Evoluzione dell'Isteresi Ionosferica alle Basse Frequenze HF: 60, 80 e 160 Metri

Abstract
Questo studio analizza i fenomeni di isteresi ionosferica nelle bande HF più basse, con particolare attenzione a 60 m (5 MHz), 80 m (3,5 MHz) e 160 m (1,8 MHz). Utilizzando dati WSPR raccolti dal ricevitore I0.. situato nell'Italia centrale, sono state confrontate le finestre di propagazione attorno ad alba e tramonto per identificare i rispettivi ruoli dello Strato D (assorbimento diurno) e dello Strato F (ricombinazione lenta). I risultati mostrano una transizione graduale tra le tre bande: a 60 m si osserva un comportamento misto con isteresi parziale; a 80 m transizioni più brusche dominate dall'assorbimento dello Strato D; e a 160 m una risposta nettamente ON/OFF limitata alle ore notturne. Questa progressione illustra come l'isteresi ionosferica evolva con la frequenza — da graduale e dipendente dal tempo a discreta e di tipo soglia — man mano che l'assorbimento del D-layer sopprime progressivamente la persistenza dello Strato F.

Data: 23/10/2025

Amateur Radio Propagation Studies
www.qsl.net/ik3xtv

creative commons

Evoluzione dell'Isteresi Ionosferica alle Basse Frequenze HF: 60, 80 e 160 Metri

Introduzione
La risposta dell'ionosfera alle variazioni di irradiazione solare (alba e tramonto) non è istantanea: alcuni strati mostrano ricombinazione lenta, altri agiscono per assorbimento quasi immediato. Il fenomeno conosciuto come "isteresi ionosferica" si manifesta come asimmetrie temporali nelle finestre di propagazione. L'obiettivo del presente lavoro è analizzare e confrontare le caratteristiche di propagazione in tre bande basse HF (60, 80 e 160 m) usando segnali WSPR ricevuti da I0.., per chiarire come cambi il meccanismo dominante dell'isteresi al variare della frequenza.

Metodologia
I dati utilizzati sono rilevazioni WSPR raccolte dal ricevitore I0.., situato in Italia centrale. Per tutte le bande analizzate (60, 80 e 160 metri) è stato adottato lo stesso criterio di estrazione e aggregazione: ogni punto nei grafici rappresenta una singola ricezione WSPR, con istante di rilevazione locale e valore SNR rilevato. Le linee verticali indicano gli orari locali di alba e tramonto. Le osservazioni sono state effettuate in condizioni geomagnetiche favorevoli, per ridurre l'influenza di perturbazioni esterne. In particolare, il periodo dal 13 al 17 ottobre 2025 è stato caratterizzato da bassa attività geomagnetica, come confermato dagli indici planetari Kp e Ap:

- 13 ottobre: Kp medio 2, Ap 6
- 14 ottobre: Kp medio 1–2, Ap 5
- 15 ottobre: Kp medio 2, Ap 7
- 16 ottobre: Kp medio 2–3, Ap 8
- 17 ottobre: Kp medio 2, Ap 6

Questi valori, tutti inferiori alla soglia di tempesta geomagnetica (Kp < 4), indicano condizioni di quiete, ideali per analizzare i meccanismi ionosferici locali senza interferenze da eventi solari o magnetosferici. L'uso di dati in regime quieto consente di isolare con maggiore confidenza gli effetti della transizione tra strati D e F, e di attribuire le dinamiche osservate alla risposta ionosferica intrinseca.

Nota: il ricevitore I0.. è situato in Italia centrale; i dati rappresentano le stazioni ricevute dalla sua antenna e dunque riflettono percorsi (path) eterogenei. In particolare, in banda 60 metri i percorsi di propagazione sono prevalentemente regionali e di tipo NVIS (Near Vertical Incidence Skywave), con riflessioni ionosferiche a corto raggio che coinvolgono principalmente lo strato F. Al contrario, in banda 160 metri i path tendono ad essere più diretti e orizzontali, con angoli di incidenza bassi e maggiore esposizione all'assorbimento del D-layer. Queste differenze geometriche influenzano la visibilità dei fenomeni di isteresi e devono essere considerate nell'interpretazione dei dati WSPR.

