Numerical analysis of equatorial enhancement of geomagnetic sudden commencement, *Planet. Space Sci.*, 32, 599-604, 1984.

Tsunomura, S., Characteristics of geomagnetic sudden commencement observed in middle and low latitudes, *Earth Planets Space*, 50, 755-772, 1998.

Tsyganenko, N. A., A magnetospheric field model with a warped tail current sheet, *Planet. Space Sci.*, 37, 5-20, 1989.

Udías, A. and J. Mezcua, Fundamentos de Geofísica, *Alianza Editorial*, Madrid, 1997.

Verbanac G, B. Vrsnak, M. Temmer, M. Manda and M. Korte, Four decades of geomagnetic and solar activity: 1960-2001. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **72**, 607-616. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.02.017, 2010.

Vogl, T. P., J. K. Mangis, A. K. Rigler, W. T. Zink and D. L. Alkon, Accelerating the convergence of the backpropagation method, *Biological Cybernetics*, Vol. 59, pp. 256-264, 1988.

Watson, R. A. and D. H. McIntosh, Sudden Commencements in Geomagnetism, *Nature*, 165(4208), 1018, 1950.

Yamaguchi, Y., Si phenomenon, *Mem. Kakioka Mag. Obs.*, 8, 33-40, 1958.

Yokouchi, Y., Principal magnetic disturbances at Kakioka, 1924-1951, *Mem. Kakioka Geomag. Obs.*, 204-229, 1953.

Zirin, H., *Astrophysics of the Sun*, Cambridge University Press, 1988.

Zolesi, B., and L. R. Cander, Advances in regional ionospheric mapping over Europe, *Annali di Geofisica*, 41, 5-6, 1998.