



UNIVERSITAT_{DE}
BARCELONA

Anàlisi temps-freqüència de l'estat de polarització del senyal magnetotel·lúric

**Polarisation analysis of the magnetotelluric signal
in the time-frequency domain**

Magdalena Escalas Oliver



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement- NoComercial – SenseObraDerivada 3.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento - NoComercial – SinObraDerivada 3.0. España de Creative Commons.**

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0. Spain License.**

Grup d'Exploració Electromagnètica i Sísmica
Institut de Recerca Geomodels
Grup de Geodinàmica i Anàlisi de Conques
Departament de Geodinàmica i Geofísica, Universitat de Barcelona

Anàlisi temps-freqüència de l'estat de polarització del senyal magnetotel·lúric

*Polarisation analysis of the magnetotelluric signal
in the time-frequency domain*

Memòria presentada per

Magdalena Escalas Oliver

per optar al títol de Doctora dins el programa de doctorat de Ciències de la Terra
de la Universitat de Barcelona, sota la direcció de la **Dra. Pilar Queralt**.

Magdalena Escalas Oliver
Barcelona, maig de 2015

Dra. Pilar Queralt
Directora i tutora

Part III: Aplicacions

Capítol 5. Detecció i caracterització de soroll cultural.

Capítol 6. Detecció i caracterització de senyals geomagnètics polaritzats.

Capítol 5. Detecció i caracterització de soroll cultural.

En el present capítol es mostra l'anàlisi de sèries temporals MT' mesurades a Lamezia Terme i Hontomín, contaminades per diferents fonts de soroll cultural. En concret, es caracteritza el soroll creat per línies elèctriques, aerogeneradors, la circulació de trens per vies fèrries electrificades amb CC i l'activitat industrial.

5.1. Lamezia Terme - soroll cultural.

5.1.1. Introducció

A la ciutat Lamezia Terme (regió de Calàbria, sud d'Itàlia) s'hi duen a terme activitats industrials i agrícoles, i hi conflueixen dues vies de transport ferroviari electrificades amb CC. Les respostes MT en sites propers a aquesta ciutat posen de manifest la presència de fonts de soroll cultural a la zona. En aquest capítol es descriu l'anàlisi de les dades adquirides durant 24 h en els sites S4 (11/07/2012) i N6 (10/07/2012). La **Figura 5.1** mostra un mapa esquemàtic de la zona amb la posició dels sites i de les vies fèrries, així com de les estacions ferroviàries més properes. El site S4 és el més proper a totes les possibles fonts de soroll cultural, està situat a 4.3 km de Lamezia Terme i a 2.75 km de l'estació de tren Santa Eufemia, és el més pròxim a les vies fèrries. En canvi, el site N6 està en una zona més aïllada, a 8.5 km de Lamezia Terme i a una distància de 8 km de l'estació de tren més propera, Lenzi.

En ambdós sites les sèries temporals MT es van mesurar amb un equip MT24LF (EMI-Schlumberger) amb una freqüència de mostreig $f_m = 6.25 \text{ Hz}$. Les variacions temporals del camp E es varen mesurar amb dipòls elèctrics orientats en les direccions NS i EW, de longituds 89 m i 88 m respectivament en el site S4, i de 31 m i 36 m en el site N6. Les variacions del camp B es van enregistrar en aquestes mateixes direccions amb bobines d'inducció BF-4 (EMI-Schlumberger).

Als voltants de Lamezia Terme s'hi han realitzat nombrosos estudis geofísics pel seu potencial ús geotèrmic (Rizzo et al., 2013). A l'annex digital E s'adjunta un mapa geològic d'aquesta àrea. El site S4 està situat en els sediments d'un con al·luvial, altament conductors, mentre que en el site N6 el medi és molt més resistent ja que es tracta d'esquistos metamòrfics. Entre ambdós sites s'hi ha detectat la circulació d'aigua d'elevades temperatures al llarg d'un sistema de falles, per tant es tracta d'una zona clarament no homogènia quant a resistivitat elèctrica.

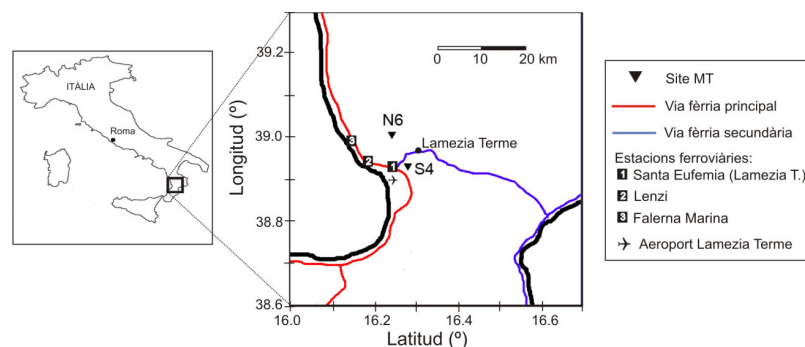


Figura 5.1. Mapa de situació dels sites S4 i N6 a la regió de Calàbria (Itàlia). Les vies fèrries electrificades amb corrent continu (www.rfi.it) estan indicades en color vermell (via principal, de 2 o més vies) i en blau (via secundària, d'una sola via). També s'inclou la posició de les estacions més properes a aquests dos sites, de la ciutat Lamezia Terme i del seu aeroport.

Les respostes MT dels sites S4 i N6 en el rang de freqüències $[0.004 \text{ Hz} - 1.2 \text{ Hz}]$ es mostren a la **Figura 5.2**. En ambdós sites les respostes MT en la direcció NS presenten l'efecte de camp proper (secció 1.2.2): el logaritme de la resistivitat aparent augmenta en disminuir el logaritme de la freqüència amb un pendent de 45° , mentre que les fases decauen cap als 0° i les coherències tendeixen a la unitat. Aquesta distorsió de les respostes MT és típica en presència de fonts de soroll cultural (secció 1.4.2).

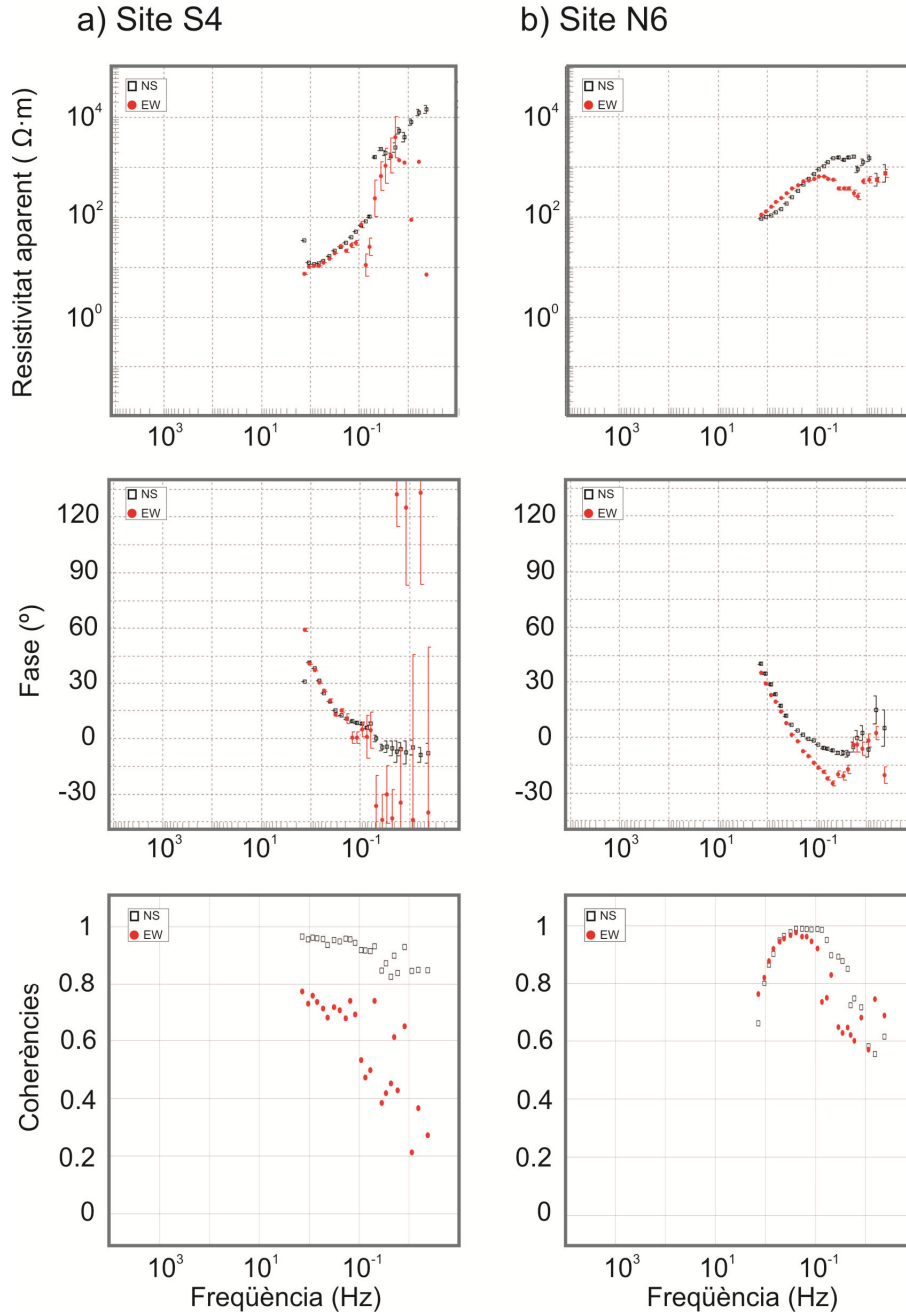


Figura 5.2 Lamezia. Respostes MT en els sites: (a) S4, (b) N6, calculades amb el codi de processat robust desenvolupat per Egbert i Booker (1986). Les coherències són les ordinàries entre els components dels camps mesurats (coherència NS: E_{NS}, B_{EW} , coherència EW: E_{EW}, B_{NS}).

Les respostes MT en la direcció EW no presenten l'efecte de camp proper en cap dels sites. Per freqüències inferiors a $f = 0.1 \text{ Hz}$ en ambdós sites les fases esdevenen negatives i les coherències disminueixen. En el site S4 la resistivitat aparent augmenta de manera brusca en aquesta direcció, i en canvi en el site N6 decreix possiblement per la proximitat del mar, situat a uns 10 km (**Figura 5.1**) i que actua com a conductor lateral. L'anàlisi amb detall d'aquests efectes està fora de l'objectiu de la present tesi.

Com s'ha exposat a la secció 1.4.2, el soroll que causa una zona industrialitzada sobre les respostes MT es pot assimilar al senyal creat per un dipol elèctric horitzontal situat en camp proper. Així mateix, les vies fèrries electrificades amb CC, a causa dels corrents de fuites que es generen a les seves proximitats durant el pas dels trens, també poden ser considerades com un conjunt de dipols elèctrics de geometria i corrent variable que contaminen les mesures MT.

En el cas dels sites S4 i N6 són diverses les fonts de soroll cultural que poden causar l'efecte de camp proper sobre les respostes MT. Amb l'objectiu d'identificar-les i caracteritzar-les, s'han analitzat amb el codi MTWAVELETS les sèries temporals mesurades en aquests sites. A l'annex B es detallen les característiques de les sèries: nombre de punts, freqüència de mostreig i durada. També s'hi indiquen els paràmetres utilitzats amb el codi MTWAVELETS pel seu anàlisi: la discretització de les escales δj , la base logarítmica, el rang de freqüències en què es mostren els resultats i el nombre total d'aquestes, el valor del paràmetre β de la wavelet de Morlet i els paràmetres del càlcul de la RS (ajust ΔS , llindar λ , ajust ΔS^{sig}).

5.1.2. Anàlisi temps-freqüència de l'energia i els atributs de polarització dels camps.

S'han analitzat les sèries temporals dels sites S4 i N6 en el rang de freqüències $[0.004 \text{ Hz} - 1.2 \text{ Hz}]$, rang en què les respostes MT es veuen afectades per soroll cultural (secció 5.1.1). A continuació es mostren per separat els resultats obtinguts per cada site.

5.1.2.1. Site S4

a) Sèries temporals

En el site S4 les sèries temporals dels camps ***E*** i ***B*** (**Figura 5.3-a**) presenten nombrosos paquets d'ones amb pics de gran amplitud. Aquesta forma és característica de les sèries temporals contaminades per la circulació de trens per vies fèrries electrificades amb CC, com mostren els estudis de Pádua et al., (2002) i Neska (2006).

b) Escalogrames

Els escalogrames del mòdul dels camps es mostren a la **Figura 5.3-b**, i a la **Figura 5.6-a,c** s'han representat novament superposant amb línies verticals negres l'horari de pas dels trens de passatgers per l'estació Santa Eufèmia, la més propera al site S4. S'observa un increment intermitent de l'energia del senyal per gairebé tot el rang de freqüències analitzat, més intens a les freqüències inferiors a 0.32 Hz i més freqüent durant el dia. Aquests episodis on l'energia dels camps és màxima es corresponen amb els paquets d'ones

observats a les sèries temporals (**Figura 5.3-a**) i coincideixen aproximadament amb l'horari de pas dels trens durant el dia. En conseqüència, el senyal de major intensitat dels escalogrames podria ser el soroll EM causat per la circulació dels trens. La discrepància entre l'horari previst pel pas dels trens i la situació dels màxims als escalogrames pot ser causada pels retards dels trens respecte el seu horari oficial, que és el que s'ha representat en aquesta figura. D'altra banda, cal tenir en compte que durant la nit circulen trens de transport de mercaderies, dels quals no s'ha pogut obtenir el seu horari de pas concret i per tant no s'ha representat gràficament. Per exemple, els increments d'energia que s'observen en els escalogrames al voltant de les 00:00 poden ser causats per aquests trens.

c) Atributs de polarització

Els atributs de polarització (**Figura 5.3-c**) mostren dos comportaments diferents. El senyal dels episodis més energètics dels escalogrames presenta atributs gairebé independents de la freqüència. Concretament, l'el·lipticitat dels camps ***E*** i ***B*** tendeix a ser nul·la, indicant que el senyal està polaritzat linealment. Els components dels camps estan en fase o bé en oposició de fase ($\Delta\phi = \pm 180^\circ$), mentre que l'angle de polarització és $\theta_E \approx 118^\circ$ en el camp ***E*** (en color groc a la **Figura 5.3-c**) i $\theta_B \approx 160^\circ$ en el camp ***B*** (en color vermell). El fet que aquest senyal estigui polaritzat linealment amb el mateix angle en tots els intervals de temps corresponents i per a totes les freqüències posa de manifest que la seva font està localitzada en l'espai i per tant és artificial, no natural (secció 1.4.2). És a dir, l'anàlisi dels atributs de polarització confirma la hipòtesi que aquest senyal és el generat per la circulació dels trens.

El soroll creat per la circulació de trens per una via fèrria electrificada amb CC afecta sobretot el camp ***E*** horitzontal paral·lel a la via, el camp ***B*** horitzontal perpendicular a aquesta i el camp ***B*** vertical (Chaize i Lavergne, 1970; Larsen et al., 1996; Pádua et al., 2002; Lowes, 2009; Neska et al., 2013). Malgrat tot, en el cas del site S4 no és trivial indicar la direcció de la via fèrria a partir de l'angle de polarització dels camps ***E*** i ***B***. Aquest site és molt proper a dues vies fèrries (**Figura 5.1**) i per tant caldria tenir en compte la circulació de trens per cada una d'elles en un instant determinat. A més, el traçat de les vies a les proximitats del site S4 no és recte sinó que té una certa curvatura, fet que dificulta el càlcul de la direcció estimada dels camps ***E*** i ***B*** en aquest site.

La resta de senyal que apareix en els escalogrames entre els episodis més energètics presenta uns atributs de polarització més variables en funció del temps i de la freqüència. Ara bé, els atributs del camp ***E*** mostren un senyal predominant que està polaritzat linealment amb un angle $\theta_E \approx 150^\circ$ en la major part del rang de freqüències i gairebé durant tot el temps. Aquest senyal s'atribueix al soroll EM cultural generat pel municipi Lamezia Terme. El soroll creat en conjunt per l'activitat elèctrica d'una ciutat i les seves indústries també presenta un estat de polarització determinat (Qian i Pedersen, 1991).

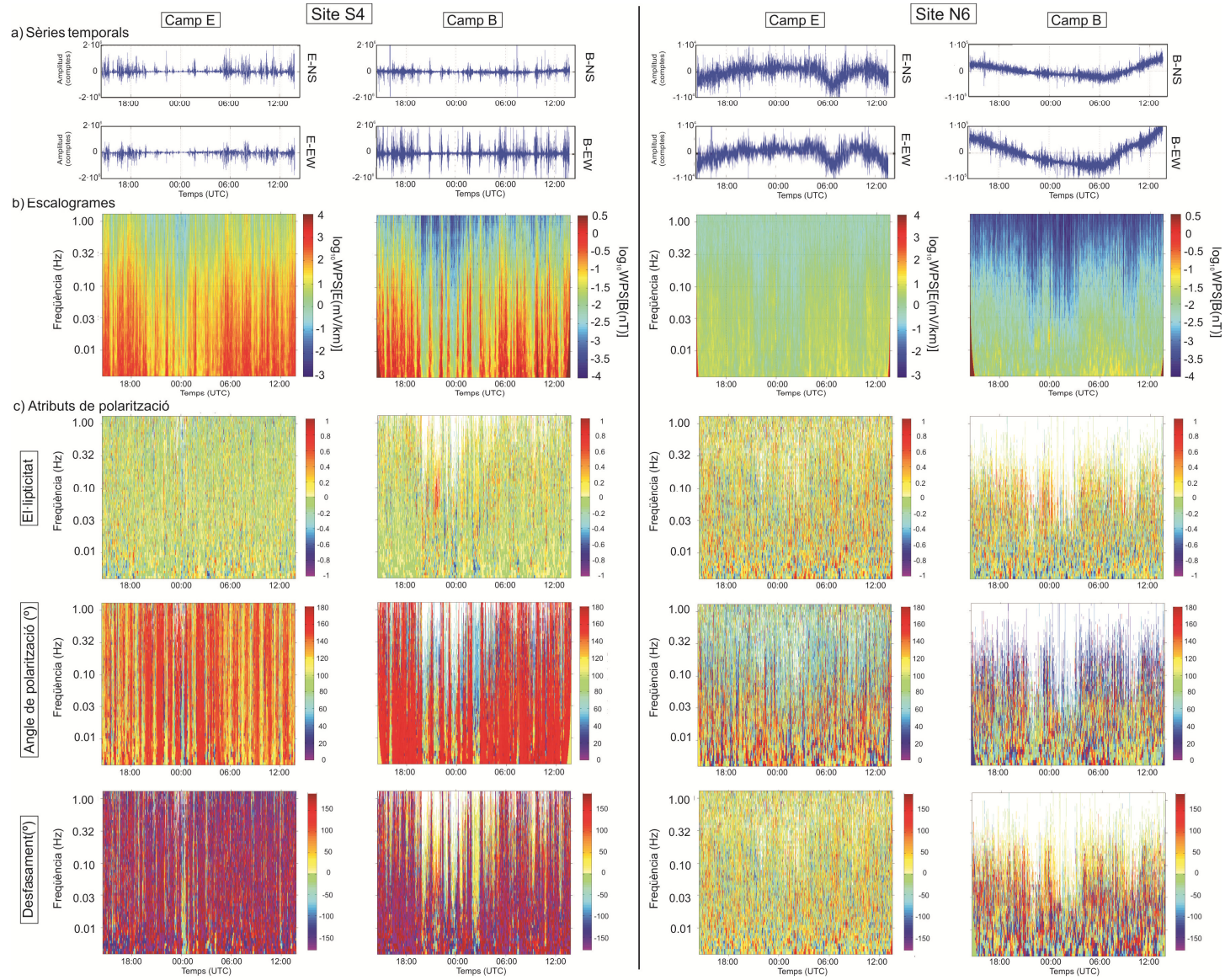


Figura 5.3 Lamezia. Sites S4 i S6. (a) sèries temporals, (b) escalogrames, (c) atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic.

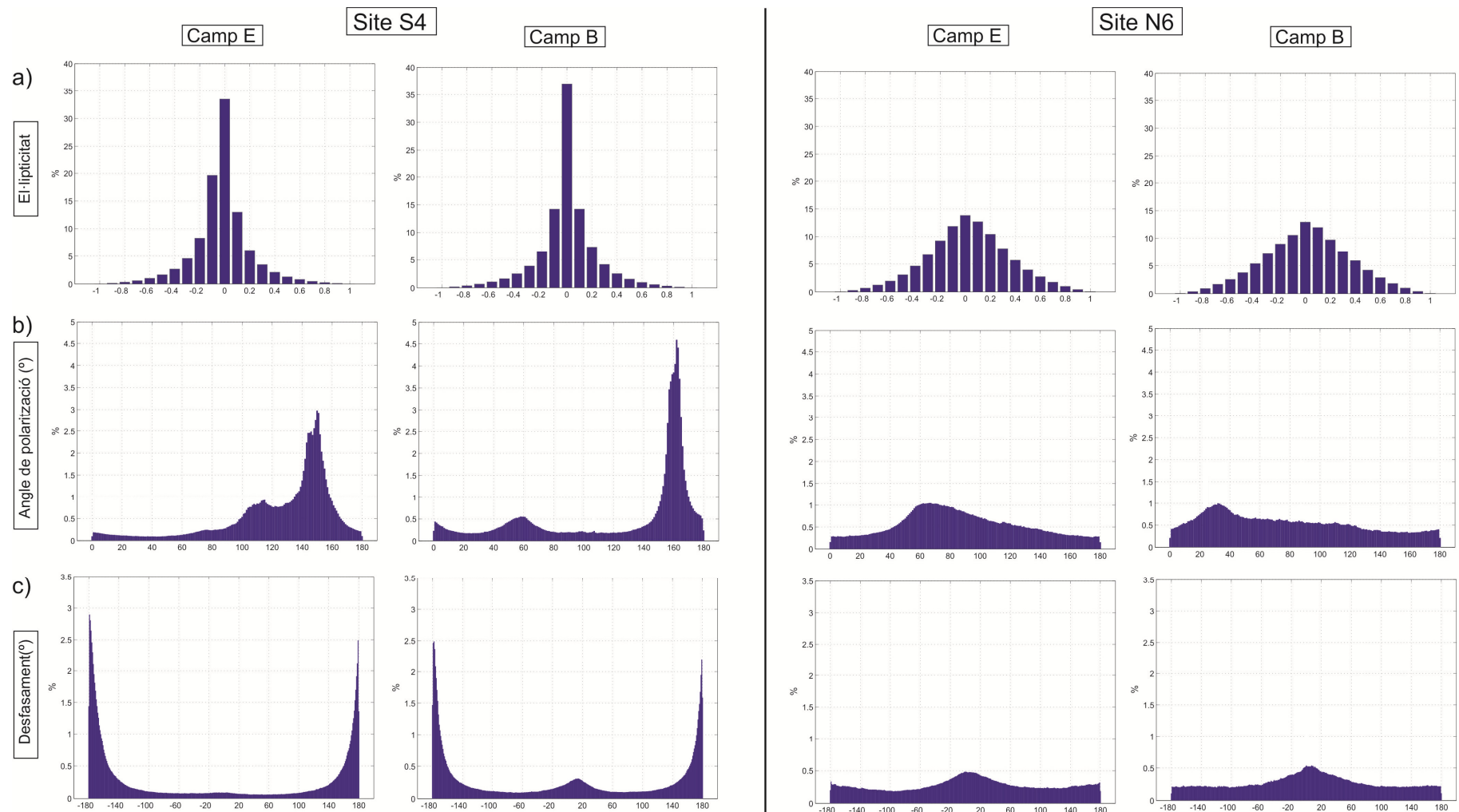


Figura 5.4 Lamezia. Sites S4 i N6. Histogrames dels atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic. (a) El·lípticitat, (b) angle de polarització, (c) desfasament.