Risultati
60 Metri (5 MHz)

Il grafico in Fig. 1 mostra le ricezioni WSPR in 60 metri presso I0... La banda presenta forte attività notturna ma mostra anche ricezioni durante le ore diurne, seppur meno numerose.

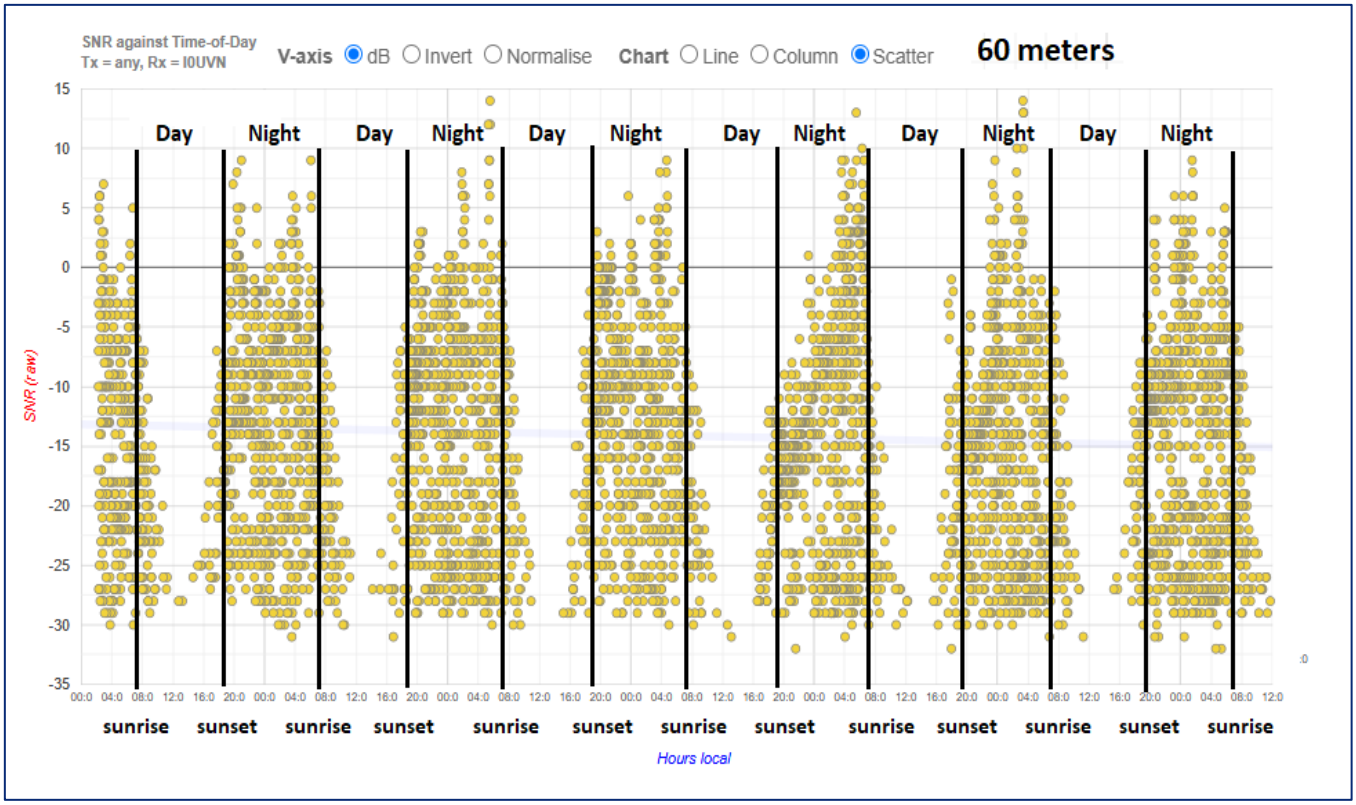

Fig. 1 – Ricezione WSPR in banda 60 metri (5 MHz) presso I0...
Analisi: la distribuzione dei punti indica un comportamento intermedio tra assorbimento e riflessione. All'alba si osserva un diradamento graduale delle ricezioni (formazione progressiva del D-layer), mentre al tramonto la riapertura inizia già prima del tramonto geometrico e si intensifica in modo graduale. Questi segnali evidenziano una persistenza serale dello Strato F e una dissoluzione mattutina progressiva del D-layer, indicando una forma di isteresi parziale.