Comparació atributs E, B

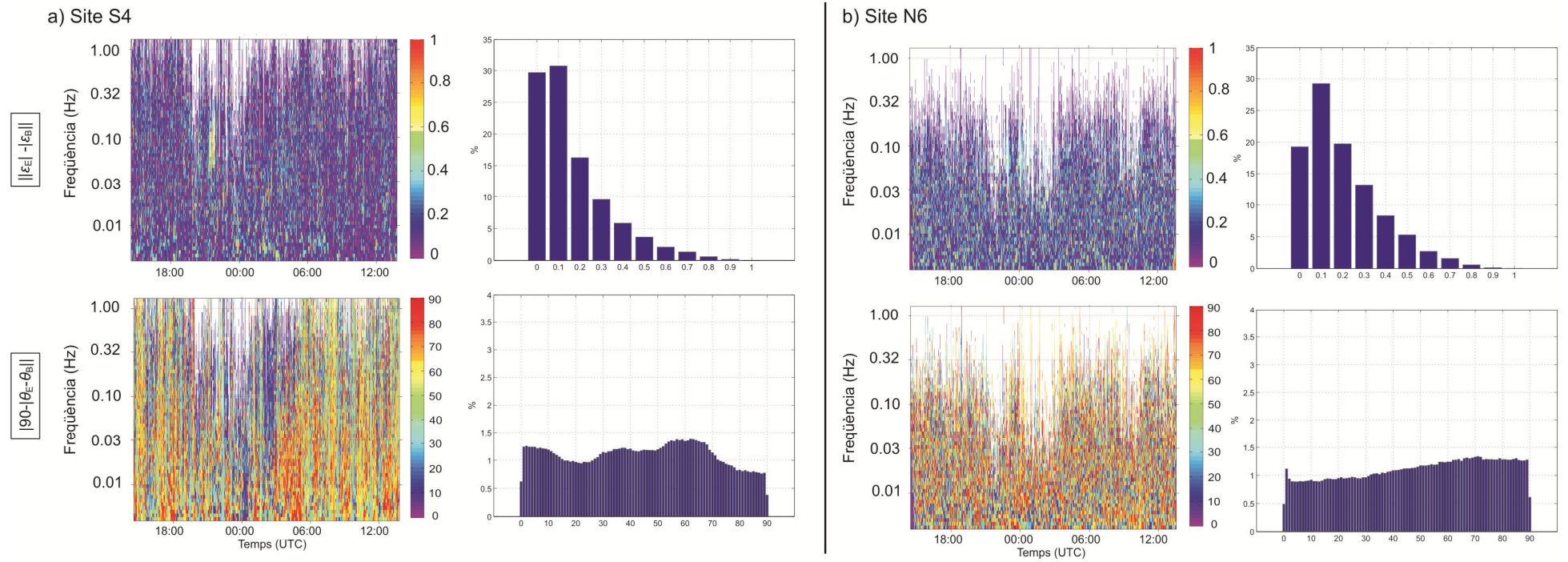


Figura 5.5 Lamezia. Comparació dels atributs de polarització dels camps i els corresponents histogrames en els sites (a) S4 i (b) N6.

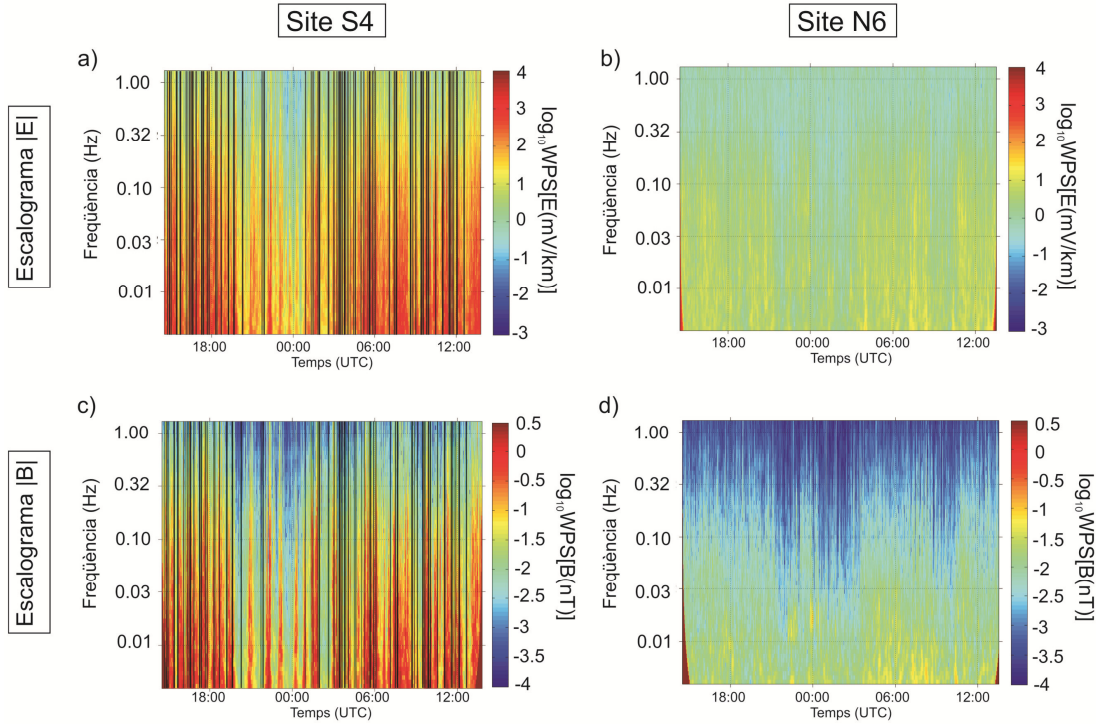


Figura 5.6 Lamezia. Escalograma del mòdul dels camps, (a) site S4 -camp E, (b) site N6 - camp E, (c) site S4 – camp B, (d) site N6 – camp B. A sobre dels escalogrames del site S4 s’ha superposat amb línies negres verticals l’horari de pas dels trens de passatgers per l’estació Santa Eufemia.

Els histogrames dels atributs de polarització del site S4 presenten pics molt remarcats en els valors més freqüents. Pel que fa a l’el·lipticitat (**Figura 5.4-a**), el valor més freqüent és el zero, en el 35 % dels casos calculats per ambdós camps. Per tant, a tot el domini (t-f) analitzat la major part del senyal està polaritzat linealment. Pel que fa als histogrames de l’angle de polarització dels camps (**Figura 5.4-b**), en el cas del camp **E** el pic més alt està al voltant dels 150° i correspon al senyal menys energètic dels escalogrames. El segon pic està entorn dels 118° , l’angle de polarització del senyal més energètic, associat al pas dels trens. En el cas del camp **B** destaca un pic al voltant dels 160° que correspon al senyal més energètic, mentre que la resta de valors, associats a la resta de senyal, s’observen gairebé el mateix nombre de cops. Els histogrames del desfasament dels camps (**Figura 5.4-c**) mostren dos pics molt acusats entorn dels $\pm 180^\circ$.

d) Comparació dels atributs de polarització dels camps

Els atributs de polarització dels camps s’han comparat a la **Figura 5.5-a**. L’el·lipticitat és gairebé la mateixa per ambdós camps a tot el domini (t-f), ja que la diferència d’el·lipticitat és pràcticament nul·la, $|\Delta\epsilon_{EB}| \approx 0$. La desviació de l’angle entre els camps respecte l’ortogonalitat és màxima en el senyal sorollós causat pels trens, assoleix valors dins l’interval $55^\circ < |90 - \theta_{EB}| < 65^\circ$. En canvi, per a la resta del senyal la desviació és més petita: hi ha un gran nombre de valors dins l’interval $0^\circ < |90 - \theta_{EB}| < 10^\circ$, que correspon al senyal natural, i dins l’interval $30^\circ < |90 - \theta_{EB}| < 50^\circ$, que s’atribueix al soroll generat per Lamezia Terme. És a dir, els camps **E** i **B** dels senyals artificials generats per la circulació dels trens o per l’activitat de la ciutat no són ortogonals. En canvi, els camps sí

que són perpendiculars en el senyal MT, d'origen natural. La desviació de l'ortogonalitat que presenten els camps generats per un dipol elèctric en camp proper o a la zona de transició en el cas d'un medi homogeni pot arribar als 20° (secció 4.2.2.4), mentre que en medis no homogenis la desviació pot ser major.

e) Anàlisi de les possibles fonts de soroll

Tant el senyal creat per la circulació dels trens com l'activitat industrial d'una ciutat poden assimilar-se al senyal creat per un dipol elèctric (secció 1.4.2). Tenint en compte la distància que separa l'estació de Santa Eufèmia i la ciutat de Lamezia Terme respecte del site S4 (secció 5.1.1), i el valor de la resistivitat aparent en aquest site ($\rho = 40 \Omega \cdot m$, **Figura 5.2-a**), a la **Taula 5.1** es mostra la freqüència màxima (1.42), i mínima (1.43) que verifiquen les zones de camp proper i camp llunyà, respectivament, si el medi és homogeni. Segons l'ortogonalitat dels camps el site S4 està en zona de camp proper o bé a la zona de transició respecte a les vies fèrries i la ciutat Lamezia Terme, les quals actuen com a fonts de soroll a l'interval de freqüències analitzat $[0.004 \text{ Hz} - 1.2 \text{ Hz}]$. A més, l'anàlisi dels escalogrames i els atributs de polarització indica que la font de soroll predominant en aquest site és la circulació de trens per les vies fèrries electrificades, i l'activitat industrial de Lamezia Terme és la font secundària.

Taula 5.1 Lamezia, site S4. Fonts de soroll i les freqüències màxima i mínima que verifiquen les condicions de camp proper i camp llunyà, respectivament, considerant el medi homogeni de resistivitat $\rho = 40 \Omega \cdot m$.

Site S4		
Font de soroll	$f_{max}^{CP} \text{ (Hz)}$	$f_{min}^{CLL} \text{ (Hz)}$
Via fèrria (Sta. Eufèmia)	0.3	21.4
Ciutat (Lamezia Terme)	0.1	8.8

5.1.2.2. Site N6

a) Sèries temporals

En el site N6 les sèries temporals dels camps també presenten paquets d'ones com en el cas del site S4, però són de menor amplitud (**Figura 5.3-a**).

b) Escalogrames

Els escalogrames del site N6 (**Figura 5.3-b**, **Figura 5.6-b**, d) posen de manifest que l'energia dels camps **E** i **B** en general és menor en el site N6 que en el site S4. No obstant, també s'hi observa un senyal intermitent, que d'acord amb l'anàlisi del site S4 és generat per la circulació dels trens per les vies fèrries electrificades. En el site N6 aquest senyal seria més visible amb una escala de color que tingués un límit superior més baix, però s'han representat els escalogrames d'ambdós sites amb la mateixa escala de color per poder comparar-los més fàcilment.

El fet que en el site N6 l'energia dels camps sigui menor que en el site S4 s'explica per la major proximitat d'aquest últim a totes les possibles fonts de soroll cultural (**Figura 5.1**).

En el site N6 el senyal sorollós creat per aquestes fonts hi arriba més atenuat que en el site S4, i sobretot per les freqüències més altes, d'acord amb el paràmetre *skin depth* (1.25).

c) Atributs de polarització

Els atributs de polarització dels camps mesurats en el site N6 (**Figura 5.3-c**), a diferència del que succeeix en el site S4, presenten una major variació en el temps i la freqüència. En els histogrames dels atributs (**Figura 5.4**) s'observa un rang de valors que predomina lleugerament per sobre dels altres, però no excessivament, en comparació amb els histogrames del site S4 on sí destaquen alguns valors molt per sobre de la resta. Predomina la polarització lineal per ambdós camps: l'el·lipticitat presenta la major part dels valors entorn de zero, i els components ortogonals dels camps estan en fase o bé en oposició de fase. L'angle de polarització de cada un dels camps assoleix tots els valors possibles dins el seu rang de variació, però hi ha una lleugera majoria de valors dins l'interval $55^\circ < \theta_E < 80^\circ$ en el camp **E** i dins l'interval $20^\circ < \theta_B < 35^\circ$ en el camp **B**.

d) Comparació dels atributs de polarització dels camps

La diferència entre l'el·lipticitat dels camps en el site N6 (**Figura 5.5-b**) és molt petita per a tot el domini (t-f), en general $|\Delta\epsilon_{EB}| < 0.2$. En canvi, la desviació de l'angle entre els camps **E** i **B** respecte a l'ortogonalitat és molt variable. L'histograma corresponent mostra que els valors estan distribuïts de manera molt similar en tot el rang de variació possible, però hi ha una majoria de valors dins l'interval $45^\circ < |90 - \theta_{EB}| < 90^\circ$.

e) Anàlisi de les possibles fonts de soroll

Tant les vies fèrries com la localitat de Lamezia Terme, possibles fonts de soroll, estan a una distància aproximada de 8 km del site N6, el qual té una resistivitat aparent promig de $\rho = 100 \Omega \cdot m$ (**Figura 5.2-b**). A la **Taula 5.2** s'indiquen la freqüència màxima i mínima en què aquestes estan en condicions de camp proper i camp llunyà respecte el site (1.42, 1.43), considerant el medi homogeni. Segons aquests valors, ambdues fonts es troben en camp proper o a la zona de transició respecte el site N6 dins l'interval de freqüències analitzat, [0.004 Hz – 1.2 Hz].

Taula 5.2 Lamezia, site N6. Fonts de soroll i les freqüències màxima i mínima que verifiquen les condicions de camp proper i camp llunyà, respectivament, considerant el medi homogeni de resistivitat $\rho = 100 \Omega \cdot m$.

Site N6		
Font de soroll	$f_{max}^{CP} (Hz)$	$f_{min}^{CLL} (Hz)$
Via fèrria (Lenzi)	0.1	6.3
Ciutat (Lamezia Terme)	0.1	5.6

Els atributs de polarització dels camps en el site N6 suggereixen la presència de diverses fonts de soroll cultural que contaminen les mesures MT. No hi ha cap d'aquestes fonts, però, que predomini sobre les altres com el cas del site S4. En el site N6 no s'observa una

direcció molt concreta de polarització com en el site S4 a causa del soroll de les vies fèrries, sinó que s'observa un interval predominant de polarització, causat per la superposició de senyals de diverses fonts de soroll. La desviació de l'angle entre els camps presenta un màxim en els histogrames en un rang molt ampli de valors, per tant també suggereix la presència de més d'una font de senyal artificial que contamina les dades d'aquest site.

En definitiva, a partir de l'anàlisi dels escalogrames i els atributs de polarització es dedueix que en el site N6 la circulació de trens i l'activitat industrial de Lamezia Terme són les dues fonts de soroll que contaminen les sèries temporals MT, sense que cap de les dues predomini sobre l'altre.

5.1.3. Conclusions Lamezia Terme – soroll cultural

L'anàlisi amb el codi MTWAVELETS de les sèries temporals MT mesurades en els sites S4 i N6 ha permès identificar la circulació de trens per vies fèrries electrificades amb CC i l'activitat industrial de la ciutat de Lamezia Terme com les fonts de soroll que contaminen les mesures MT en aquests sites, diferenciant en cada cas el nivell de soroll i la font predominant. S'ha caracteritzat el patró que generen aquestes fonts en l'energia i els atributs de polarització dels camps en el domini (t-f).

Les respostes MT en aquests sites (resistivitat aparent, fase i coherències) posen de manifest que les dades estan contaminades per fonts de soroll cultural, però no permeten identificar el seu origen. A més, les respostes MT no mostren una clara diferència entre el nivell de soroll d'ambdós sites, possiblement perquè el codi de processat utilitzat (Egbert i Booker, 1986) té com a criteri la coherència entre els camps. Aquest codi considera que els segments més idonis de les sèries temporals per dur a terme el processat són els que tenen coherències més elevades, sense diferenciar el senyal del soroll coherent. En aquest cas, per tant, s'ha considerat el soroll coherent com a senyal MT de manera que les respostes obtingudes són igualment sorolloses en ambdós sites. Per tant, l'anàlisi de l'energia i l'estat de polarització dels camps a partir de les sèries temporals MT en els sites S4 i N6 ha proporcionat més informació sobre les fonts de soroll que contaminen les dades que no les respostes MT processades amb els mètodes habituals.

Hi ha nombrosos estudis sobre l'efecte que causa la circulació de trens per vies fèrries electrificades amb CC sobre les respostes MT (secció 1.4.1.2). Principalment, es centren en l'anàlisi de la resistivitat aparent, la fase i el *tipper* (secció 1.1.4), malgrat aquesta última resposta només es pot analitzar en els casos en què es disposa del camp magnètic vertical. A la bibliografia revisada no s'ha trobat constància de l'anàlisi de sèries MT contaminades per aquesta font de soroll a partir de l'energia i l'estat de polarització dels camps en el domini (t-f) com s'ha realitzat en aquesta tesi. En vista dels resultats obtinguts es considera que el mètode proposat pot ser molt útil per a la identificació d'aquest tipus de soroll i la selecció dels sites més idonis on realitzar les mesures MT. La identificació concreta dels intervals de temps i les freqüències afectades pel soroll que proporciona aquesta mètode és de gran utilitat de cara a una posterior selecció de dades pel processat de les respostes MT i millorar la seva qualitat.

5.2. Hontomín - soroll cultural

5.2.1. Introducció

Hontomín és un petit municipi, de menys de cent habitants, en el qual s'hi han dut a terme diverses campanyes MT durant la realització d'aquesta tesi, entre elles l'experiment amb font controlada descrit al capítol 3. Les respostes MT per a freqüències inferiors a 0.1 Hz presenten l'efecte de camp proper (Ogaya et al., 2013; 2014), posant de manifest l'existència de fonts de soroll cultural a la zona. La **Figura 5.7-a** mostra el mapa de situació d'Hontomín respecte a les ciutats més poblades i les vies fèrries electrificades amb CC. La ciutat més propera és Burgos, situada a 30 km , i la via fèrria més pròxima és la que uneix Palencia i Donostia, situada a 25 km d'Hontomín en els trams més propers. En aquest capítol s'analitza el soroll cultural que afecta les dades MT adquirides en els sites D24 (22/05/2010) i B3 (2/10/2010). A la **Figura 5.7-b** s'ha representat la seva posició respecte d'Hontomín i les possibles fonts de soroll presents a la zona: línies elèctriques, aerogeneradors i una fàbrica.

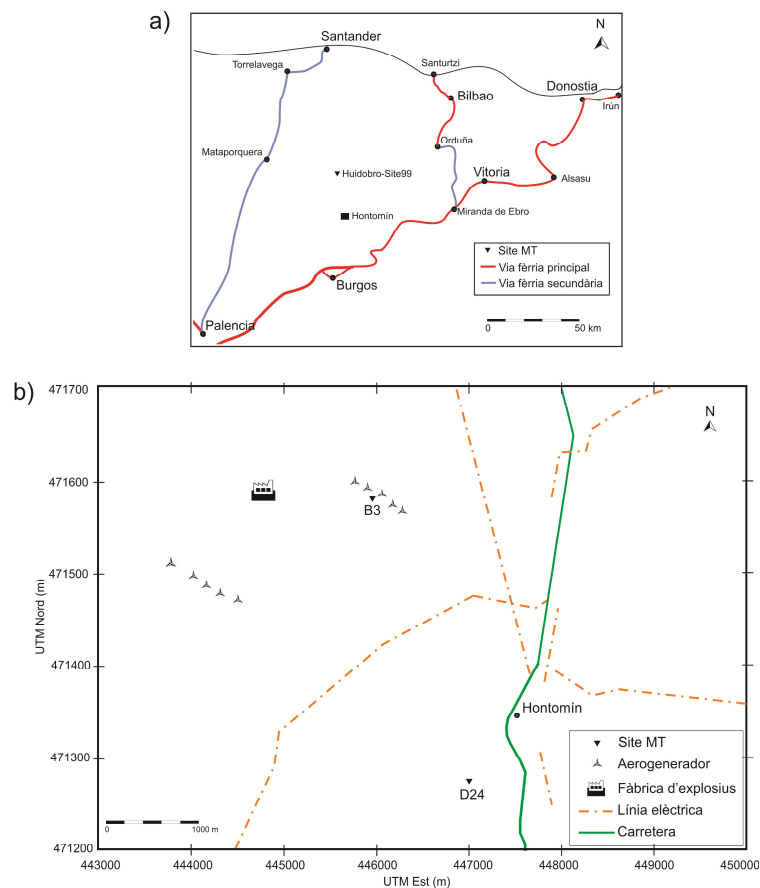


Figura 5.7. (a) Situació d'Hontomín respecte a les ciutats més poblades i les vies fèrries electrificades amb CC. Huidobro és una localitat molt petita on es va instal·lar el site 99; s'analitza a la secció 6.2. (b) Detall de la zona d'Hontomín, amb la posició dels sites D24 i B3 i les possibles fonts de soroll cultural. Les línies elèctriques tenen tensions iguals o inferiors als 100 kV .

Les sèries temporals MT en els sites D24 i B3 es varen adquirir amb estacions ADU-06 (Metronix) i ADU-07 (Metronix), respectivament, amb una freqüència de mostreig alta ($f_m = 4096 \text{ Hz}$) i amb una freqüència de mostreig més baixa ($f_m = 128 \text{ Hz}$ en el site D24, $f_m = 256 \text{ Hz}$ en el site B3). En ambdós sites els dipols elèctrics que mesuraven les variacions del camp $\mathbf{E}$ tenien una longitud de 70 m i estaven orientats en les direccions NS i EW. Les variacions temporals del camp $\mathbf{B}$ es van mesurar amb bobines d'inducció orientades també en aquestes direccions.

La **Figura 5.8** mostra les respostes MT obtingudes amb les dades mesurades en aquests sites, concretament 36 h de registre en el site D24 i 24 h en el site B3. En el site D24 a freqüències superiors a 0.1 Hz les corbes de resistivitat aparent i fase varien suaument amb la freqüència. En canvi a freqüències inferiors a $f = 0.1 \text{ Hz}$ les respostes MT presenten l'efecte de camp proper. En el site B3 les respostes MT són de molt mala qualitat en tot l'espectre de freqüències, es tracta d'un site amb un alt nivell de soroll. A les freqüències superiors a 0.1 Hz les respostes no varien de manera continuada amb la freqüència sinó que tenen un comportament molt dispers. Entorn dels 50 Hz la resistivitat aparent presenta un valor excessivament gran, $\rho = 10^4 \Omega \cdot \text{m}$, la fase descendeix a 0° i la coherència és igual a la unitat. Aquest comportament és causat per una font artificial de 50 Hz situada en camp proper respecte el site. A freqüències inferiors a 0.1 Hz , de la mateixa manera que en el site D24, les respostes MT presenten l'efecte de camp proper.

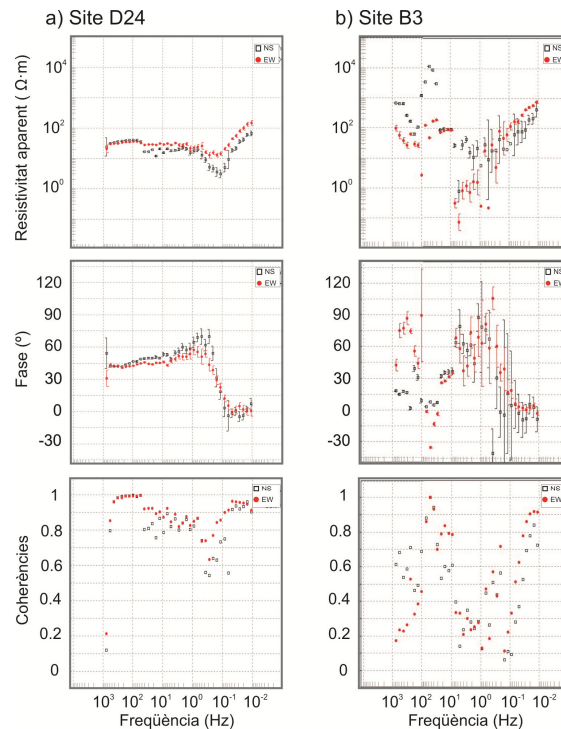


Figura 5.8. Hontomín. Respostes MT en els sites (a) D24, 36 hores de registre, i (b) B3, 24h de registre, calculades amb el codi Mapros (Metronix). Les coherències són les múltiples entre els components dels camps mesurats i els estimats a partir del tensor d'impedències (coherència NS: $E_{NS,B}$, coherència EW: $E_{EW,B}$).

Amb l'objectiu de detectar les fonts de soroll que afecten les dades mesurades en els sites D24 i B3 s'han analitzat les corresponents sèries temporals mitjançant el codi MTWAVELETS. Les característiques de les sèries i els paràmetres utilitzats en el codi en cada cas s'adjunten a l'annex B. A continuació es mostren per separat els resultats obtinguts amb l'anàlisi de les sèries enregistrades a alta i baixa freqüència de mostreig.

Algunes de les sèries temporals adquirides en el site D24 varen ser contaminades amb la font controlada durant la realització de l'experiment descrit en el capítol 3. En el present capítol, però, es mostra l'anàlisi de les dades mesurades en aquest site quan la font controlada no estava en funcionament. Per tant, el soroll EM que les contamina és generat exclusivament per les fonts de soroll cultural presents a la zona.

5.2.2. Anàlisi temps-freqüència de l'energia i els atributs de polarització del senyal d'alta freqüència.

El resultat de l'anàlisi d'1 minut de sèrie temporal MT mesurada amb una freqüència de mostreig alta ($f_m = 4096 \text{ Hz}$) en els sites D24 i B3 es mostra a la **Figura 5.9** (sèries temporals, escalogrames i atributs de polarització dels camps ***E*** i ***B***), la **Figura 5.10** (histogrames dels atributs de polarització) i la **Figura 5.11** (comparació dels atributs dels camps). Concretament, es mostren els resultats en el rang de freqüències $[10 - 631 \text{ Hz}]$.

a) Sèries temporals

Tret d'alguns pics que s'observen a les sèries temporals (**Figura 5.9-a**), l'amplitud dels camps és gairebé constant. En el site D24 és $E \approx \pm 50 \text{ mV/km}$, $B \approx \pm 0.10 \text{ nT}$, i en el site B3 és $E \approx \pm 1000 \text{ mV/km}$, $B \approx \pm 0.20 \text{ nT}$. Per tant en el site B3 l'amplitud és un ordre de magnitud major en el camp ***E*** i el doble en el camp ***B*** que en el site D24.

b) Escalogrames

Els escalogrames dels camps ***E*** i ***B*** (**Figura 5.9-b**) posen de manifest que l'energia més gran en ambdós sites correspon a senyals continus en el temps a les freqüències 50 Hz , 150 Hz , 250 Hz i 350 Hz , sent el més energètic de tots el de 50 Hz . En el site B3 aquests senyals tenen més energia que en el site D24. Tenint en compte que la freqüència fonamental de la xarxa elèctrica és de 50 Hz , és evident que el senyal més energètic dels escalogrames és el creat per les línies elèctriques i els aerogeneradors de la zona. Aquests últims transformen l'energia eòlica en energia elèctrica i la transmeten a la xarxa. La resta de senyals a les freqüències 150 Hz , 250 Hz i 350 Hz són els harmònics, múltiples senars de la freqüència fonamental que es creen habitualment per les variacions que es produeixen en el corrent i en les fases de la xarxa elèctrica (Szarka, 1988; Ferguson, 2012).

Tant el site D24 com el site B3 estan situats a menys d'1 km de diverses línies elèctriques, però el site B3, a més, es troba tan sols a 100 m i 200 m dels dos aerogeneradors més propers, mentre que el site D24 està a més de 2 km d'aquests (**Figura 5.7-b**). Per aquest motiu els senyals detectats són molt més energètics en el site B3.

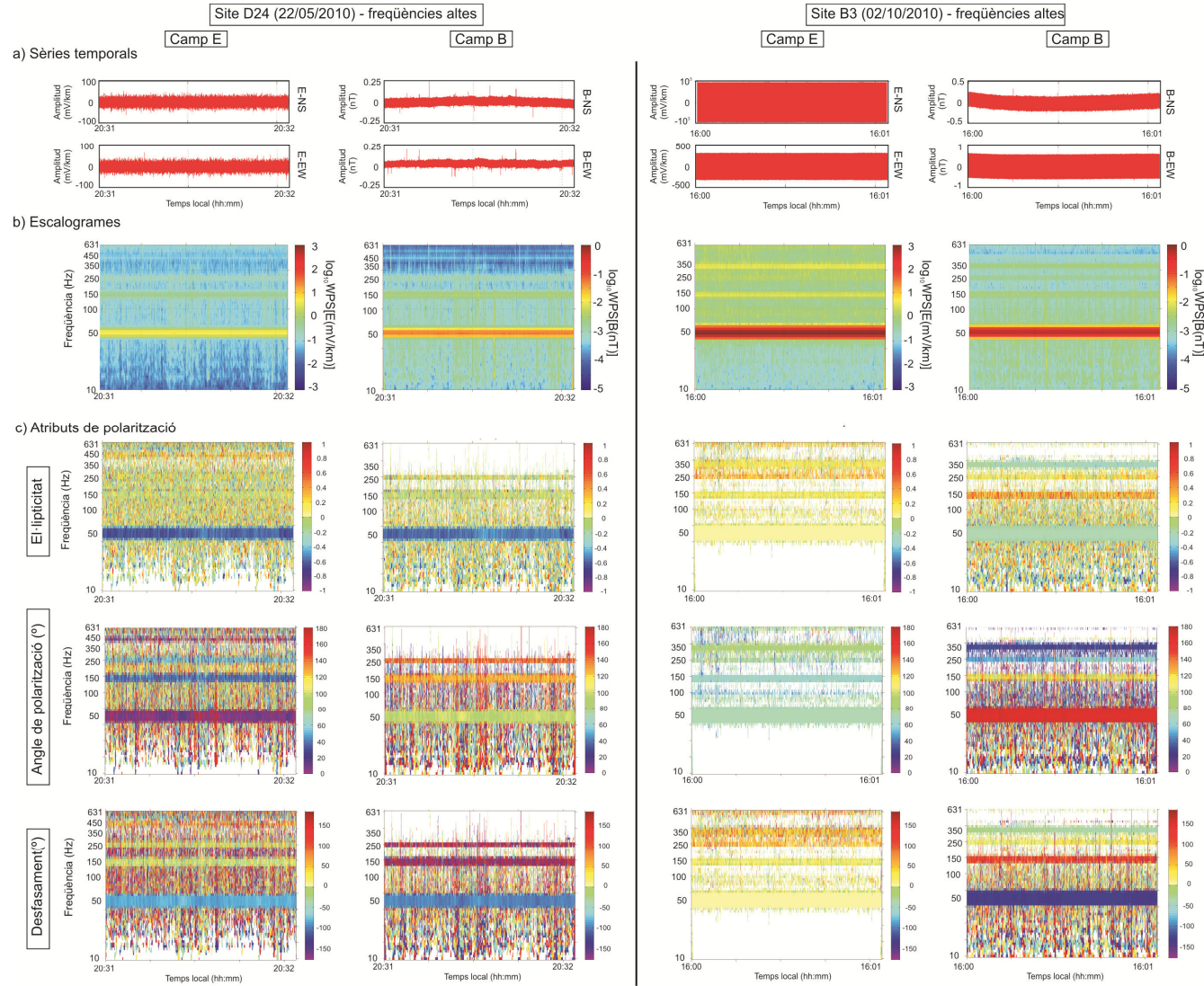


Figura 5.9 Hontomín. Sites D24 i B3. (a) Sèries temporals, (b)escalogrames i (c) atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic del senyal enregistrat a alta freqüència ($f_m = 4096 \text{ Hz}$).

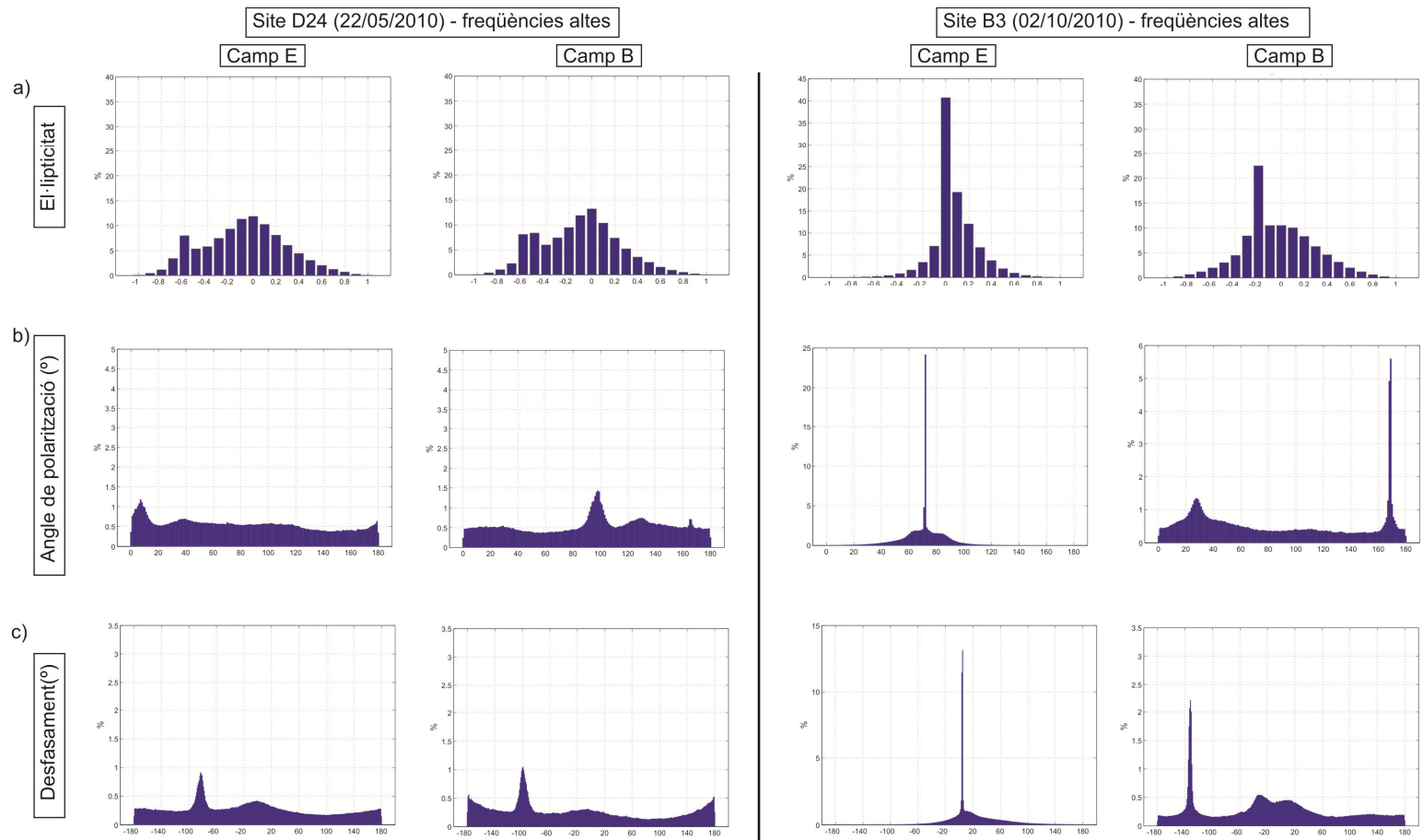


Figura 5.10. Hontomín. Sites D24 i B3. Histogrames dels atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic del senyal enregistrat a alta freqüència ($f_m = 4096 \text{ Hz}$).

Comparació atributs E, B a freqüències altes

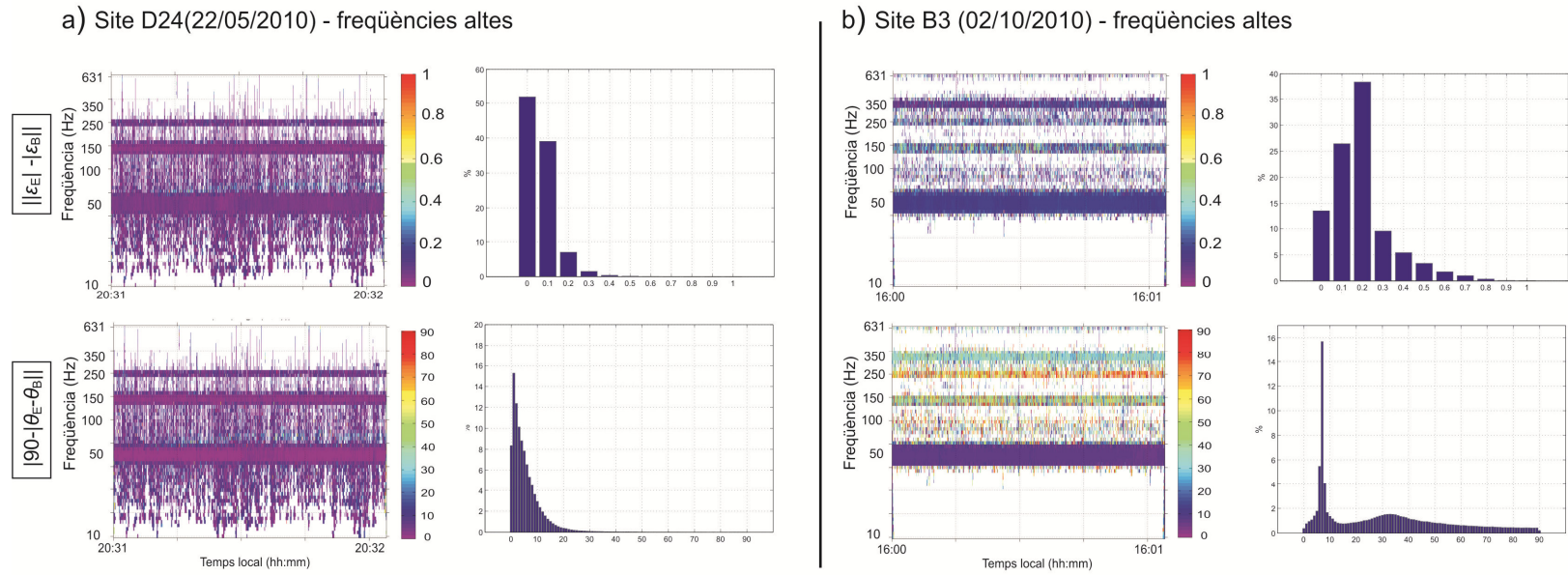


Figura 5.11. Hontomín. Comparació dels atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic pel senyal enregistrat a alta freqüència ($f_m = 4096 \text{ Hz}$) en els sites (a) D24 i (b) B3.

c) Atributs de polarització

En ambdós sites els senyals de 50 Hz, 150 Hz, 250 Hz i 350 Hz presenten atributs de polarització constants en el temps (**Figura 5.9-c**). En canvi, els atributs de polarització a la resta de freqüències són pràcticament aleatoris, com és característic del senyal MT natural (secció 1.3.2.).

En el site D24 a la freqüència de 50 Hz els camps **E** i **B** estan polaritzats el·lípticament en sentit levogir ($\varepsilon_E \approx \varepsilon_B \approx -0.6$), amb angles de polarització i desfasament gairebé constants durant tot el registre ($\theta_E \approx 10^\circ$, $\theta_B \approx 100^\circ$, $\Delta\theta_E \approx -80^\circ$, $\Delta\theta_B \approx -100^\circ$) (**Figura 5.10**). En canvi, en els múltiples senars de 50 Hz els camps **E** i **B** estan polaritzats gairebé linealment ($\varepsilon \rightarrow 0$, $\Delta\theta \rightarrow 0^\circ$, $\pm 180^\circ$) amb angles de polarització diferents al del senyal 50 Hz. En el site B3 tant a la freqüència fonamental de 50 Hz com en els seus múltiples senars els camps estan polaritzats gairebé linealment, sobretot el camp **E**. L'angle de polarització del camp **E** és pràcticament el mateix pel senyal de 50 Hz i els seus múltiples, en canvi no succeeix el mateix amb el camp **B**, l'angle del qual depèn de la freqüència del senyal.

d) Comparació dels atributs de polarització dels camps

En el site D24 (**Figura 5.11-a**). la diferència d'el·lípticitat dels camps i la desviació respecte a l'ortogonalitat són constants en el temps i gairebé nuls en el senyal de 50 Hz i els seus múltiples senars. A la resta de freqüències, que corresponen al senyal natural, aquests atributs també són molt petits: la diferència d'el·lípticitats és $|\Delta\varepsilon_{EB}| < 0.2$, mentre que la desviació respecte a l'ortogonalitat és $|90 - \theta_{EB}| < 10^\circ$. La diferència amb el senyal artificial és que els atributs del senyal natural no són tan constants en el temps, sinó que varien lleugerament.

En el site B3 (**Figura 5.11-b**) la diferència d'el·lípticitat dels camps en el senyal de 50 Hz i els seus múltiples senars és $|\Delta\varepsilon_{EB}| \approx 0.2$, major que en el site D24. La desviació respecte a l'ortogonalitat és $|90 - \theta_{EB}| \approx 8^\circ$ als 50 Hz, i més gran pels seus múltiples: a la freqüència 150 Hz és $40^\circ < |90 - \theta_{EB}| < 50^\circ$, a 250 Hz és $60^\circ < |90 - \theta_{EB}| < 70^\circ$ i a 350 Hz és $30^\circ < |90 - \theta_{EB}| < 40^\circ$. És evident, per tant, que aquest site està més a prop d'una font de soroll que el site D24, ja que la desviació respecte a l'ortogonalitat és molt més gran (secció 4.2.2.4).

e) Anàlisi de les possibles fonts de soroll

Les possibles fonts de soroll cultural en el sites D24 i B3 són els aerogeneradors i les línies elèctriques, la fàbrica i el municipi d'Hontomín, l'activitat industrial de Burgos i la circulació de trens per les vies fèrries (**Figura 5.7**). El soroll creat per totes aquestes fonts pot assimilar-se al senyal creat per un dipol elèctric (secció 1.4.2.). Considerant la distància màxima de camp proper respecte el dipol $r_{max}^{CP} = \delta/2$, i la distància mínima per estar en camp llunyà $r_{min}^{CLL} = 4\delta$ (secció 1.2.2), s'ha calculat la zona en què es troba el site D24 respecte cada una d'aquestes fonts a les freqüències dels senyals més energètics detectats en els escalogrames (**Taula 5.3**). S'ha considerant el medi homogeni i de resistivitat $\rho = 40 \Omega \cdot m$ (**Figura 5.8-a**). El mateix càlcul s'ha realitzat per al site B3 (**Taula 5.4**) considerant el medi homogeni i de resistivitat $\rho = 100 \Omega \cdot m$ (**Figura 5.8-b**). Malgrat és un càlcul aproximat perquè el medi

d'Hontomín evidentment no és homogeni (Ogaya et al., 2014), és útil per tenir una aproximació de la zona en què es troba el site respecte cada possible font de soroll.

En ambdós sites, segons l'anàlisi dels escalogrames i els atributs de polarització, el senyal artificial es concentra a les freqüències 50 Hz, 150 Hz, 250 Hz i 350 Hz, és a dir, la freqüència fonamental de la xarxa elèctrica i els seus harmònics. Per tant, es tracta del senyal generat per les línies elèctriques properes als sites i pels aerogeneradors.

Per aquestes freqüències concretes el site D24 està a la zona de transició o bé en camp llunyà respecte a les línies elèctriques i els aerogeneradors (**Taula 5.3**). Per aquest motiu els camps **E** i **B** són gairebé ortogonals (secció 4.2.2.4) i les respostes MT no presenten indicis de soroll en aquest rang (**Figura 5.8-a**). No obstant això, les coherències entre els camps tendeixen a la unitat, ja que el senyal artificial és altament coherent (secció 1.4.2). En aquest cas, doncs, les fonts de soroll cultural estan suficientment allunyades del site i no distorsionen les respostes MT en el rang de les altes freqüències. El fet que els camps estiguin polaritzats de manera lineal excepte a la freqüència 50 Hz en què presenten polarització el·líptica, i amb angles diferents per a cada freqüència, és a causa de la superposició dels senyals creats per les diverses línies elèctriques properes al site, orientades en direccions diferents, i pels aerogeneradors.

En el site B3, en canvi, els camps estan polaritzats linealment per a totes aquestes freqüències i amb el mateix angle de polarització, i la desviació dels camps respecte a l'ortogonalitat és gran. Aquests resultats s'expliquen tenint en compte que el site està en camp proper o a la zona de transició respecte dels aerogeneradors (**Taula 5.4**, secció 4.2.2.4), de manera que les respostes MT estan molt distorsionades en aquest rang de freqüències, i entorn dels 50 Hz presenten l'efecte de camp proper (**Figura 5.8-b**, secció 1.2.2). El site B3 està a la zona de transició respecte de les línies elèctriques. Aquestes també contribueixen a generar el soroll entorn dels 50 Hz, però en menor mesura en comparació amb els aerogeneradors, ja que aquests últims estan més a prop del site. Per tant, el senyal creat pels aerogeneradors és la font de soroll predominant en el rang d'altres freqüències en el site B3.

El soroll que crearien l'activitat d'Hontomín, la fàbrica, Burgos o la circulació de trens per les vies fèrries electrificades afectaria el senyal enregistrat en ambdós sites en un ampli rang de freqüències, no a freqüències concretes com és el cas observat. Totes aquestes possibles fonts de soroll estan a gran distància dels sites i en zona de camp llunyà en el rang d'altres freqüències, i a causa de l'atenuació del senyal amb la distància (1.25) no constitueixen fonts de soroll.

Taula 5.3 Hontomín, site D24, freqüències altes. Fonts de soroll, distància respecte el site i zona en què es troben (CP: camp proper, ZT: zona de transició, CLL: camp llunyà) segons la freqüència, considerant el medi homogeni de resistivitat $\rho = 40 \Omega \cdot m$.

Site D24			
Freqüència (Hz)	Hontomín, línies elèctriques (800 m)	Aerogeneradors, fàbrica (3-4 km)	Via fèrria, Burgos (25-30 km)
350	CLL	CLL	CLL
250	ZT	CLL	CLL
150	ZT	CLL	CLL
50	ZT	CLL	CLL

Taula 5.4 Hontomín, site B3, freqüències altes. Fonts de soroll, distància respecte el site i zona en què es troben (CP: camp proper, ZT: zona de transició, CLL: camp llunyà) segons la freqüència, considerant el medi homogeni de resistivitat $\rho = 100 \Omega \cdot m$.

Site B3				
Freqüència (Hz)	Aerogeneradors (100-200 m)	Línies elèctriques, fàbrica (1 km)	Hontomín (3 km)	Via fèrria, Burgos (28-33 km)
350	CP-ZT	ZT	CLL	CLL
250	CP-ZT	ZT	CLL	CLL
150	CP	ZT	CLL	CLL
50	CP	ZT	CLL	CLL

5.2.3. Anàlisi temps-freqüència de l'energia i els atributs de polarització del senyal de baixa freqüència.

Els resultats obtinguts amb l'anàlisi de les sèries temporals de baixa freqüència s'han representat a la **Figura 5.12** (sèries temporals, escalogrames i atributs de polarització), la **Figura 5.13** (histogrames dels atributs de polarització) i la **Figura 5.14** (comparació dels atributs de polarització dels camps) en el rang de freqüències $[0.06 \text{ Hz} - 64 \text{ Hz}]$. Corresponen a 1 hora de registre en el site D24 i 30 min en el site B3, amb freqüències de mostreig $f_m = 128 \text{ Hz}$ i $f_m = 256 \text{ Hz}$, respectivament.

5.2.3.1. Site D24

a) Sèries temporals

L'amplitud dels camps es manté gairebé constant durant tot el registre: $E \approx \pm 5 \text{ mV/km}$, $B \approx \pm 0.2 \text{ nT}$ (**Figura 5.12-a**).

b) Escalogrames

En els escalogrames (**Figura 5.12-b**) destaquen tres nivells diferents d'energia, associats a tres senyals diferents, segons la freqüència:

- senyal 1 (D24-s1): el senyal més energètic de tots és el senyal continu en el temps de 50 Hz , que com ja s'ha comentat a la secció 5.2.2 correspon al generat per les línies elèctriques;
- senyal 2 (D24-s2): senyal continu en el temps a les freqüències 8 Hz i 14 Hz . Per la continuïtat del senyal i la seva freqüència característica, es tracta del 1r i 2n modes de les ressonàncies Schumann (SR, secció 1.1.2.2);
- senyal 3 (D24-s3): s'observen augments intermitents de l'energia dels camps en el rang de freqüències inferiors a 0.5 Hz .

La resta de senyal de l'escalograma és senyal MT, que té menor energia. Concretament, entorn de la freqüència 1 Hz s'observa un mínim energètic que correspon a l'anomenada "banda morta" de l'espectre MT (secció 1.1.2).

c) Atributs de polarització

Els atributs de polarització dels camps del site D24 (**Figura 5.12-c**, histogrames a la **Figura 5.13**) tenen un comportament diferent en cada un dels senyals identificats en els escalogrames:

- D24-s1: a la freqüència 50 Hz els camps presenten una el·lipticitat petita, al voltant de $\varepsilon_E \approx \varepsilon_B \approx -0.2$, excepte en els últims 15 minuts de registre en què aquesta augmenta fins assolir el valor $\varepsilon_E \approx \varepsilon_B \approx -0.6$. Per tant la major part del temps els camps estan polaritzats el·lípticament, i en el darrer tram la seva el·lipticitat augmenta. L'angle de polarització i el desfasament varien lleugera i lentament amb el temps. Tenint en compte que el senyal de 50 Hz detectat en aquest site és la superposició dels senyals generats per diferents línies elèctriques (secció 5.2.2), el canvi dels atributs amb el temps pot ser causat

per la distinta intensitat de corrent que transporten les línies. Així, en un cert interval de temps predomina el senyal generat per una determinada línia, mentre que en un altre interval pot predominar el generat per una altra línia situada en una direcció diferent respecte al site;

- D24-s2: en els atributs de polarització tan sols el 1r mode de les SR (8 Hz) és distingible, ja que presenta valors gairebé constants amb el temps;
- D24-s3: el senyal de freqüències més baixes, inferiors a 0.5 Hz, té els camps **E** i **B** polaritzats majoritàriament de manera lineal ($\epsilon_E \approx \epsilon_B \approx 0$), sobretot el camp **E**. L'el·lípticitat en algunes ocasions assoleix valors grans, però de manera puntual. Els angles de polarització dels camps varien lleugerament amb el temps, però són constants durant intervals d'uns 5 minuts i per a totes les freqüències d'aquest rang. El mateix succeeix amb el desfasament. Aquests resultats suggereixen que es tracta d'un senyal artificial.

d) Comparació dels atributs de polarització dels camps

Pel que fa a la comparació dels atributs de polarització dels camps en el site D24 (**Figura 5.14-a**), els resultats obtinguts per a cada rang de freqüència són els següents:

- D24-s1: a $f = 50$ Hz l'el·lípticitat dels camps és gairebé la mateixa ($|\Delta\epsilon_{EB}| < 0.1$) i són pràcticament ortogonals ($|90 - \theta_{EB}| \approx 0^\circ$);
- D24-s2: a la primera i la segona SR (≈ 8 Hz i ≈ 14 Hz) els camps tenen majoritàriament la mateixa el·lípticitat i són ortogonals;
- D24-s3 a les freqüències inferiors a 0.5 Hz els camps presenten una diferència d'el·lípticitat en general molt petita, $|\Delta\epsilon_{EB}| < 0.2$. La desviació de l'angle entre els camps **E** i **B** respecte a l'ortogonalitat és bastant variable, $10^\circ < |90 - \theta_{EB}| < 40^\circ$. Els camps creats per un dipol elèctric no són ortogonals a la regió de camp proper o a la zona de transició respecte al dipol (secció 5.2.2.4).

f) Anàlisi de les fonts dels senyals detectats

A partir dels escalogrames i els atributs dels camps enregistrats en el site D24 a baixa freqüència s'ha pogut identificar el caràcter artificial o natural dels tres senyals més energètics:

- D24-s1: senyal artificial de 50 Hz generat per les línies elèctriques, identificat prèviament a la secció 5.2.2
- D24-s2: SR ($f \approx 8$ Hz i $f \approx 14$ Hz), senyal natural que presenta uns atributs de polarització concrets i diferents a la resta del senyal (secció 1.3.2, s'analitzaran amb més detall a la secció 6.2),
- D24-s3: senyal artificial de freqüències inferiors a 0.5 Hz.

Són diverses les fonts de soroll cultural que poden afectar el senyal enregistrat en el site D24 a freqüències inferiors a 0.5 Hz. La **Taula 5.5** mostra la zona en què es troba el site a certes freqüències; s'ha calculat de la mateixa manera que en la secció 5.2.2 en l'anàlisi de les altes freqüències.

Taula 5.5 Hontomín, site D24, freqüències baixes. Fonts de soroll, distància respecte el site i zona en què es troben (CP: camp proper, ZT: zona de transició, CLL: camp llunyà) segons la freqüència, considerant el medi homogeni de resistivitat $\rho = 40 \Omega \cdot m$.

Site D24			
Freqüència (Hz)	Hontomín, línies elèctriques (800 m)	Fàbrica, aerogeneradors (3-4 km)	Via fèrria, Burgos (25-30 km)
0.5	CP	ZT	CLL
0.25	CP	CP-ZT	ZT- CLL
0.1	CP	CP	ZT
0.06	CP	CP	ZT

El fet que els camps **E** i **B** estiguin polaritzats de manera lineal i amb el mateix angle de polarització per a totes aquestes freqüències i que no siguin ortogonals implica que hi ha una font de soroll predominant, i que el site està situat en camp proper o a la zona de transició respecte aquesta (secció 4.2.2.4). El caràcter intermitent d'aquest senyal observat als escalogrames i el fet que l'angle de polarització sigui gairebé constant amb el temps suggereixen que es tracta del soroll generat per la circulació de trens per la via fèrria electrificada amb CC que uneix Palencia i Donostia (**Figura 5.7-a**), ja que s'assembla al soroll detectat a la secció 5.1. A més, les respostes MT mostren l'efecte de camp proper a les freqüències més baixes (**Figura 5.8-a**), típic d'aquesta font de soroll. Segons els càlculs amb un medi homogeni el site està situat a la zona de transició respecte la font (**Taula 5.5**), però tenint en compte que el medi no és homogeni pot estar situat en camp proper.

L'activitat d'Hontomín i la fàbrica també són possibles fonts de soroll en el rang de les baixes freqüències en el site D24, ja que està en camp proper respecte aquestes (**Taula 5.5**). Malgrat això, per les característiques del senyal detectat en els escalogrames i en els atributs sembla que en aquest site la font de soroll predominant en el rang de baixes freqüències és la circulació dels trens per les vies fèrries. La comparació de registres durant el dia i durant la nit, tenint en compte que durant la nit la circulació dels trens és menys freqüent, podria ser útil per determinar la font predominant de soroll, de la mateixa manera que s'ha dut a terme amb les dades de Lamezia Terme a la secció 5.1.

Les línies elèctriques i els aerogeneradors poden causar soroll en aquest rang de baixes freqüències si es produeixen subharmònics o interharmònics de la freqüència fonamental. No és el cas del site D24, en canvi sí es detecten en el site B3 tal i com es mostra a continuació.

5.2.3.2. Site B3

a) Sèries temporals

En el site B3 l'amplitud dels camps és $E \approx \pm 500 \text{ mV/km}$, $B \approx \pm 0.5 \text{ nT}$, molt més gran que en el site D24 (**Figura 5.12-a**).

b) Escalogrames

En els escalogrames del senyal de baixa freqüència del site B3 (**Figura 5.12-b**) s'observen diferents senyals, segons la freqüència:

- senyal 1 (B3-s1): la regió més energètica de l'escalograma correspon a un senyal continu en el temps de 50 Hz . Té inclús més energia que el senyal de 50 Hz detectat en els escalogrames del site D24;
- senyal 2 (B3-s2): s'observa un increment de l'energia en el 1r mode de les SR ($f \approx 8 \text{ Hz}$);
- senyal 3 (B3-s3): es detecta un increment intermitent de l'energia per a freqüències inferiors a 0.25 Hz ;
- senyal 4 (B3-s4): a l'escalograma del camp **B** es detecta un senyal més o menys continu en el temps, de freqüència $f = 0.25 \text{ Hz}$;
- senyal 5 (B3-s5): a l'escalograma del camp **B**, en alguns intervals de temps es detecta un senyal de freqüència constant $f = 6 \text{ Hz}$, però durant altres intervals aquesta canvia de manera molt brusca al llarg del temps.

A les 19:58 h hi ha un increment molt gran d'energia a totes les freqüències en ambdós camps, és conseqüència d'un pic en l'amplitud del senyal que es pot observar també a les sèries temporals (**Figura 5.12-a**).

L'energia del camp **E** en aquest site és en general més gran que en el site D24. A partir de les 20:10 s'observa un increment de l'energia del camp **E** a totes les freqüències. L'energia del camp **B**, excepte a les freqüències que s'han comentat amb detall, és similar a la detectada en el site D24.

c) Atributs de polarització

Els atributs de polarització presenten un comportament diferent segons la freqüència i el camp (**Figura 5.12-c**, histogrames a la **Figura 5.13-b**):

- B3-s1: als 50 Hz el camp **E** està polaritzat linealment ($\epsilon_E \approx 0$, $\Delta\phi_E \approx 0^\circ$) amb un angle de polarització constant ($\theta_E \approx 70^\circ$), mentre que el camp **B** està polaritzat de manera lleugerament el·líptica ($\epsilon_B \approx -0.2$, $\Delta\phi_B \approx -140^\circ$) amb un angle gairebé constant ($\theta_B \approx 160^\circ$);
- B3-s2: en el 1r mode de les SR ($f \approx 8 \text{ Hz}$) els atributs de polarització dels camps no s'identifiquen fàcilment, sembla que el senyal està polaritzat de manera el·líptica en ambdós camps i amb un angle de polarització gairebé constant;
- B3-s3: pel senyal de freqüències inferiors a 0.25 Hz els camps presenten un estat de polarització que canvia lleugerament amb el temps, però que és diferent al de la resta del senyal;

- B3-s4: el senyal de freqüència $f \approx 0.25 \text{ Hz}$ té el camp $\mathbf{B}$ polaritzat el·lípticament amb un angle $\theta_B \approx 60^\circ$;
- B3-s5: el senyal que té freqüència $f = 6 \text{ Hz}$ en alguns segments i freqüència variable en altres, té el camp $\mathbf{B}$ polaritzat linealment amb un angle de polarització gairebé constant entorn dels $\theta_B \approx 110^\circ$.

A la resta de freqüències el camp $\mathbf{E}$ no té una polarització concreta, només en alguns intervals de temps que corresponen a les freqüències més energètiques de l'escalograma els atributs assoleixen valors més o menys constants.

d) Comparació dels atributs de polarització dels camps

Els resultats de la comparació dels atributs de polarització dels camps són els següents (Figura 5.14-b):

- B3-s1: a la freqüència de 50 Hz la diferència d'el·lipticitat entre els camps arriba a ser destacable, assolint valors $|\Delta\epsilon_{EB}| \approx 0.3$ en algun interval de temps. La desviació respecte l'ortogonalitat és petita, dins l'interval $0^\circ < |90 - \theta_{EB}| < 5^\circ$, però major que en el site D24 per aquesta freqüència;
- B3-s2: en el 1r i 2n modes de les SR ($\approx 8 \text{ Hz}$ i $\approx 14 \text{ Hz}$) els camps tenen gairebé la mateixa el·lipticitat i són ortogonals;
- B3-s3: a les freqüències inferiors a 0.25 Hz la diferència d'el·lipticitat entre els camps és en general petita, excepte en alguns instants i freqüències en què assoleix el valor màxim $|\Delta\epsilon_{EB}| \approx 0.6$. La desviació respecte l'ortogonalitat és molt variable i assoleix valors molt grans, fins i tot $|90 - \theta_{EB}| \approx 90^\circ$.

e) Anàlisi de les fonts dels senyals detectats

L'anàlisi dels atributs de polarització dels camps enregistrats al site B3 a baixa freqüència ha permès detectar senyals a diferents freqüències que tenen un estat de polarització més o menys determinat, diferent al del senyal MT en general:

- B3-s1: el senyal de freqüència 50 Hz prové majoritàriament dels aerogeneradors, molt pròxims al site B3 (secció 5.2.2);
- B3-s2: les SR són senyals d'origen natural que presenten un estat de polarització determinat.

A les freqüències inferiors a 0.5 Hz el site B3 està en zona de camp proper o transició respecte totes les possibles fonts de soroll (Taula 5.6). A partir de l'anàlisi dels escalogrames i els atributs de polarització, les fonts predominants segons la freqüència són les següents:

- B3-s3: el senyal de freqüències inferiors a 0.25 Hz és el mateix senyal artificial detectat en el site D24 a freqüències inferiors a 0.5 Hz . Les respostes MT, de la mateixa manera que en el site D24, presenten l'efecte de camp proper en aquestes freqüències (Figura 5.8-b). Es tracta doncs d'un senyal sorollós, possiblement causat per la circulació de trens per les vies fèrries electrificades, però també per l'activitat de la fàbrica i d'Hontomín, com succeeix en el site D24. El site B3, però, és més proper a la fàbrica i a Hontomín i més

llunyà respecte les vies fèrries que el site D24. En canvi, en el site B3 el soroll està més atenuat i afecta només fins a la freqüència 0.25 Hz . Aquest fet suggereix que la font de soroll predominant és el senyal creat per la circulació dels trens, que en el site B3 afecta un menor rang de freqüències perquè s'ha atenuat segons el paràmetre *skin depth* (1.25). Si el soroll predominant fos el creat per la fàbrica i per Hontomín, en el site B3 hauria d'afectar freqüències més elevades que en el site D24, ja que és més proper a aquestes fonts.

- B3-s4, B3-s5: els senyals de freqüències $f \approx 0.25 \text{ Hz}$ i $f = 6 \text{ Hz}$, només detectats en el camp **B**, són subharmònics i interharmònics del senyal creat pels aerogeneradors. Són senyals de freqüència inferior a la fonamental (50 Hz), submúltiples sencers en el primer cas, que es creen habitualment en els sistemes elèctrics dels aerogeneradors (Testa i Langella, 2005; Barros et al., 2007). Aquests senyals causen una gran dispersió en les respostes MT en el rang de freqüències corresponent (**Figura 5.8-b**). Per tant els aerogeneradors i les línies elèctriques constitueixen fonts de soroll pel rang de baixes freqüències en el site B3, que està situat en camp proper respecte aquestes (**Taula 5.6**).

Taula 5.6 Hontomín, site B3, freqüències baixes. Fonts de soroll, distància respecte el site i zona en què es troben (CP: camp proper, ZT: zona de transició, CLL: camp llunyà) segons la freqüència, considerant el medi homogeni de resistivitat $\rho = 100 \Omega \cdot m$.

Site B3				
Freqüència (Hz)	Aerogeneradors (100-200 m)	Línies elèctriques, fàbrica (1 km)	Hontomín (3 km)	Via fèrria, Burgos (28-33 km)
0.5	CP	CP	CP	ZT
0.25	CP	CP	CP	ZT
0.1	CP	CP	CP	ZT
0.06	CP	CP	CP	ZT

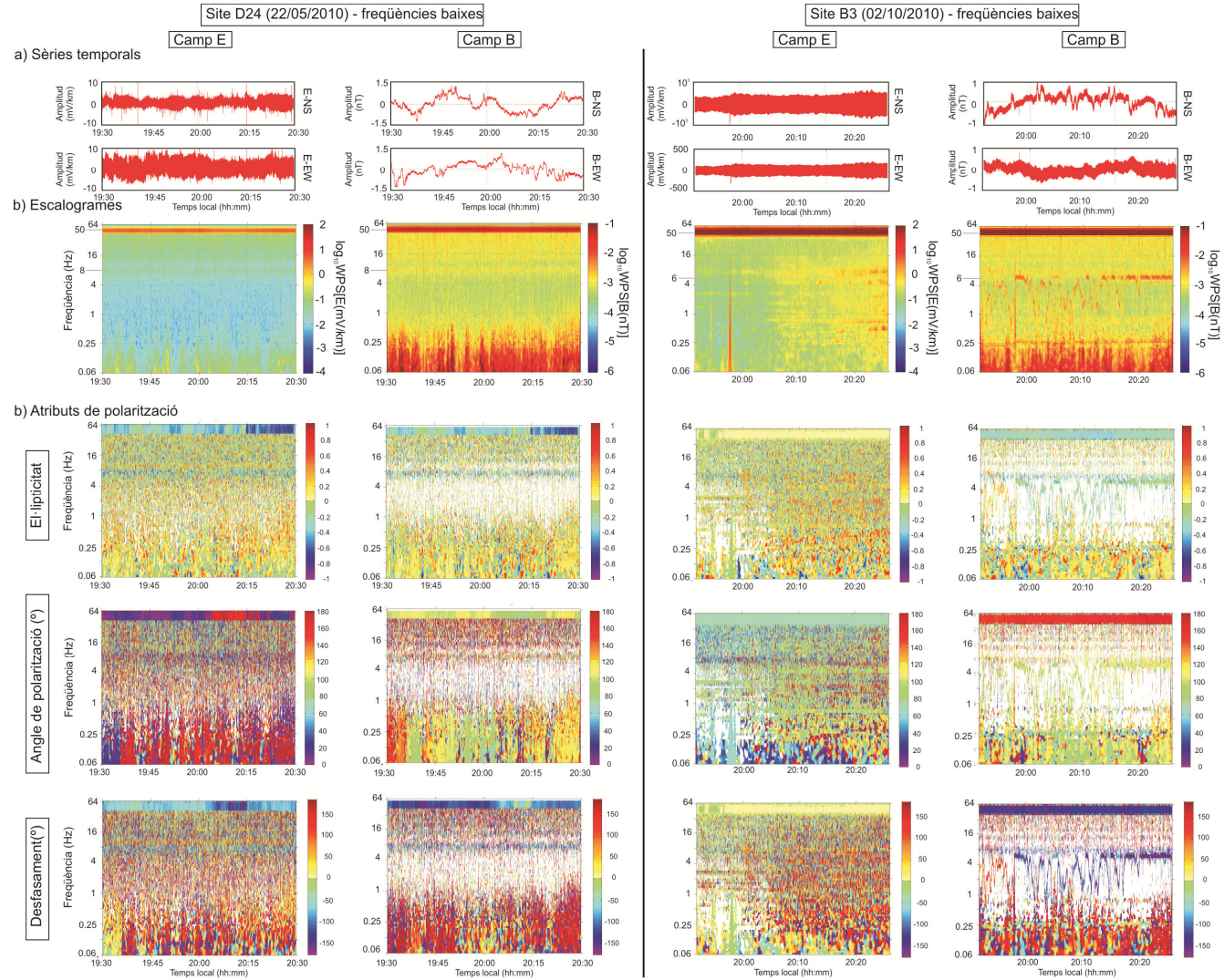


Figura 5.12 Hontomín. Sites D24 i B3. (a) Sèries temporals, (b) escalogrames i (c) atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic del senyal enregistrat a baixa freqüència (site D24 $f_m = 128 \text{ Hz}$, site B3 $f_m = 256 \text{ Hz}$).

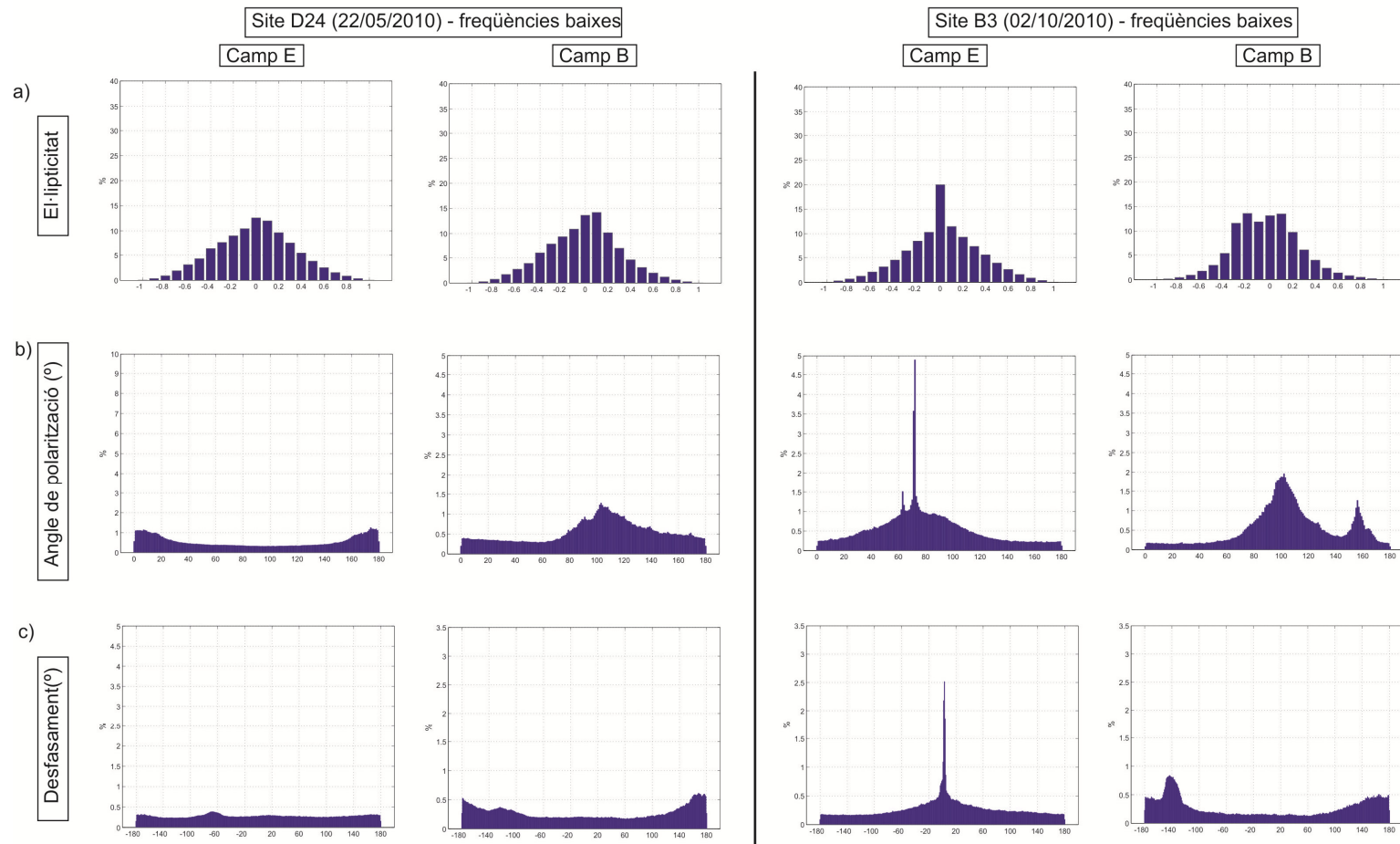


Figura 5.13 Hontomín. Sites D24 i B3. Histogrames dels atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic del senyal enregistrat a baixa freqüència (site D24 $f_m = 128 \text{ Hz}$, site B3 $f_m = 256 \text{ Hz}$), (a) el·liplicitat, (b) angle de polarització, (c) desfasament.

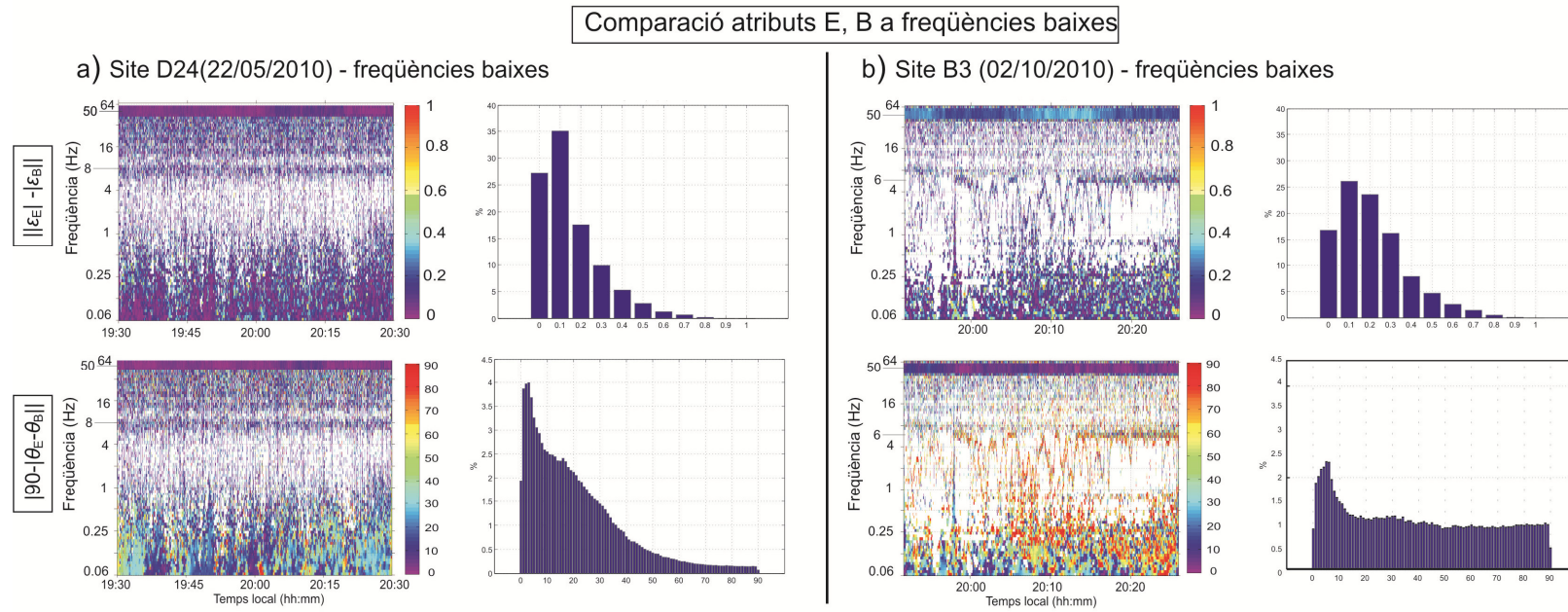


Figura 5.14 Hontomín. Comparació dels atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic pel senyal enregistrat a baixa freqüència en els sites (a) D24 ($f_m = 128 \text{ Hz}$), (b) B3 ($f_m = 256 \text{ Hz}$).

5.2.4. Conclusions Hontomín - soroll cultural

L'anàlisi de les sèries temporals MT enregistrades a Hontomín en els sites D24 i B3 amb diferents freqüències de mostreig ha permès detectar diversos senyals amb un estat de polarització concret en el domini (t-f), i determinar el caràcter natural o artificial de la seva font.

Quant a senyals artificials, s'ha caracteritzat el senyal creat per línies elèctriques i aerogeneradors, que constitueixen fonts de soroll cultural a determinades freqüències segons quina sigui la seva distància respecte els sites. Cal tenir en compte no tan sols el senyal que generen a la freqüència fonamental de la xarxa elèctrica, sinó també els harmònics, interharmònics i subharmònics que es poden crear en aquests sistemes ja que poden afectar les respostes MT a diferents rangs de freqüències. Els camps ***E*** i ***B*** creats per les línies elèctriques i els aerogeneradors depenen d'un gran nombre de paràmetres (secció 1.4.1.1), principalment relacionats amb la distribució dels fils conductors i de les seves fases, i poden variar en el temps per la demanda energètica i l'activitat eòlica. Per tant, l'angle de polarització dels camps no és únic en un determinat site proper a aquestes fonts, de manera que és gairebé impossible determinar la posició exacte d'un site respecte les línies elèctriques o els aerogeneradors a partir d'aquest atribut. Tot i així, l'anàlisi de l'el·lipticitat, el desfasament i l'ortogonalitat entre els camps ha permès estimar la zona (camp proper, transició, camp llunyà) en què es troba cada site respecte aquestes fonts de soroll.

Així mateix, s'ha observat el senyal artificial creat per la circulació de trens per vies fèrries electrificades amb CC i per l'activitat industrial, caracteritzats anteriorment a la secció 5.2.2. També s'han detectat les SR, senyal natural que s'analitza a la secció 6.2.

S'ha posat de manifest la utilitat de comparar el senyal MT en diversos sites d'una mateixa zona així com la necessitat de disposar de registres temporals llargs, que incloguin tant el dia com la nit, per avaluar les fonts de soroll que els contaminen.

Malgrat en aquest cas les respostes MT dels sites analitzats indiquen correctament el diferent nivell de soroll cultural que afecta cada site, no permeten identificar les fonts de soroll segons el rang de freqüència, a diferència dels resultats del codi MTWAVELETS.

L'anàlisi de l'energia i els atributs de polarització dels camps ***E*** i ***B*** en el domini (t-f) proposat en aquesta tesi s'ha mostrat com una nova eina útil per a la detecció i caracterització de les diferents fonts de soroll cultural que contaminen els sites D24 i B3. Una anàlisi de registres MT més llargs permetria determinar els intervals de temps en què cessa l'activitat dels aerogeneradors i la circulació de trens, i per tant seleccionar el domini (t-f) més adient per obtenir respostes MT lliures del soroll que causen aquestes fonts.

Capítol 6. Detecció i caracterització de senyals geomagnètics polaritzats.

A continuació es mostren els resultats obtinguts en l'anàlisi de senyals geomagnètics polaritzats, com són les pulsacions geomagnètiques del tipus Pc3 i les ressonàncies Schumann. S'identifiquen i caracteritzen aquests senyals en el domini (t-f) a partir de sèries temporals MT enregistrades a Tramutola i a Huidobro.

6.1. Tramutola - pulsacions geomagnètiques Pc3.

6.1.1. Introducció

6.1.1.1. Monitoratge de les respostes MT

Al site Tramutola (TRAM) ($40.297^{\circ}N$, $15.805^{\circ}E$, 700 m snm), situat a la regió de la Basilicata (Itàlia), hi ha instal·lada una estació MT permanent que mesura des de juliol de 2007 amb l'objectiu d'analitzar l'estabilitat de les respostes MT en funció del temps i la freqüència. Les sèries temporals MT s'enregistren mitjançant un equip MT24LF (EMI-Schlumberger) amb una freqüència de mostreig $f_m = 6.25\text{ Hz}$. Els dipòls elèctrics que mesuren les variacions del camp $\mathbf{E}$ estan orientats en les direccions NS i EW i tenen una longitud de 45 m , mentre que per mesurar les variacions del camp $\mathbf{B}$ en aquestes direccions i en la vertical s'utilitzen bobines d'inducció BF-4 (EMI-Schlumberger).

La localitat més propera a aquest site és Tramutola, un petit municipi (3150 habitants) situat a 2.5 km , mentre que la via fèrria més pròxima dista 50 km del site. Balasco et al. (2008) mostraren els resultats preliminars de l'anàlisi de cinc mesos de dades enregistrades durant l'any 2006, verificant que es tracta d'un site amb dades MT de molt bona qualitat.

Recentment, Romano et al. (2014) han presentat una anàlisi exhaustiva de les dades MT mesurades al site TRAM entre juliol de 2007 i novembre de 2011. Han calculat la resistivitat aparent i la fase en el rang de freqüències $[9.8 \cdot 10^{-4}\text{ Hz} - 1.35\text{ Hz}]$ (períodes $[0.74\text{ s} - 1022.75\text{ s}]$) amb el mètode de processat robust desenvolupat per Egbert i Booker (1986). Per obtenir les respostes de períodes inferiors a 68 s han utilitzat segments de sèries temporals de 24 h de durada, i per als períodes superiors a 68 s segments de 48 h . D'aquesta manera han obtingut sèries temporals de resistivitat aparent i fase per diferents freqüències dins d'aquest rang i pels més de quatre anys de monitoratge. La **Figura 6.1** mostra la mediana de la resistivitat aparent i fase obtingudes amb aquest procediment.

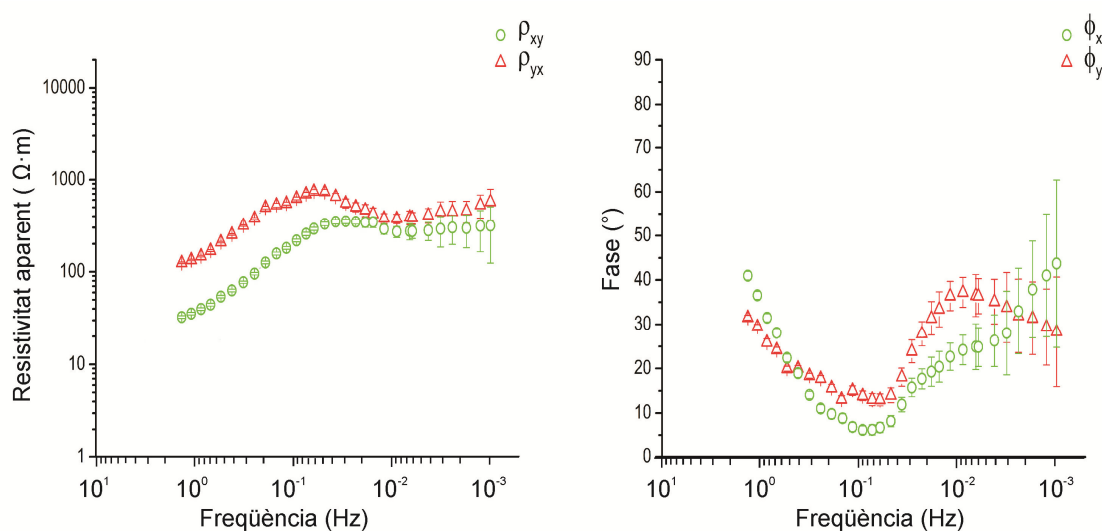


Figura 6.1. Site TRAM. Mediana de les respostes MT obtingudes en l'interval de monitoratge [juliol de 2007 - novembre de 2011]. Direccions: XY:NS, YX:EW.(Modificada de Romano et al., 2014).

6.1.1.2. Oscil·lació quasi-mensual de la resistivitat aparent i la fase en el rang de freqüències [0.004 Hz – 0.0625 Hz].

Mitjançant diverses tècniques estadístiques i d'anàlisi espectral, Romano et al. (2014) han detectat una oscil·lació quasi-mensual en la resistivitat aparent i la fase del site TRAM en el rang de freqüències [0.004 Hz – 0.0625 Hz] (períodes [16 s – 250 s]). En resum, els resultats que han obtingut són els següents:

- i. Han analitzat el comportament de la mediana de les respostes MT en funció de l'activitat geomagnètica global, determinada per l'índex A_p (**Figura 6.2**). Quan en el citat rang de freqüències l'activitat geomagnètica és alta ($A_p \geq 27$) la resistivitat aparent decreix i la fase augmenta respecte els valors que presenten quan l'activitat és moderada ($3 < A_p < 27$). En canvi, quan l'activitat geomagnètica és baixa ($A_p \leq 3$), la resistivitat aparent augmenta i la fase decreix.

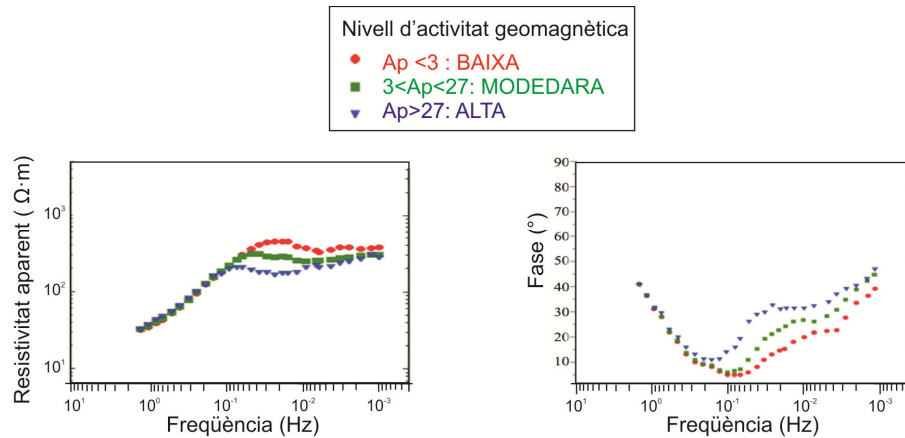


Figura 6.2. Site TRAM. Mediana de les respostes MT (direcció NS) en funció de l'índex d'activitat geomagnètica A_p . S'obtenen resultats anàlegs en la direcció EW. (Modificada de Romano et al., 2014).

- ii. La densitat de potència espectral (DPE) de la resistivitat aparent i la fase en aquest rang de freqüències presenten la mateixa periodicitat que l'índex A_p : 27 dies, 14 dies i 9 dies (Figures 5 i 6 de Romano et al. (2014)).
- iii. La possibilitat que l'origen de l'oscil·lació quasi-mensual sigui una font de soroll local l'han descartat aplicant la tècnica de la referència remota (Gamble, 1979) amb dades del site Campotense (CAMP), situat a 50 km de TRAM. Els resultats obtinguts amb aquesta tècnica són molt similars als obtinguts amb el processat únicament amb les dades del site TRAM, per tant no existeix una font de soroll local en aquest site.
- iv. L'aplicació del mètode "Robust multivariate errors in variables" (Egbert, 1997) suggereix la presència d'una font de soroll coherent a gran escala que contamina les dades dels sites TRAM i CAMP, o bé que el comportament de les fonts del senyal MT

no permet assumir la hipòtesi d'ona plana (secció 1.1.3). En qualsevol cas, l'anàlisi mostra una clara dependència de les respostes MT amb l'índex geomagnètic A_p .

- v. La circulació de trens per la via fèrria electrificada amb CC, situada a 50 km de TRAM, podria ser una font de soroll coherent a gran escala, malgrat per aquesta circulen tan sols menys de 30 trens durant el dia. Aquesta possibilitat s'ha descartat mitjançant l'anàlisi del vector *tipper* (secció 1.1.4). En canvi, aquest vector presenta també una dependència amb l'activitat geomagnètica quan s'analitza en funció de l'índex A_p (Figura 17 de Romano et al. (2014)).
- vi. Existeixen altres estudis en què s'ha observat una variació de les respostes MT en aquest rang de freqüències (Egbert et al., 2000; Kappler et al., 2010; Brändlein et al., 2012). En concret, Egbert et al. (2000) proposen la circulació de trens per una via fèrria electrificada amb CC i la presència de pulsacions geomagnètiques del tipus Pc3 (secció 1.1.2.1) com a l'origen de les fluctuacions. Romano et al. (2014), fent una anàlisi qualitativa dels resultats d'aquests estudis, han detectat que les variacions observades estan relacionades amb l'índex A_p i per tant amb l'activitat geomagnètica.

En definitiva, Romano et al. (2014) no han descartat totalment que una font de soroll coherent a gran escala sigui l'origen de l'oscil·lació quasi-mensual observada al site TRAM, però han demostrat que l'activitat geomagnètica té un paper clau en aquesta oscil·lació.

Els membres de l'IMAA i la Universitat de Bari, propietaris de les dades d'aquest site, han cedit al grup EXES les dades corresponents als mesos setembre, octubre i novembre de 2007 per intentar avaluar l'origen de l'oscil·lació amb el mètode proposat en aquesta tesi.

A continuació, com exemple dels resultats obtinguts amb el codi MTWAVELETS, es descriuen els corresponents al dia 30 d'octubre de 2007. S'han obtingut resultats anàlegs amb les dades d'altres dies, no obstant, aquest s'ha considerat el més representatiu per descriure'l en aquesta memòria.

Finalment, es mostra una anàlisi general dels escalogrames obtinguts amb els tres mesos de dades de què es disposa.

6.1.2. Segment 30/10/2007

6.1.2.1. Anàlisi (t-f) de l'energia i els atributs de polarització dels camps

Les sèries temporals dels camps ***E*** i ***B*** enregistrats al site TRAM el dia 30 d'octubre de 2007 es mostren a la **Figura 6.3**, juntament amb els respectius escalogrames i atributs de polarització en el rang de freqüències [0.004 Hz – 1.2 Hz]. En els escalogrames s'observa que hi ha un increment de l'energia d'ambdós camps entre les 05:00 i les 08:00 en el rang de freqüències [0.02 Hz – 0.04 Hz]. Aquest episodi no és visible fàcilment a les sèries temporals, tan sols s'observa un lleuger increment de la freqüència en el camp ***B***, en canvi sí que ho és en tots els atributs de polarització d'ambdós camps. A la regió (t-f) de l'episodi observat ([05:00 – 08:00] – [0.02 Hz – 0.04 Hz]) els atributs de polarització presenten uns valors gairebé constants, posant de manifest que l'esdeveniment que té lloc en aquesta regió té un estat de polarització determinat. En canvi, a la resta del domini (t-f) els atributs de polarització assoleixen tots els valors possibles dins el seu rang de variació, indicant que el senyal no té una polarització concreta, com és propi del senyal MT en general (secció 1.3.2).

A la **Figura 6.4** s'han representat novament els escalogrames dels camps, assenyalant amb un rectangle negre la regió (t-f) de l'esdeveniment. En aquesta figura també s'hi mostren els histogrames dels atributs de polarització, calculats només a la regió corresponent a l'esdeveniment seleccionat. Els histogrames indiquen que en aquesta regió el camp ***E*** presenta un estat de polarització lleugerament el·líptic i dextrogir (hi ha un pic d'el·lipticitat al voltant del valor $\varepsilon_E \approx 0.2$), amb un angle de polarització dins l'interval $30^\circ < \theta_E < 50^\circ$ i desfasament entre els components $10^\circ < \Delta\theta_E < 60^\circ$. El camp ***B*** també està polaritzat el·lípticament en sentit dextrogir ($\varepsilon_B \approx 0.3$), el seu angle de polarització està dins l'interval $135^\circ < \theta_B < 160^\circ$ i el desfasament és $120^\circ < \Delta\theta_B < 160^\circ$.

La comparació dels atributs de polarització dels camps ***E*** i ***B*** es mostra a la **Figura 6.5**, en aquest cas s'ha representat amb un requadre blanc la regió [05:00 – 08:00]-[0.02 Hz – 0.04 Hz]. Els histogrames mostren només els valors en aquesta regió, associada a l'esdeveniment observat. L'histograma de la diferència d'el·lipticitat dels camps presenta la major part de valors dins l'interval $0.1 < |\Delta\varepsilon_{EB}| < 0.2$, mentre que l'histograma de la desviació de l'angle entre els camps respecte l'ortogonalitat indica que predominen els valors $0^\circ < |90 - \theta_{EB}| < 10^\circ$. És a dir, els camps ***E*** i ***B*** tenen una el·lipticitat lleugerament diferent durant l'esdeveniment observat, i són gairebé ortogonals. Aquest, però, és el comportament general del senyal en tot el domini t-f, no tan sols a la regió de l'esdeveniment. Per tant, la comparació dels atributs dels camps ***E*** i ***B*** en el domini (t-f) no permet identificar l'esdeveniment.

Tenint en compte el rang de freqüències de l'esdeveniment, la seva durada i el seu estat de polarització, sembla que es tracta d'una pulsació geomagnètica del tipus Pc3 (seccions 1.1.2.1 i 1.3.2).

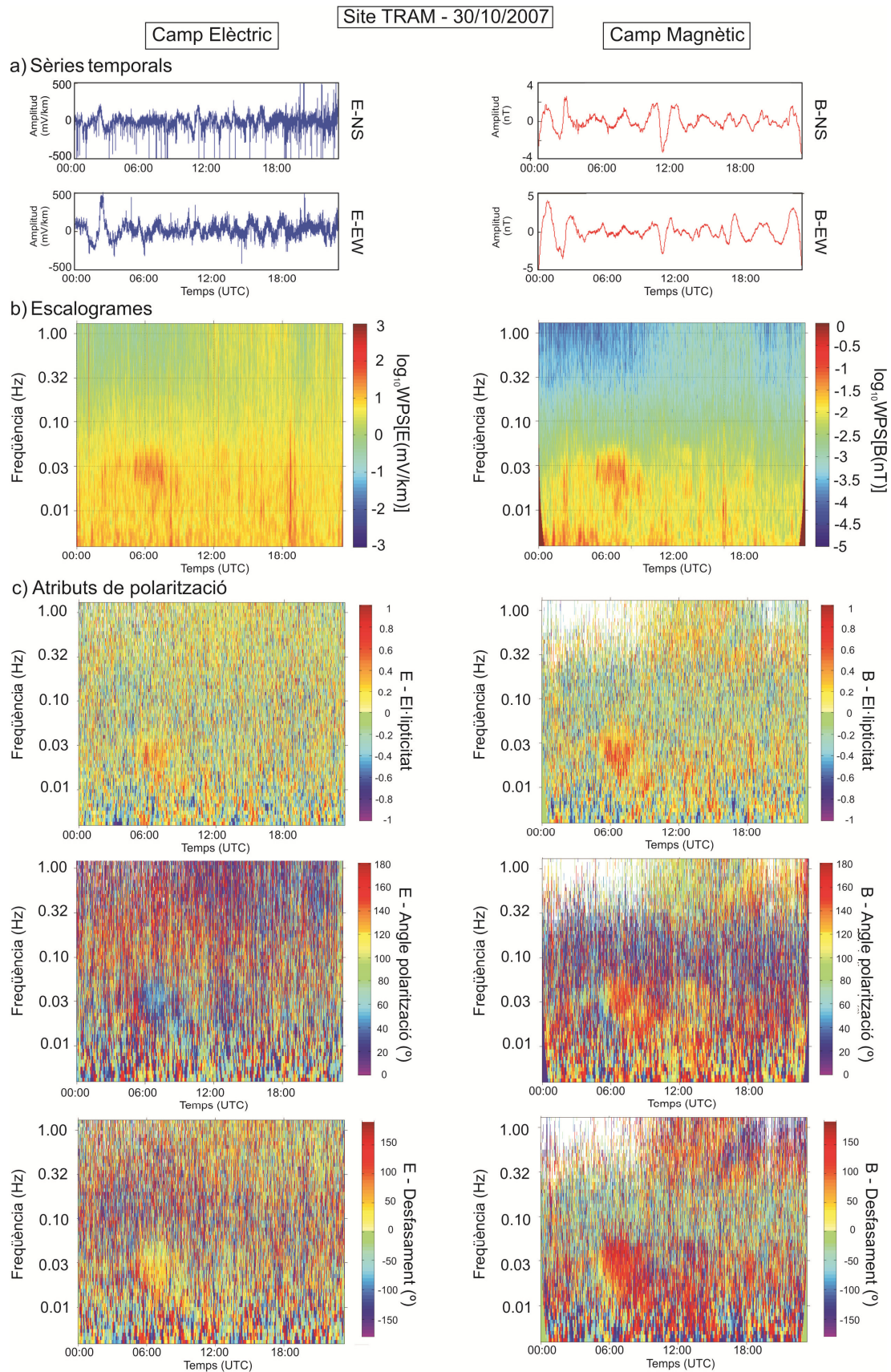


Figura 6.3. Site TRAM, (a) sèries temporals, (b) escalogrames, (c) atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic.

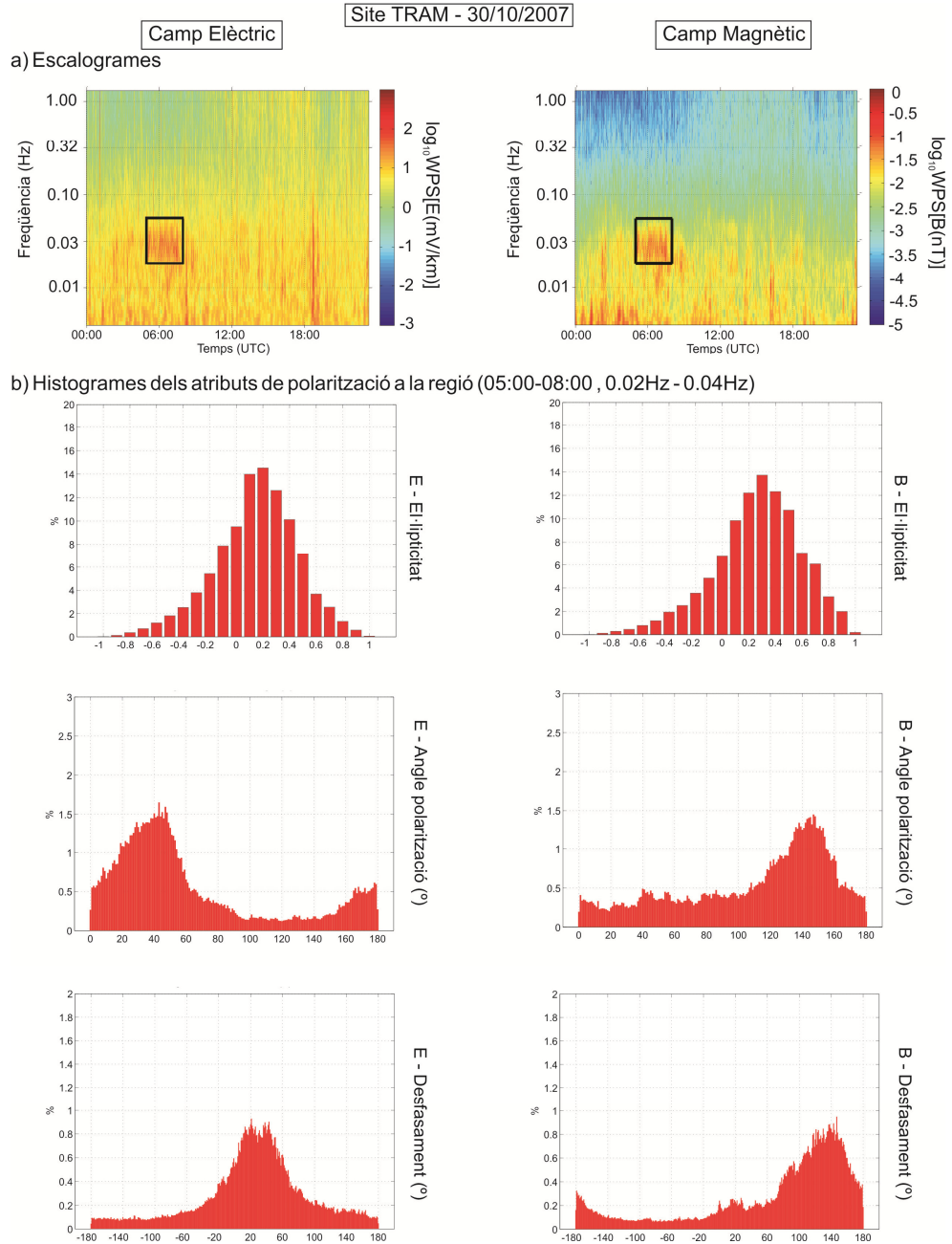


Figura 6.4. Site TRAM. (a) escalogrames dels camps elèctric i magnètic, el requadre negre indica la regió $[5 h - 8 h] - [0.02 Hz - 0.04 Hz]$, (b) histogrames dels atributs de polarització a la regió indicada en els escalogrames.

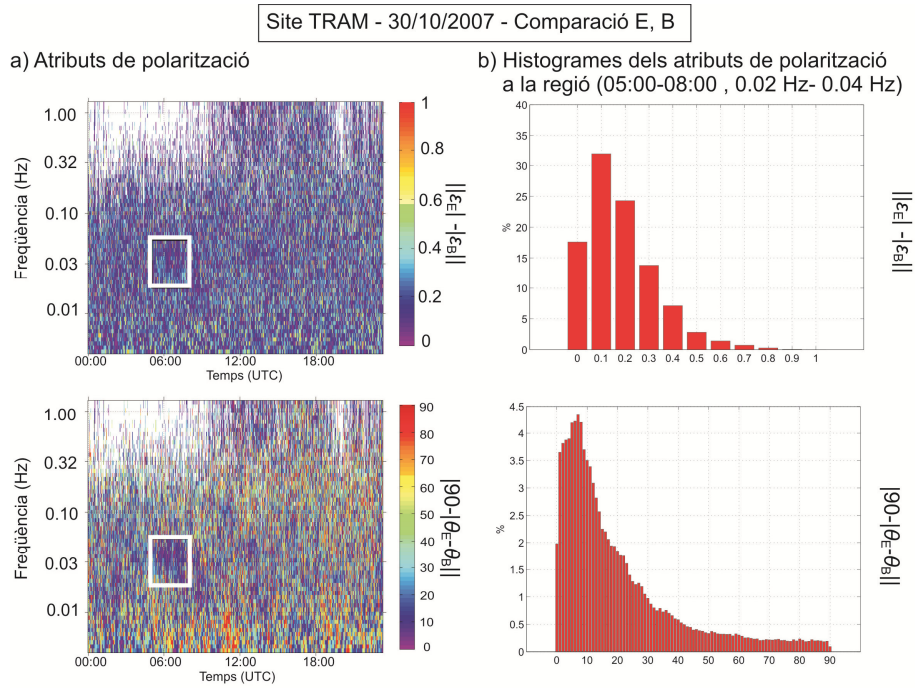


Figura 6.5. Site TRAM. (a) Comparació dels atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic, el requadre blanc indica la regió [5 h – 8 h] – [0.02 Hz – 0.04 Hz], (b) histogrames dels atributs a la regió indicada pel requadre.

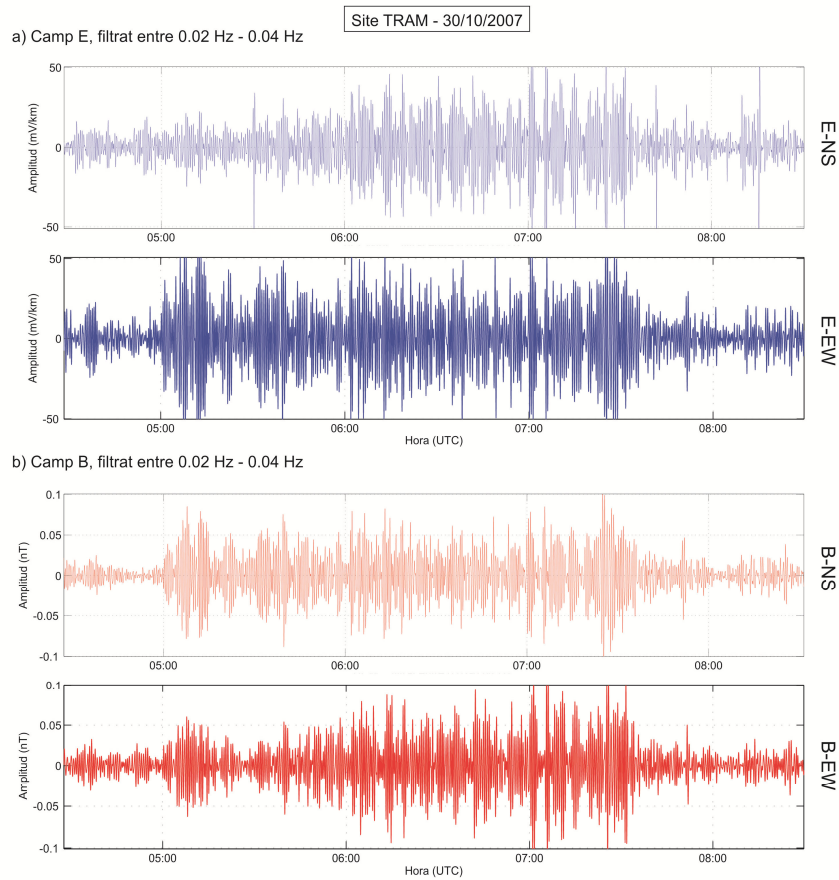


Figura 6.6. Site TRAM. Sèries temporals dels camps elèctric i magnètic de l'esdeveniment observat ([05:00 – 08:00]) filtrades en el rang de freqüències [0.02 Hz – 0.04 Hz].

A la **Figura 6.6** s'ha representat el segment de les sèries temporals dels camps corresponent a l'esdeveniment ([05:00 – 08:00]), filtrades en el seu rang de freqüències característic, [0.02 Hz – 0.04 Hz]. Aquesta figura posa de manifest el caràcter oscil·latori i continu de l'esdeveniment, que sembla format per distints “batecs”. Aquesta forma és típica de les pulsacions geomagnètiques del tipus Pc3, que poden oscil·lar en el rang de freqüències [0.022 Hz – 0.1 Hz] i tenir una durada de diversos minuts o d'hores (secció 1.1.2) (Lanzerotti et al., 1981; Vellante et al., 1989).

6.1.2.2. Comparació dels resultats obtinguts amb el codi MTWAVELETS amb altres estudis sobre les pulsacions Pc3

L'estat de polarització del camp **B** de les pulsacions Pc3 s'estudia habitualment en molts observatoris geomagnètics (secció 1.3.2). L'Observatori de l'Aquila és el més proper al site TRAM (disten aproximadament 220 km en direcció NS, 180 km en direcció EW), i és un referent en l'anàlisi de les pulsacions Pc3. Cal destacar l'estudi publicat recentment per Villante i Tiberi (2015), en què s'analitzen 28 anys de registres (1985-2012) de pulsacions Pc3 a l'Aquila.

A continuació es comparen les característiques del camp **B** de les pulsacions Pc3 detectades a l'Observatori de l'Aquila amb les característiques de l'esdeveniment detectat al site TRAM el 30/10/2007 en el rang [05:00 – 08:00 UTC] – [0.02 Hz – 0.04 Hz].

- **Freqüència**
 - L'Aquila: en anys de baixa activitat solar, és $f \leq 0.045$ Hz (Villante et al., 1999; Villante i Tiberi, 2015).
 - TRAM: el segment del 30/10/2007, dos anys després del mínim del cicle solar 23 i en un període d'activitat solar reduïda, té una freqüència predominant en el rang [0.02 Hz – 0.04 Hz].
- **El·lipticitat**
 - L'Aquila: durant el matí, en general el sentit de gir és levogir (en el 60% dels casos aproximadament). No obstant, entre les 05:00 i les 08:00 (UTC) el sentit no està gaire definit: un 50% de les Pc3 presenten un sentit de gir dextrogir, i l'altre 50% sentit levogir. El valor de l'el·lipticitat és al voltant de $\varepsilon_B \approx 0.3$ entre les 06:30 i les 14.30 (temps universal coordinat, UTC) (Villante et al., 2002; Villante i Tiberi, 2015).
 - TRAM: l'el·lipticitat és positiva (sentit de gir dextrogir) i amb un valor al voltant de $\varepsilon_B \approx 0.3$.
- **Angle de polarització**
 - L'Aquila: durant el matí està orientat en la direcció NW-SE (Villante et al., 1999; Villante i Tiberi, 2015).
 - TRAM: està dins l'interval $135^\circ < \theta_B < 160^\circ$, per tant en la direcció NW-SE.

És a dir, el camp $\mathbf{B}$ de l'esdeveniment detectat al site TRAM presenta el mateix rang de freqüències, valor absolut de l'el·lípticitat, sentit de gir i orientació de l'angle de polarització que el camp $\mathbf{B}$ de les pulsacions Pc3 detectades a l'Aquila en el mateix interval de temps. Per tant, els resultats obtinguts amb el codi MTWAVELETS suggereixen que el senyal detectat és una pulsació geomagnètica del tipus Pc3.

6.1.2.3. Anàlisi de l'activitat geomagnètica

L'ocurrència, l'amplitud i la freqüència de les pulsacions Pc3 van lligats a l'activitat geomagnètica. En concret, estan relacionats amb la velocitat del vent solar, l'amplitud de l'IMF (B_{IMF}) i la seva direcció (*cone angle*, θ_{IMF} , secció 1.1.2.1). Per avaluar amb més detall la possibilitat de què l'esdeveniment detectat al site TRAM el dia 30/10/2007 en el rang [05:00 – 08:00 UTC] – [0.02 Hz – 0.04 Hz] sigui una pulsació Pc3, la **Figura 6.7** mostra l'evolució d'aquestes magnituds durant els dies 29 i 30/10/2007. Les dades varen ser mesurades pels satèl·lits ACE i WIND, amb una freqüència de mostreig d'una dada per minut (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>). En color gris s'ha marcat l'interval de temps de l'esdeveniment.

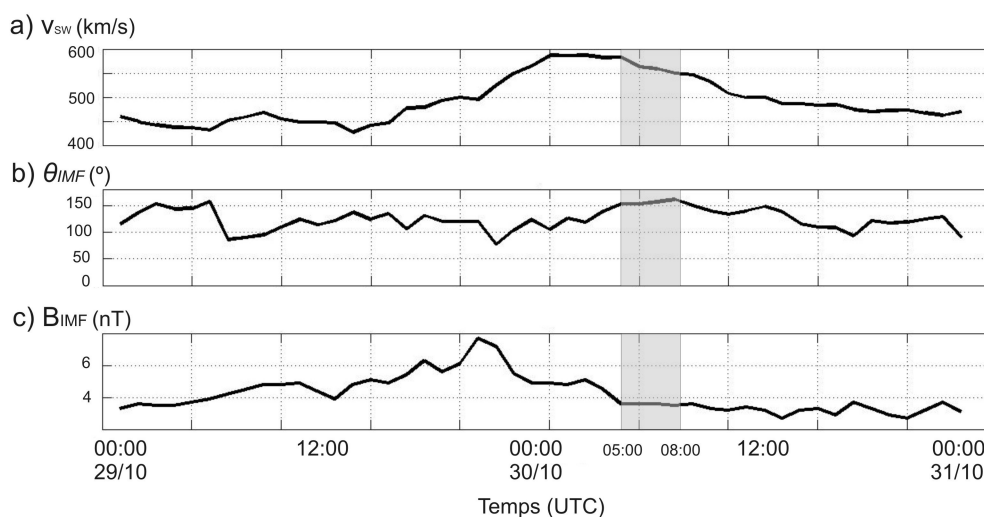


Figura 6.7 (a) Velocitat del vent solar, (b) *cone angle*, (c) amplitud de l'IMF. En color gris s'indica la franja horària [05:00 – 08:00] del dia 30.

Entre les 05:00 i les 08:00 UTC del dia 30 la velocitat del vent solar és $v \approx 555 \text{ km/s}$ mentre que el *cone angle* és $\theta_{IMF} \approx 150^\circ$. Ambdós valors, velocitat elevada del vent solar i IMF orientat gairebé en la direcció Sol-Terra, van lligats a una gran probabilitat d'ocurrència i major amplitud de les pulsacions Pc3 (secció 1.1.2.1).

En aquest interval de temps l'amplitud de l'IMF és aproximadament $B_{IMF} \approx 7.7 \text{ nT}$. La freqüència de les Pc3 es relaciona amb aquest valor segons l'expressió (1.1). D'aquesta manera, la freqüència teòrica de les pulsacions seria $f = 0.046 \text{ Hz}$. L'esdeveniment detectat té la major energia dins l'interval [0.02 Hz – 0.04 Hz], que no dista gaire de la freqüència calculada teòricament. Cal remarcar, a més, que l'expressió (1.1) és empírica, per tant s'hauria de determinar de manera més concreta pel site TRAM.

6.1.2.4. Respostes magnetotel·lúriques

Amb l'objectiu d'analitzar l'efecte que pot causar l'esdeveniment detectat sobre les respostes MT, s'han calculat aquestes a partir de dos segments de sèrie temporal diferents, el segment A: [04:00 – 08:00] i el segment B: [16:00 – 20:00] (**Figura 6.8**). Les dades del segment A inclouen l'esdeveniment detectat en el rang [05:00 – 08:00] – [0.02 Hz – 0.04 Hz]. Cal tenir en compte que els segments A i B són de curta durada, (4 h), per aquest motiu l'error de les respostes MT és considerable per les freqüències més baixes. No obstant, en el rang [0.02 Hz – 0.04 Hz] (períodes [25 s – 50 s]) s'observa una diferència clara entre la resistivitat i la fase d'ambdós segments. En aquest rang la resistivitat aparent és menor i la fase és major durant el segment A que durant el segment B. És a dir, en el rang de l'esdeveniment observat [05:00 – 08:00] – [0.02 Hz – 0.04 Hz], la resistivitat aparent decreix i la fase augmenta. Aquest comportament de les respostes MT és el mateix que han observat Romano et al. (2014) en el rang de freqüències [0.004 Hz – 0.0625 Hz] (períodes [16 s – 250 s]) quan l'activitat geomagnètica augmenta (**Figura 6.2**). En el cas del dia 30/10/2007, l'activitat geomagnètica era moderada ($A_p = 10$).

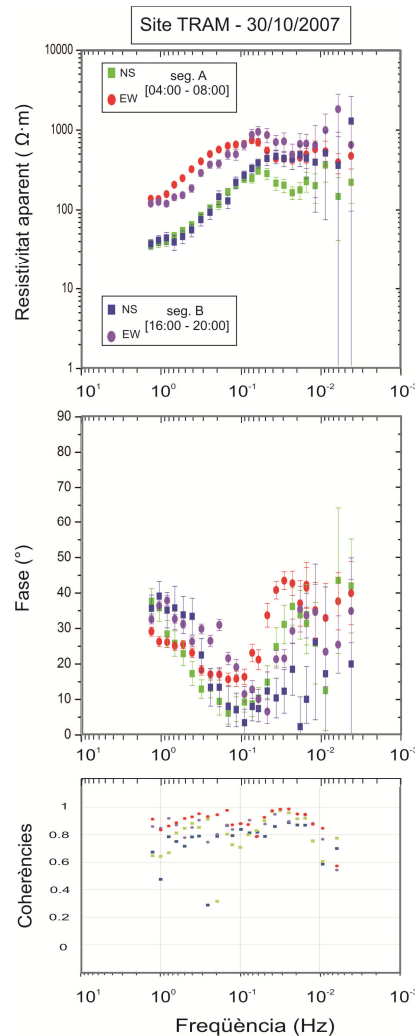


Figura 6.8. Site TRAM. Respostes MT del dia 30/10/2007: resistivitat aparent, fase i coherències ordinàries pels segments A [04:00 – 08:00] i B [16:00 – 20:00]. (Escalas et al., en prep.)

Per tant, segons els resultats obtinguts a les seccions 6.1.2.1 i 6.1.2.3 i la variació de les respostes MT observada, tot sembla indicar que una de les causes de les variacions observades per Romano et al. (2014) poden ser les pulsacions Pc3.

6.1.3. Setembre - novembre 2007

Per avaluar la relació entre el senyal MT enregistrat al site TRAM i l'activitat geomagnètica durant un llarg interval de temps, s'ha comparat la DPE de l'amplitud dels camps **E** i **B** amb la de la velocitat del vent solar durant els mesos setembre, octubre i novembre de 2007.

En primer lloc, a partir de les sèries temporals MT s'han calculat amb el codi MTWAVELETS els escalogrames dels components dels camps (E_{NS} , E_{EW} , B_{NS} , B_{EW}). A continuació s'ha considerat l'escalograma obtingut per a cada freqüència com una nova sèrie temporal, i s'ha calculat la seva DPE. Tenint en compte que les sèries temporals no són completament contínues sinó que hi ha segments que s'han eliminat a causa de problemes instrumentals, la DPE s'ha calculat mitjançant el mètode dels periodogrames de Lomb (Lomb, 1976) ja que permet treballar amb aquest tipus de sèries. Per facilitar la interpretació dels resultats s'han agrupat les DPE obtingudes per bandes de freqüència i s'ha calculat la DPE mediana de cada banda. És el mateix tipus d'anàlisi que el realitzat per Romano et al. (2014) amb les sèries temporals de resistivitat aparent i fase. Pel que fa a la DPE de la velocitat del vent solar, s'ha calculat a partir de les sèries temporals d'1 dada per minut mesurades pels satèl·lits WIND i ACE (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>).

La **Figura 6.9** mostra els periodogrames obtinguts, en color vermell la DPE de la velocitat del vent solar, i en color blau la DPE calculada a partir dels escalogrames dels camps **E** i **B** en el rang de freqüències $[0.02 \text{ Hz} - 0.04 \text{ Hz}]$. Tant la DPE de la velocitat del vent solar com la dels escalogrames dels camps presenten quatre pics coincidents entorn de les periodicitats 26-29 dies, 14 dies, 9 dies, 7 dies, i 4.7 dies. El pic que apareix a la periodicitat d'1 dia és causat pel processat dels escalogrames a partir de segments d'1 dia de durada i els efectes del con d'influència (secció 2.3.2.3). La periodicitat dominant és la de 26-29 dies, és la que té el pic més elevat en els periodogrames. Posa de manifest la influència del Sol, que té un període de rotació de 27 dies (secció 1.1.2), sobre l'energia dels camps **E** i **B** en el rang de freqüències $[0.02 \text{ Hz} - 0.04 \text{ Hz}]$ i sobre la velocitat del vent solar. De fet, la resta de pics corresponen als sub-períodes de la rotació solar. Les periodicitats trobades en aquesta anàlisi són les mateixes que les detectades per Pilipenko et al. (2008) per l'amplitud de les pulsacions Pc3, la velocitat del vent solar i els paràmetres de l'IMF. A més, existeixen nombrosos estudis sobre la relació entre les pulsacions Pc3, els paràmetres del vent solar i de l'IMF (secció 1.1.2) en els quals sempre es fa palès el període de recurrència de 27 dies.

Seria convenient analitzar els periodogrames dels escalogrames dels camps mesurats durant el registre complet del site TRAM fins a l'actualitat. Així i tot, els resultats obtinguts amb l'anàlisi dels 3 mesos reforcen la hipòtesi que els esdeveniments detectats en el rang de freqüències $[0.02 \text{ Hz} - 0.04 \text{ Hz}]$ són pulsacions geomagnètiques del tipus Pc3.

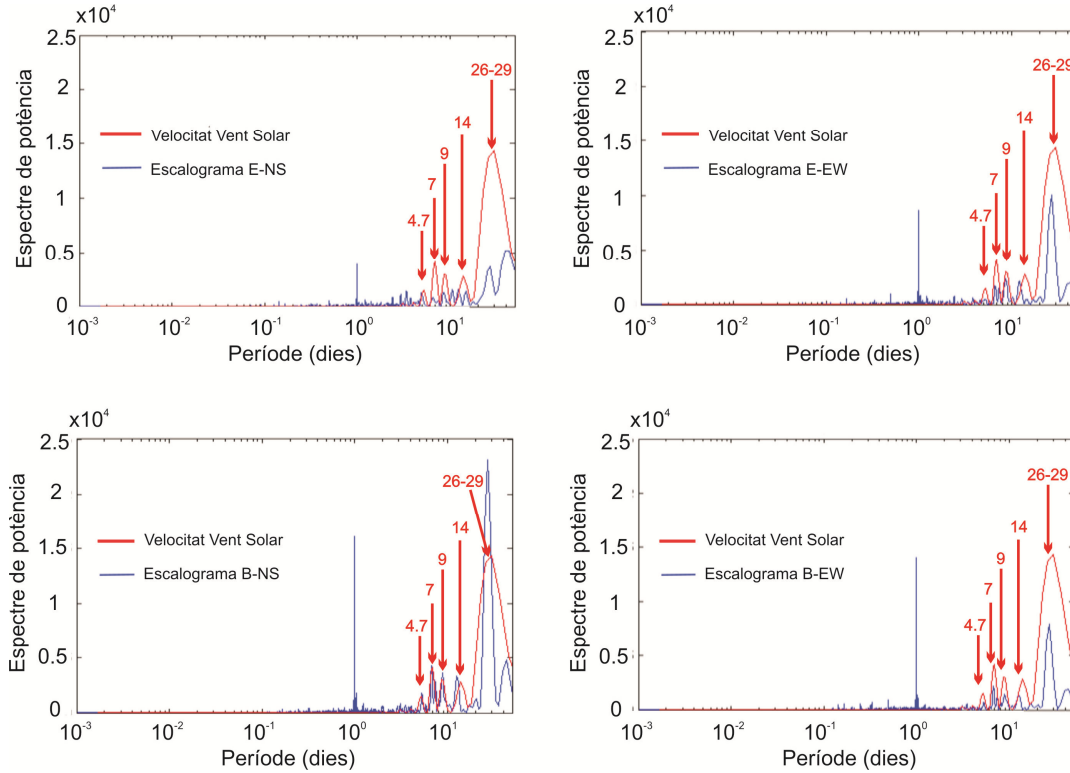


Figura 6.9. Site TRAM. Densitat de potència espectral dels escalogrames dels camps E i B en el rang de freqüències $[0.02 \text{ Hz} - 0.04 \text{ Hz}]$ comparada amb la DPE de la velocitat del vent solar. S'han calculat mitjançant el mètode dels periodogrames de Lomb a partir de les dades dels mesos setembre, octubre i novembre de 2007. (Escalas et al., en prep.)

6.1.4. Conclusions Tramutola – pulsacions geomagnètiques Pc3

Mitjançant el codi MTWAVELETS s'han analitzat les sèries temporals enregistrades al site TRAM durant els mesos setembre, octubre i novembre de 2007, per intentar determinar l'origen de l'oscil·lació quasi-mensual observada per Romano et al.(2014) en les respostes MT en el rang de freqüències $[0.004 \text{ Hz} - 0.0625 \text{ Hz}]$.

En el registre del dia 30/10/2007 s'ha detectat un esdeveniment en el domini (t-f) $[05:00 - 08:00] - [0.02 \text{ Hz} - 0.04 \text{ Hz}]$ que per la seva durada, freqüència predominant i atributs de polarització s'ha identificat com una pulsació geomagnètica del tipus Pc3. En concret, les característiques del camp **B** d'aquest esdeveniment són les mateixes que les de les pulsacions Pc3 detectades habitualment a l'Observatori geomagnètic de l'Aquila, molt proper al site TRAM. A més, l'anàlisi de l'activitat geomagnètica mostra que tant la velocitat del vent solar com la direcció i l'orientació de l'IMF durant el dia 30/10/2007 són favorables a la creació de pulsacions Pc3. D'altra banda, les respostes MT a la regió (t-f) de l'esdeveniment detectat presenten el mateix tipus de variació que l'observada per Romano et al. (2014) en el rang de freqüències $[0.004 \text{ Hz} - 0.0625 \text{ Hz}]$. S'han detectat nombrosos esdeveniments semblants al del dia 30/10/2007 a les sèries temporals dels tres mesos analitzats, que no es mostren en aquesta memòria.

Mitjançant els periodogrames de Lomb s'ha observat que la periodicitat de l'energia dels camps ***E*** i ***B*** mesurats entre setembre i novembre de 2007 és la mateixa que la del vent solar en el rang de freqüències [0.02 Hz – 0.04 Hz], i coincideix segons la bibliografia amb la recurrència de l'amplitud de les pulsacions Pc3 i els paràmetres de l'IMF.

En vista dels resultats obtinguts es proposa que l'oscil·lació quasi-mensual de les respostes MT del site TRAM observada per Romano et al. (2014) a l'interval [0.004 Hz – 0.0625 Hz] és causada, en part, per les pulsacions geomagnètiques del tipus Pc3 en el seu rang de freqüències característic. Amb l'anàlisi dut a terme no s'ha detectat cap font de soroll cultural que pugui contaminar les sèries temporals.

De manera més general, se suggereix l'anàlisi de l'energia i dels atributs de polarització dels camps ***E*** i ***B*** en el domini (t-f) com a eina útil per a la detecció i caracterització de les pulsacions Pc3 a partir de les sèries temporals MT. En primer lloc, perquè tenint en compte que les característiques d'aquests senyals van lligats als seus mecanismes de creació, el seu estudi proporciona informació sobre la interacció entre el vent solar i la magnetosfera (secció 1.1.2.1). La major part de les anàlisis de les pulsacions Pc3 es realitzen a partir del camp ***B*** enregistrat en observatoris geomagnètics. S'identifiquen habitualment en el domini espectral (Ponomarenko et al., 2002; De Lauretis et al., 2010; Zelinskiy et al., 2014), i el seu estat de polarització s'obté en funció de la freqüència durant un determinat segment de temps (Villante i Tiberi, 2015). En aquesta memòria, però, s'ha mostrat que les pulsacions Pc3 també es poden detectar a les sèries temporals MT del camp ***E***, i tant la seva energia com el seu estat de polarització s'han analitzat en el domini t-f. Tenint en compte la gran variabilitat de l'estat de polarització de les pulsacions Pc3 durant el dia i les estacions de l'any, l'anàlisi proposat és potencialment molt útil.

En segon lloc, perquè la variació de les respostes MT (resistivitat aparent i fase) causada per les pulsacions Pc3 és un fet que cal tenir en compte en l'aplicació del mètode MT. Egbert et al. (2000) i Eisel i Egbert (2001) també han suggerit les pulsacions Pc3 com el motiu de variacions detectades en les funcions de transferència magnètica entre estacions. En tractar-se de senyals que no són continus en el temps, les Pc3 no es poden considerar sempre com una font totalment estacionària pel senyal MT, ja que la hipòtesi d'ona plana (secció 1.1.3) no es verifica completament. És evident doncs que cal avançar en l'estudi del seu efecte sobre les respostes MT.

6.2. Huidobro – Ressonàncies Schumann

6.2.1. Introducció

Les ressonàncies Schumann (SR) són senyals naturals que, per la seva continuïtat en el temps i la freqüència, es poden considerar com una font estacionària del senyal MT (secció 1.1.2.2). Malgrat les SR són presents a totes les mesures MT, són distingibles més fàcilment en els espectres de freqüència quan les sèries temporals no estan afectades per soroll cultural.

En el processat de les dades MT d'Hontomín per a l'obtenció del model geoelèctric (Ogaya et al., 2013; 2014) es va utilitzar el site 99 d'Huidobro com a estació de referència remota (Gamble, 1979), ja que les respostes MT en aquest site són de molt bona qualitat per freqüències superiors a 0.1 Hz. En concret, les corbes de resistivitat aparent i fase varien de manera suau amb la freqüència i les coherències són elevades (**Figura 6.10**). Per aquest mateix motiu s'han escollit les sèries temporals mesurades en aquest site per analitzar les SR, ja que no hi ha indicis de soroll cultural en el rang de freqüències corresponent a aquests senyals ($f \approx 8, 14, 20, 26$ Hz).

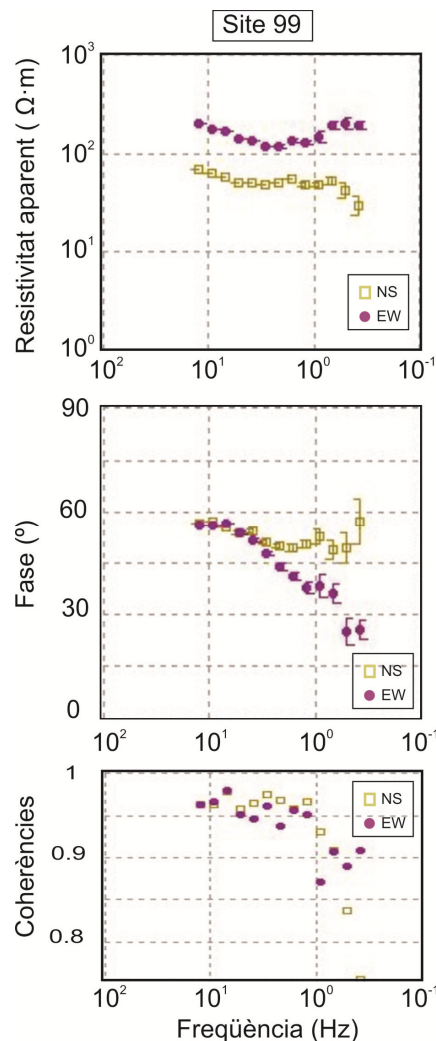


Figura 6.10. Huidobro, site 99. Respostes MT (resistivitat aparent, fase i coherències múltiples) d'un registre de 48 h.

El site 99 estava situat a la localitat Huidobro (5 habitants l'any 2008), 20 km al Nord d'Hontomín i a una distància de 40 km de la via fèrria més propera (**Figura 5.7-a**). Les sèries temporals MT es van enregistrar amb una estació ADU-06 (Metronix), amb una freqüència de mostreig $f_m = 64 \text{ Hz}$. Les variacions dels camps es varen mesurar en les direccions NS i EW; en el cas del camp **E** amb dipols elèctrics de 40 m de longitud, i en el cas del camp **B** amb bobines d'inducció. Es disposa de dos registres continus de durada considerable: un registre de 10 dies mesurat el maig de 2010, i un de 3 setmanes obtingut entre setembre i octubre de 2010.

A continuació es mostra l'anàlisi dut a terme amb el codi MTWAVELETS de dos segments de poc més d'1 hora de les sèries temporals enregistrades el maig de 2010. Un dels segments es va mesurar durant el dia ([13:00 – 14:08], 26/05/2010), i l'altre durant la nit ([01:24 – 02:32], 28/05/2010). D'ara endavant s'anomenaran segment "DIA" i segment "NIT".

6.2.2. Anàlisi (t-f) de l'energia dels camps

Les sèries temporals i escalogrames dels camps **E** i **B** dels segments DIA i NIT es mostren a la **Figura 6.11**. En els escalogrames s'hi observa un increment continu de l'energia dels senyals en tres rangs de freqüència, per ambdós components (NS i EW) d'ambdós camps (**E** i **B**). El rang 1, assenyalat en color blau, correspon a l'interval de freqüències [7 Hz – 9 Hz]. El rang 2 (color vermell), indica l'interval [12 Hz – 16 Hz], mentre que el rang 3 (color verd) fa referència a l'interval [19 Hz – 28 Hz]. Per la continuïtat dels senyals en el temps i les seves freqüències característiques és evident que es tracta de les SR (secció 1.1.2.2). El senyal detectat en el rang 1 correspon al 1r mode de les SR ($f \approx 8 \text{ Hz}$), el del rang 2 correspon al 2n mode ($f \approx 14 \text{ Hz}$), i el senyal del rang 3 inclou el 3r i el 4t modes de les SR ($f \approx 20 \text{ Hz}$ i $f \approx 26 \text{ Hz}$, respectivament). Aquests dos últims modes només són distingibles visiblement a l'escalograma del component E_{EW} del segment NIT. En el domini del temps, observant les sèries temporals no és possible identificar cap de les SR detectades en els escalogrames.

Comparant els escalogrames dels camps s'observen les següents característiques a les freqüències de les SR:

- l'energia dels camps **E** i **B** és major en el segment DIA que en el segment NIT;
- comparant els components de cada camp, és major l'energia dels components E_{EW} i B_{NS} que la dels components E_{NS} i B_{EW} ;
- en el camp **E** l'energia del 1r mode de les SR és inferior a la dels altres modes, en canvi en el camp **B** l'energia del 1r mode és lleugerament superior a la dels altres;
- la freqüència de cada mode de les SR varia lleugerament amb el temps, com posa de manifest la posició del màxim de cada banda que apareix en els escalogrames;

La variació d'amplitud (energia) i de la freqüència de les SR en cada un dels components dels camps al llarg del dia està lligada a la localització espacial i temporal dels principals centres

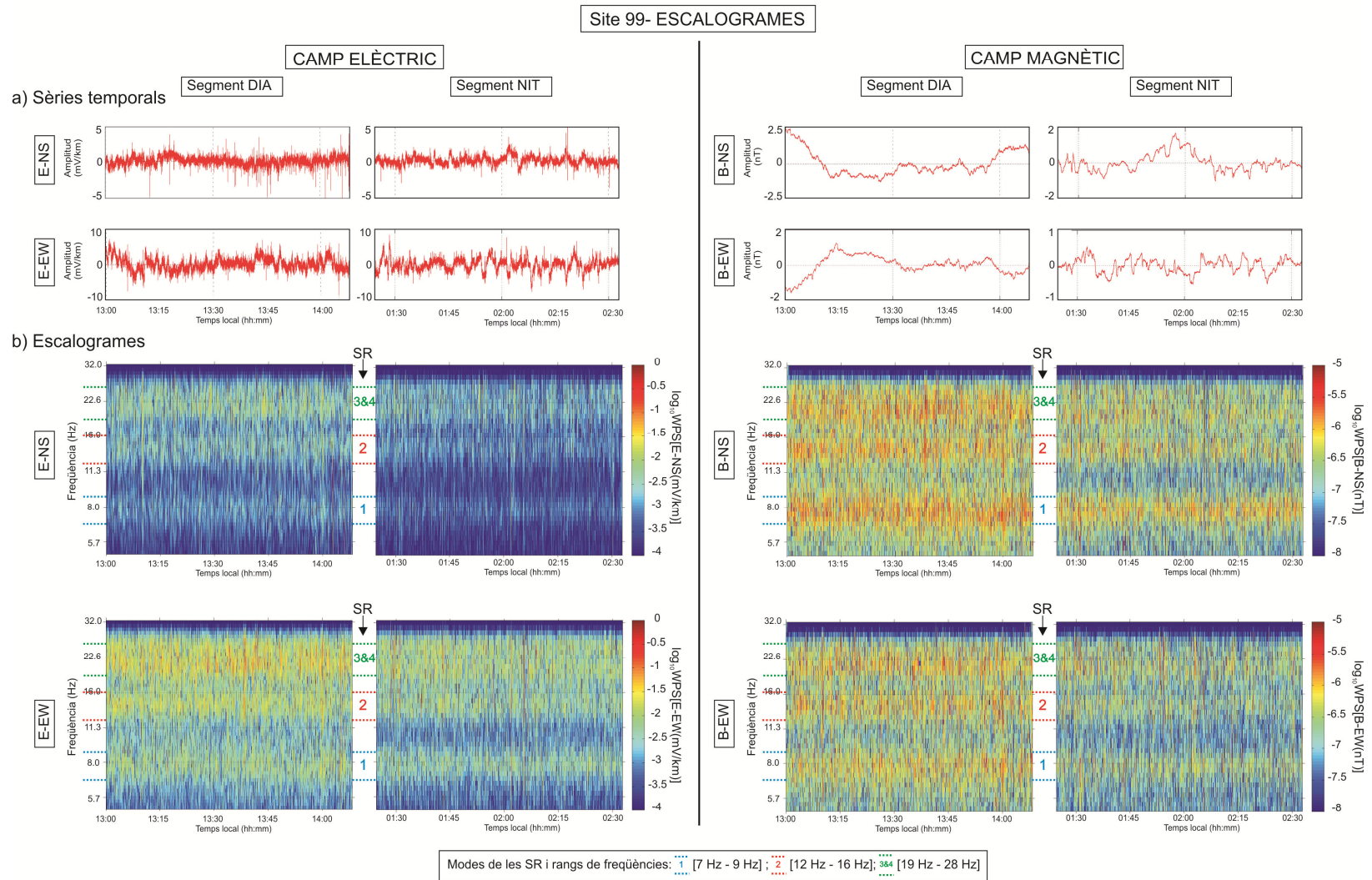


Figura 6.11. Huidobro. Site 99. (a) Sèries temporals, (b) escalogrames dels camps elèctric i magnètic. En els escalogrames s'indiquen els rangs de freqüències que inclouen les SR, (1r mode, $f \approx 8 \text{ Hz}$, 2n mode $f \approx 14 \text{ Hz}$, 3r mode $f \approx 20 \text{ Hz}$, 4t mode $f \approx 26 \text{ Hz}$).

de tempestes al món (secció 1.1.2.2). Concretament, les observacions extretes dels escalogrames del site 99 coincideixen amb les descrites per Chand et al. (2009) en l'anàlisi de les SR a partir de dades MT de l'Índia. En el seu treball comparen l'amplitud i la freqüència del 1r, 2n i 3r mode de les SR detectades en els components horitzontals dels camps ***E*** i ***B***. En concret, comparen els espectres de Fourier de segments d'1 hora enregistrats durant la sortida i la posta del sol, al migdia, i a la nit. A la **Figura 1.3** d'aquesta memòria es reproduïx el cas del component B-NS. La diferència principal entre els resultats obtinguts per Chand et al. (2009) i els que es mostren en aquesta memòria és que el seu estudi és en el domini freqüencial per un segment de temps determinat, mentre que l'anàlisi dut a terme amb el codi MTWAVELETS és en el domini t-f. Per tant, el mètode proposat en aquesta tesi permet comparar de manera detallada el comportament de l'amplitud i la freqüència de les SR en qualsevol instant de temps. I tenint en compte la variació temporal observada d'aquests paràmetres, aquest mètode és de gran utilitat.

Toledo-Redondo et al. (2010) també van fer un estudi de les SR a partir de dades MT, en aquest cas enregistrades al Mediterrani i a l'Antàrtida. El seu anàlisi, com el de Chand et al. (2009), també és en el domini freqüencial, mitjançant l'espectre de Fourier. Així mateix, els seus resultats mostren que l'amplitud màxima de les SR està lligada temporalment a l'activitat dels centres de tempestes. En el camp ***B*** l'energia del component NS és major que la del component EW, i el 1r mode de les SR és més energètic que els altres en el component NS. En canvi en el camp ***E*** no es detecta una gran diferència ni entre els components ortogonals ni entre els diferents modes de les SR.

6.2.3. Anàlisi (t-f) dels atributs de polarització dels camps

Els atributs de polarització dels camps en els segments DIA i NIT i els seus histogrames, calculats per a cada una de les bandes de freqüència descrites a la secció 6.2.2, es mostren a la **Figura 6.12** (camp ***E***) i la **Figura 6.13** (camp ***B***).

a) Camp ***E***

L'el·lípticitat del camp ***E*** en el rang 1, que inclou el 1r mode de les SR, és majoritàriament negativa i dins l'interval $-0.2 < \varepsilon_E < -0.1$ en els dos segments, tal i com indiquen els seus histogrames corresponents. En els rangs 2 i 3, que inclouen el 2n, 3r i 4t mode de les SR, ε_E també és molt propera a zero, però oscil·la entre valors positius i negatius sense una clara majoria de cap dels dos. Per tant, el camp ***E*** de les SR està polaritzat el·lípticament en els segments DIA i NIT, clarament de manera levogira en el 1r mode, i amb un sentit de gir oscil·lant amb el temps entre levogir i dextrogir en els altres modes.

L'angle de polarització del camp ***E*** és gairebé el mateix en els tres rangs de freqüència analitzats i per tant per a tots els modes de les SR detectades, tant en el segment DIA com en el segment NIT. Concretament el camp ***E*** està oscil·lant gairebé en la direcció EW, l'angle de polarització és $\theta_E \approx 0^\circ, 180^\circ$.

El desfasament entre els components ortogonals del camp ***E*** és gairebé el mateix en els segments DIA i NIT. En el rang 1 es troba al voltant del valor $\Delta\phi_E \approx -110^\circ$, mentre que en els rangs 2 i 3 oscil·la entorn del valor $\Delta\phi_E \approx \pm 180^\circ$.

b) Camp B

El comportament de l'el·lípticitat del camp B és anàleg al de l'el·lípticitat del camp E . El camp B està polaritzat el·lípticament en ambdós segments, en sentit levogir en el 1r mode de les SR i en sentit oscil·lant entre levogir i dextrogir en els altres modes. L'única diferència és que el camp B és lleugerament més el·líptic, abunda els valors dins l'interval $-0.3 < \varepsilon_B < -0.1$.

L'angle de polarització del camp B , de la mateixa manera que l'angle de polarització del camp E , és gairebé el mateix en els segments DIA i NIT. En el rang 1 l'angle predominant és $\theta_B \approx 100^\circ$ mentre que en els rangs 2 i 3 és $\theta_B \approx 105^\circ$.

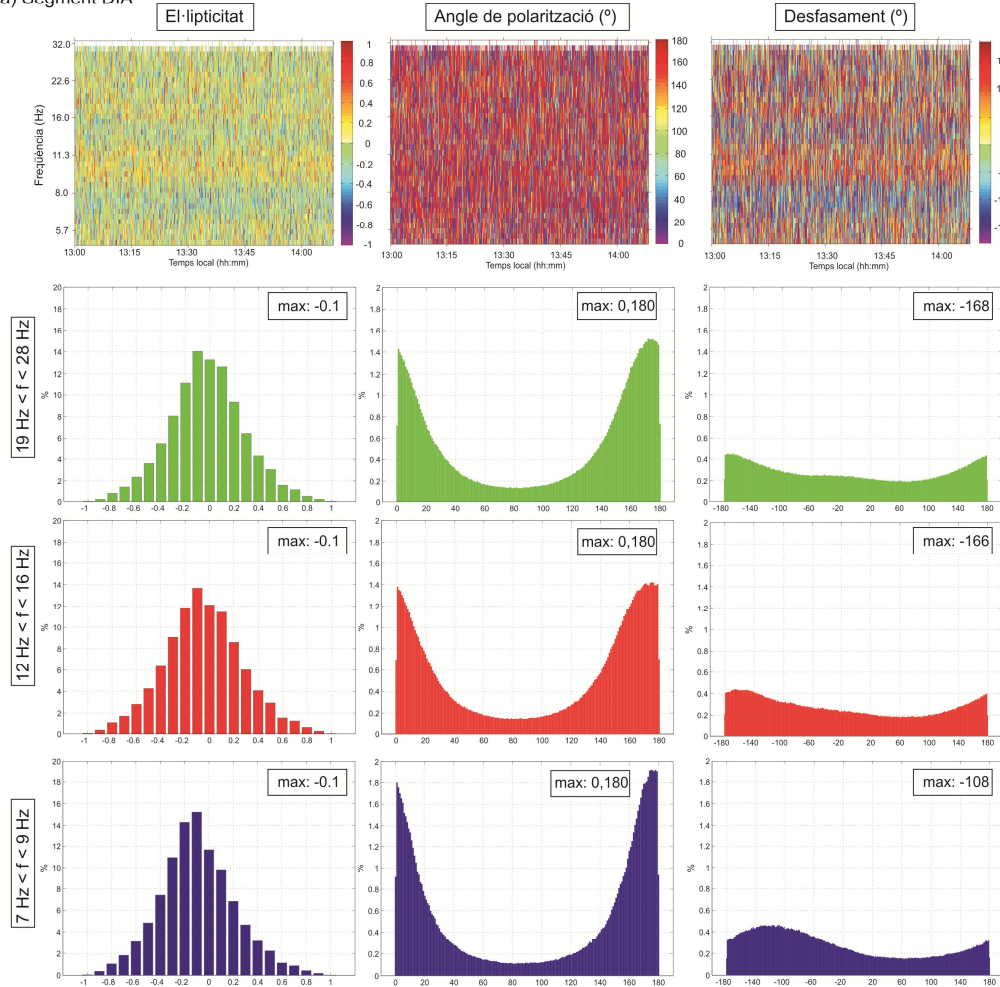
El desfasament entre els components ortogonals del camp B , com succeeix en el camp E , pràcticament no varia entre els segments DIA i NIT. En el rang 1 predomina el valor $\Delta\phi_B \approx -120^\circ$, i en els rangs 2 i 3 el desfasament està entorn del valor $\Delta\phi_B \approx -160^\circ$.

c) Comparació dels atributs de polarització dels camps

La comparació dels atributs de polarització dels camps E i B es mostra a la **Figura 6.14**. Els resultats són gairebé els mateixos en els segments DIA i NIT i en els tres rangs de freqüència analitzats. La diferència entre l'el·lípticitat dels camps és petita, el seu valor predominant és $|\Delta\varepsilon_{EB}| = 0.1$, i la desviació respecte a l'ortogonalitat presenta la major part de valors dins l'interval $0^\circ < |90 - \theta_{EB}| < 15^\circ$. Per tant, els camps E i B dels quatre primers modes de les SR presenten una el·lípticitat lleugerament diferent, i són gairebé ortogonals.

Site 99- CAMP ELÈCTRIC

a) Segment DIA



b) Segment NIT

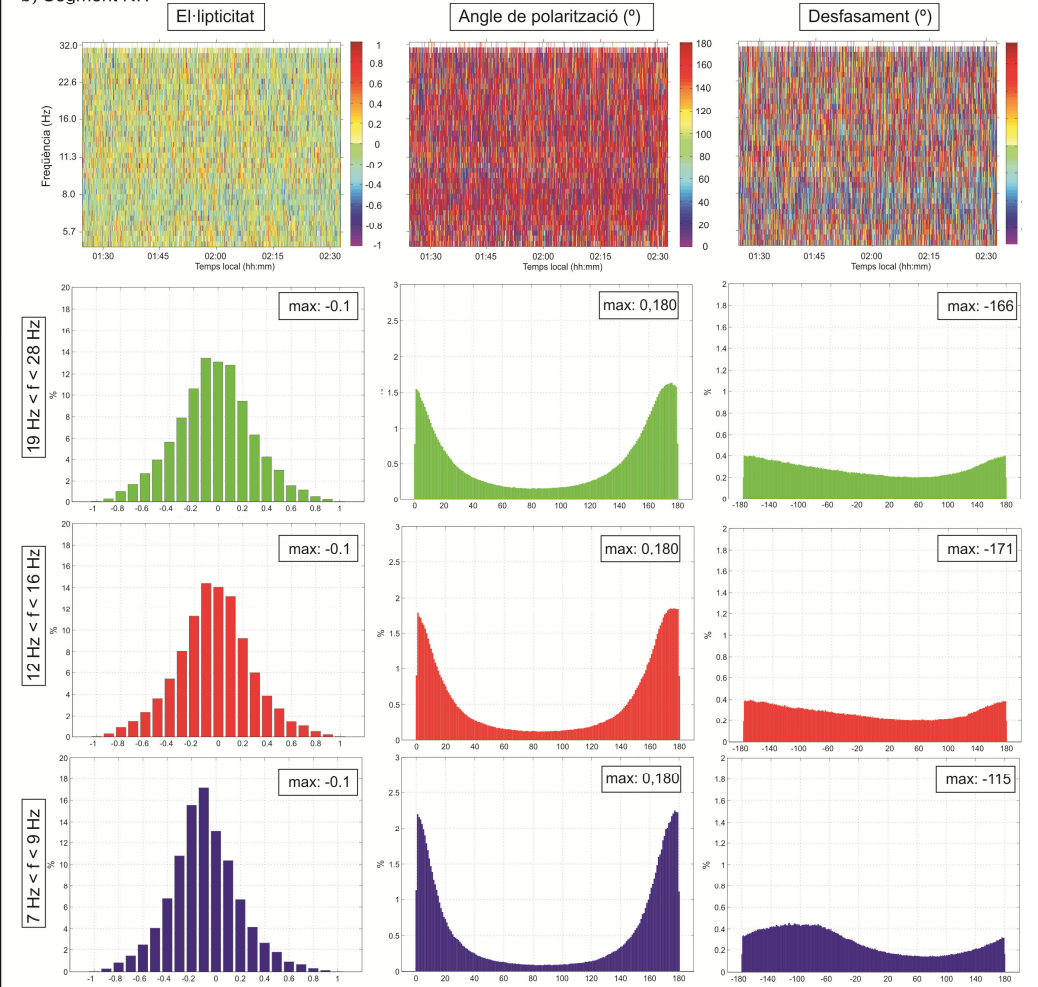
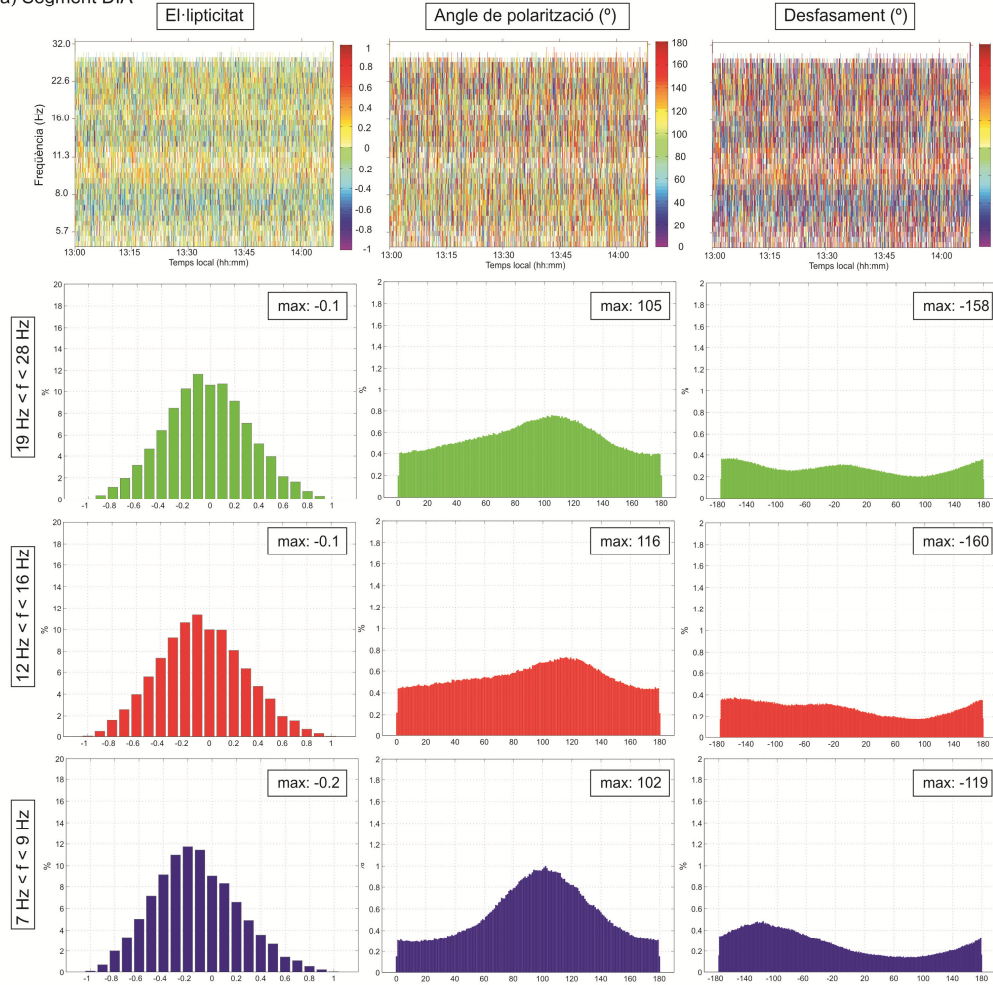


Figura 6.12. Huidobro. Site 99. Atributs de polarització del camp elèctric dels segments (a) DIA i (b) NIT, i els corresponents histogrames en els rangs de freqüències [7 Hz – 9 Hz], [12 Hz – 16 Hz] i [19 Hz – 28 Hz], en els quals s'indica el valor més freqüent (max).

Site 99- CAMP MAGNÈTIC

a) Segment DIA



b) Segment NIT

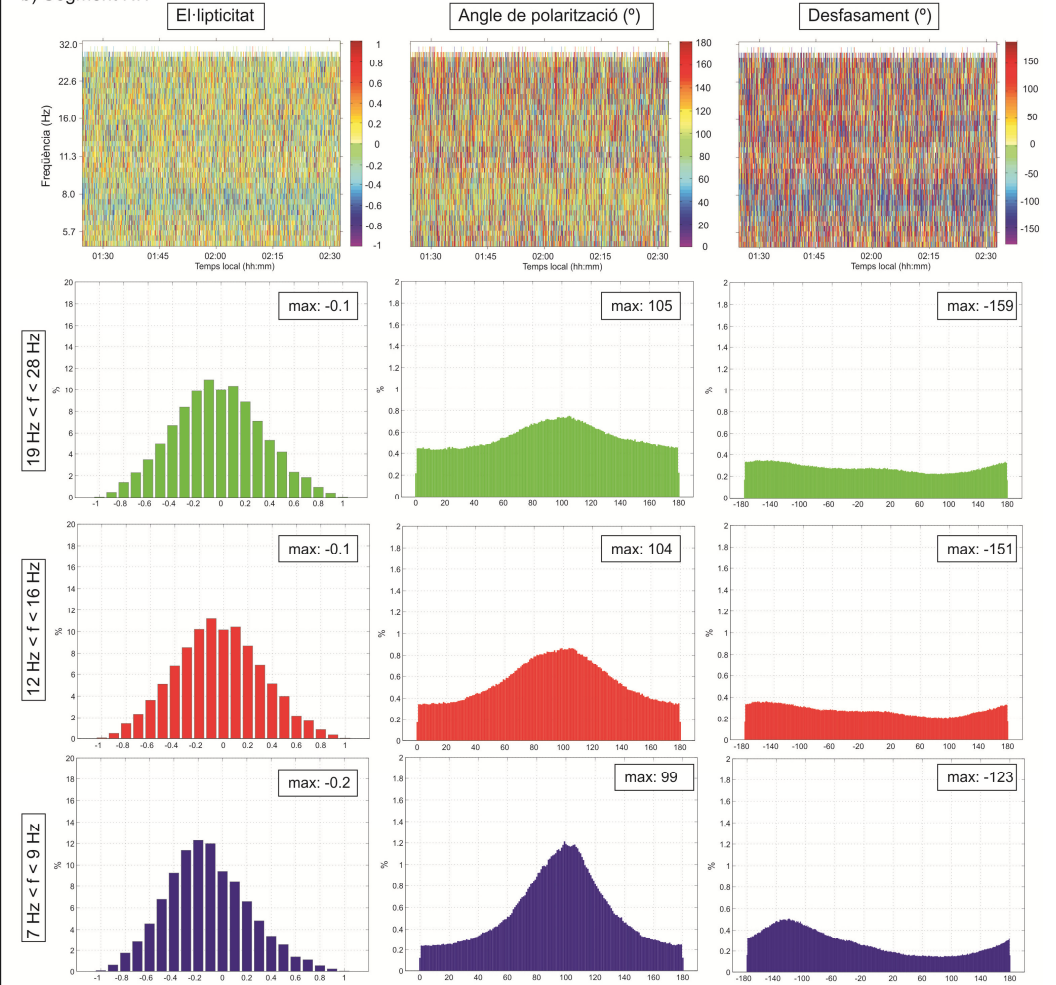


Figura 6.13. Huidobro. Site 99. Atributs de polarització del camp magnètic dels segments (a) DIA i (b) NIT, i els corresponents histogrames en els rangs de freqüències [7 Hz – 9 Hz], [12 Hz – 16 Hz] i [19 Hz – 28 Hz], en els quals s'indica el valor més freqüent (max).

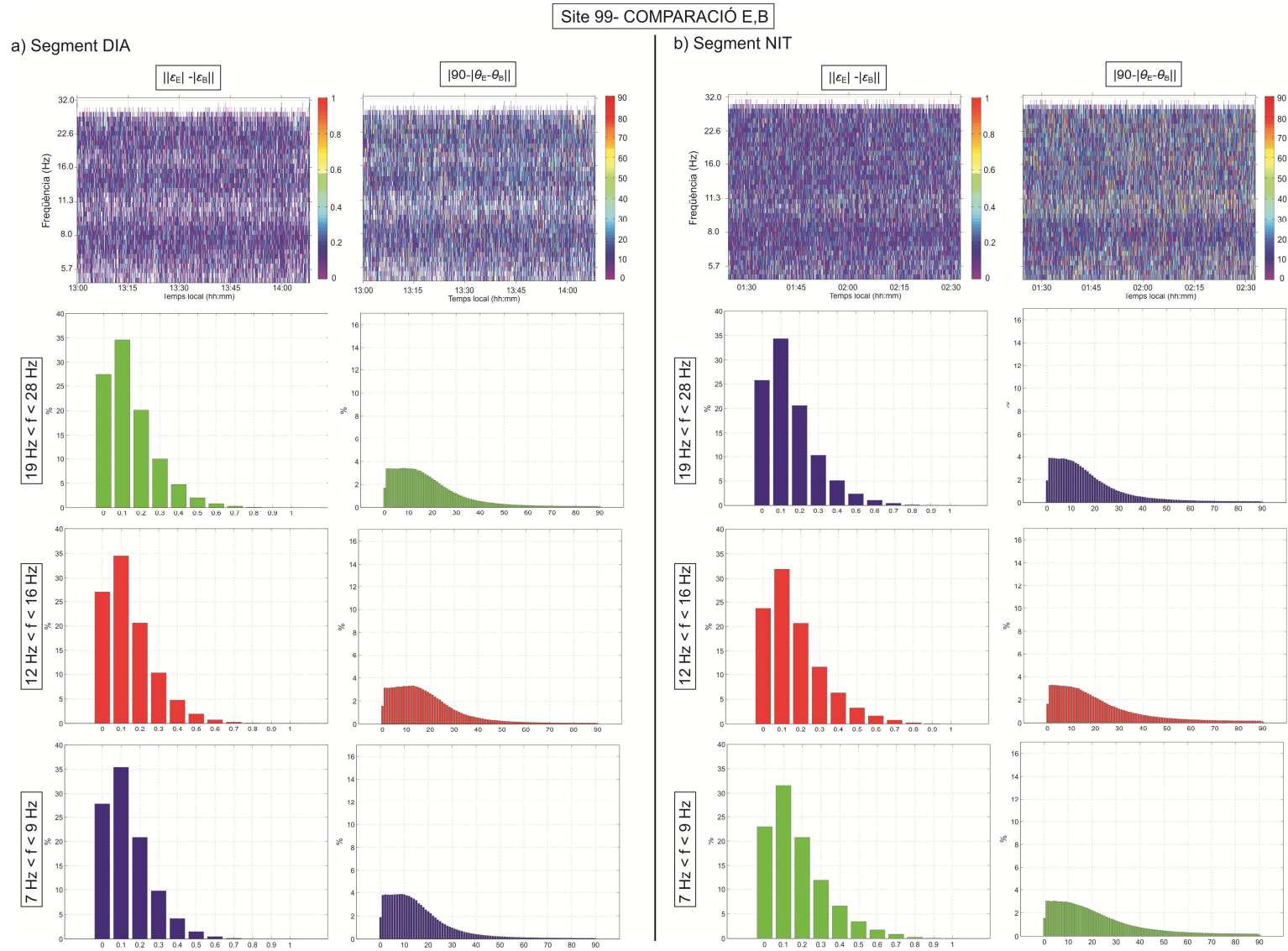


Figura 6.14 Huidobro. Site 99. Comparació dels atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic dels segments (a) DIA i (b) NIT i els corresponents histogrames en els rangs de freqüències [7 Hz – 9 Hz], [12 Hz – 16 Hz] i [19 Hz – 28 Hz].

d) Comparació dels resultats obtinguts amb altres estudis sobre les SR

Com ja s'ha comentat a la secció 1.3.2. no es té constància que hi hagi estudis sobre l'estat de polarització del camp $\mathbf{E}$ de les SR, en canvi sí que hi ha autors que han analitzat el del camp $\mathbf{B}$ horitzontal.

Respecte l'el·lipticitat, els estudis més recents (Nickolaenko et al., 2004; Nickolaenko i Sentman, 2007; Roldugin i Vasil'ev, 2012) indiquen tant a partir de dades experimentals com de modelitzacions que el camp $\mathbf{B}$ en el 1r mode de les SR està polaritzat el·lípticament en sentit levogir, mentre que en el 2n i 3r modes el sentit de gir del camp canvia amb el temps. Per tant, els resultats obtinguts en el site 99 per a l'el·lipticitat del camp $\mathbf{B}$ són els mateixos que els obtinguts per altres autors. La **Figura 6.15** mostra amb dos colors el sentit de l'el·lipticitat dels camps en els segments DIA i NIT d'aquest site. En vermell s'ha representat l'el·lipticitat positiva (sentit de gir dextrogir) i en blau l'el·lipticitat negativa (sentit de gir levogir). D'aquesta manera es pot observar més fàcilment com el signe de l'el·lipticitat permet identificar les RS en el domini (t-f) respecte a la resta de senyal natural.

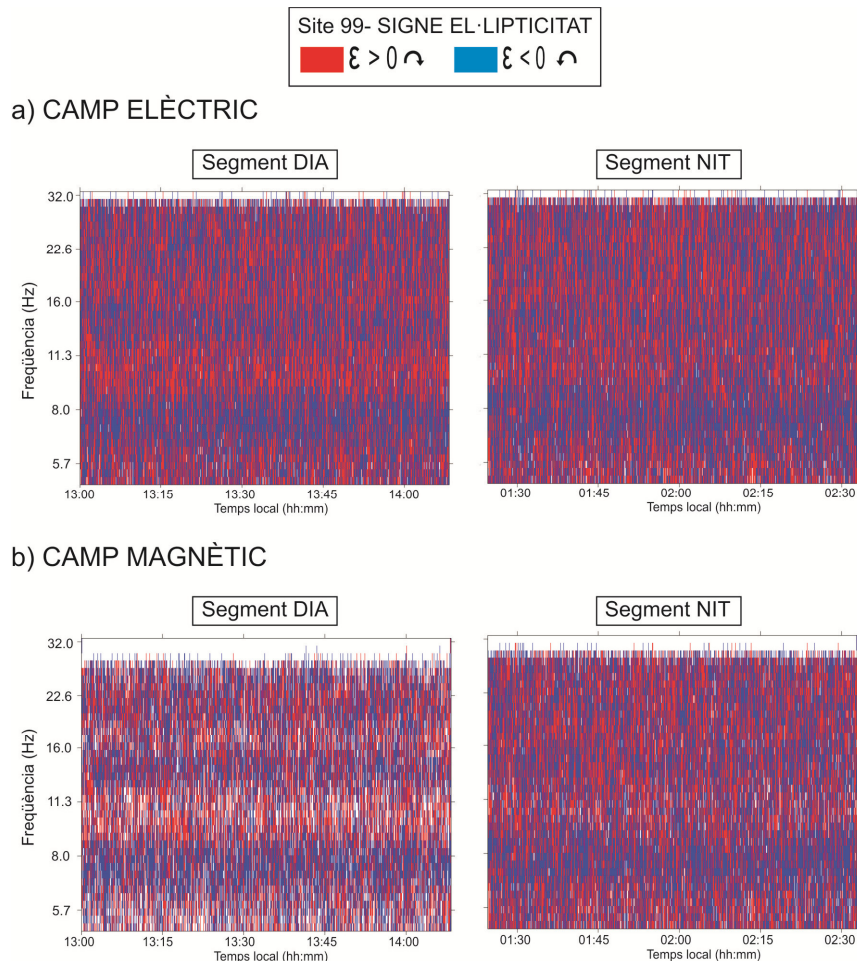


Figura 6.15 Huidobro, Site 99. Signe de l'el·lipticitat dels camps (a) elèctric i (b) magnètic dels segments DIA i NIT.

Respecte l'angle de polarització, Roldugin i Vasil'ev (2012) van comparar mesures de dos observatoris situats a diferents localitzacions, i varen concloure que l'angle del camp **B** depèn fortament de la conductivitat elèctrica del lloc on es mesuri el camp. És a dir, l'angle de polarització no és un atribut que permeti identificar les SR.

Tots aquests treballs calculen l'estat de polarització de les SR en el domini temporal (Roldugin i Vasil'ev, 2012) o bé en el domini (t-f) a partir d'espectres dinàmics de Fourier (Nickolaenko et al., 2004; Nickolaenko i Sentman, 2007). El nou mètode proposat en aquesta tesi, en canvi, permet analitzar conjuntament l'estat de polarització de les SR en funció del temps i de la freqüència, i amb resolució variable en cada un d'aquests dominis gràcies a la TW (secció 2.1).

6.2.4. Conclusions Huidobro – ressonàncies Schumann

L'anàlisi de l'energia i l'estat de polarització de les sèries temporals del site 99 d'Huidobro en el domini (t-f) amb el codi MTWAVELETS ha permès identificar els primers quatre modes de les SR. Comparant dos segments de sèrie temporal d'aquest site, un mesurat durant el dia i l'altre mesurat durant la nit, s'han detectat variacions en l'amplitud i la freqüència de les SR que depenen dels components NS i EW dels camps **E** i **B** així com del mode de la ressonància i l'hora del dia.

S'ha observat que a les SR l'el·lípticitat i el desfasament de cada un dels camps, així com la diferència d'el·lípticitat entre ells i la seva desviació respecte l'ortogonalitat presenten certs valors concrets que permeten diferenciar aquests senyals de la resta del senyal MT. L'angle de polarització és l'únic atribut que no és característic de les SR. En concret, els camps **E** i **B** estan polaritzats el·lípticament de manera levogira en el 1r mode, i amb sentit variable a la resta de modes detectats. El desfasament entre els components dels camps no és nul ni de 180°. La diferència d'el·lípticitat dels camps és petita, al voltant del valor $|\Delta\epsilon_{EB}| = 0.1$, i els camps són gairebé ortogonals, la seva desviació respecte a l'ortogonalitat està dins l'interval $0^\circ < |90 - \theta_{EB}| < 15^\circ$.

Les variacions que s'han observat en les amplituds dels camps **E** i **B** així com el valor de l'el·lípticitat del camp **B** són les mateixes que les detectades en estudis publicats recentment per altres autors. No obstant, la metodologia utilitzada en aquesta memòria per a l'estudi de les SR és totalment nova. A més, és el primer cop que s'analitza l'estat de polarització del camp **E** horitzontal d'aquests senyals.

Les SR també s'han detectat en els resultats de l'anàlisi dels sites de l'experiment "Hontomín-font" (capítol 3). Malgrat no s'ha fet un anàlisi exhaustiu de les SR a les dades MT d'Hontomín perquè no és l'objectiu d'aquest capítol, una comparació a simple vista de tots els resultats (annex digital D) ha permès comprovar que els valors obtinguts per les SR a la resta dels sites són molt similars als descrits en el site 99.

L'anàlisi de les SR amb el codi MTWAVELETS ha estat molt satisfactori i ha posat de manifest els següents aspectes:

- L'estudi de les SR a partir de sèries temporals MT proporciona informació addicional respecte les anàlisis que es duen a terme habitualment d'aquests senyals. En el mètode MT es disposa dels components horitzontals del camp $\mathbf{E}$, i s'ha demostrat que aquests proporcionen informació profitosa sobre les SR.
- L'anàlisi (t-f) de l'energia de les SR mitjançant la TW és molt útil ja que aquests senyals presenten variacions que depenen tant del temps com de la freqüència.
- Els atributs de polarització dels camps $\mathbf{E}$ i $\mathbf{B}$ i la comparació entre ells en el domini (t-f) permeten identificar les SR i diferenciar-les de la resta de senyal MT.

Tenint en compte les nombroses aplicacions que té l'estudi de les SR (secció 1.1.2.2), entre elles la determinació de l'estat de la ionosfera, el mètode proposat és potencialment útil per l'anàlisi d'aquests senyals.