80 Metri (3.5 MHz)
Il grafico in Fig. 2 (estratto dai dati storici e dalle elaborazioni WSPR presso I0..) mette in evidenza la dinamica tipica della banda: predominanza dell'assorbimento D con transizioni relativamente brusche rispetto a 60 m.

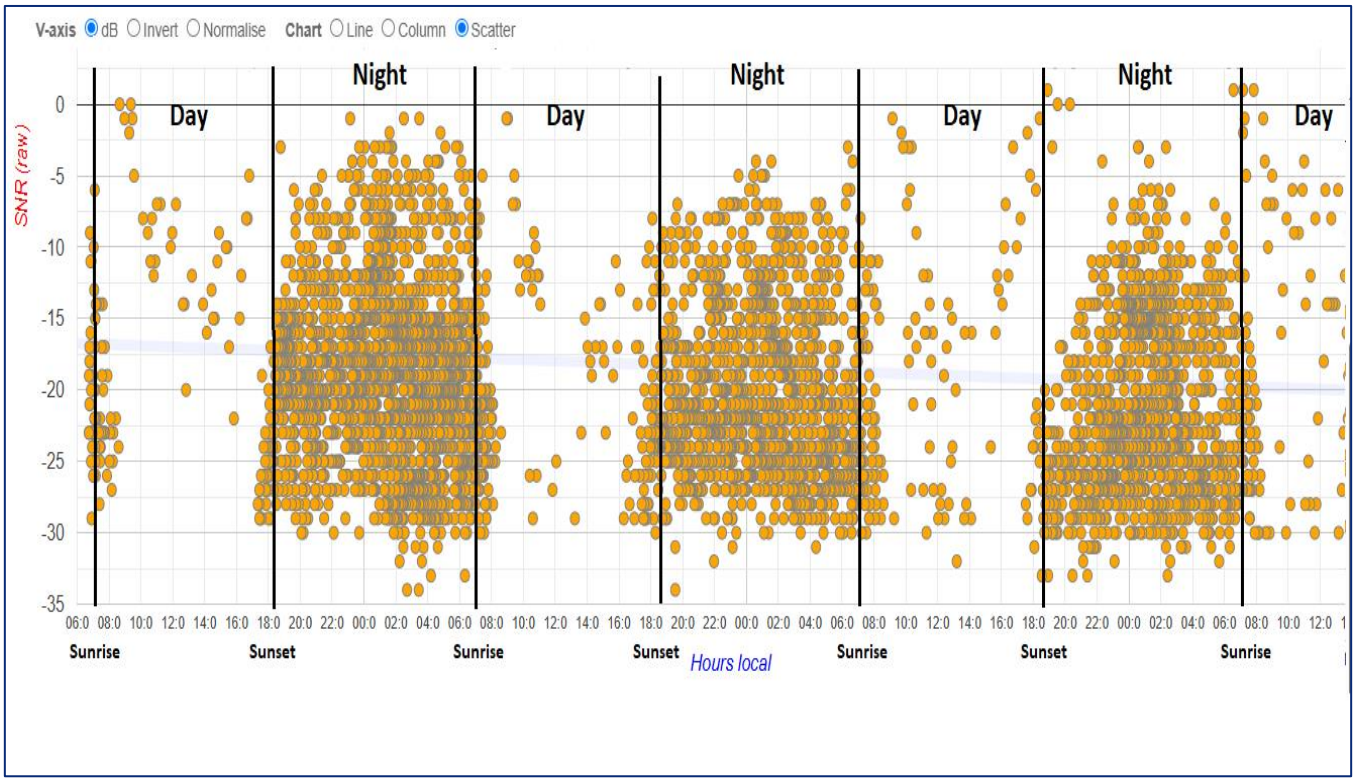

Fig. 2 – Ricezione WSPR in banda 80 metri (3.5 MHz) presso I0...
Analisi: la banda 80 m mostra aperture serali nette e chiusure mattutine rapide. Sebbene in alcune situazioni e path particolari si possano osservare code o ritardi, nella maggior parte dei casi il D-layer esercita un ruolo dominante, sopprimendo le persistenze dell'F-layer che emergono nelle bande più alte.

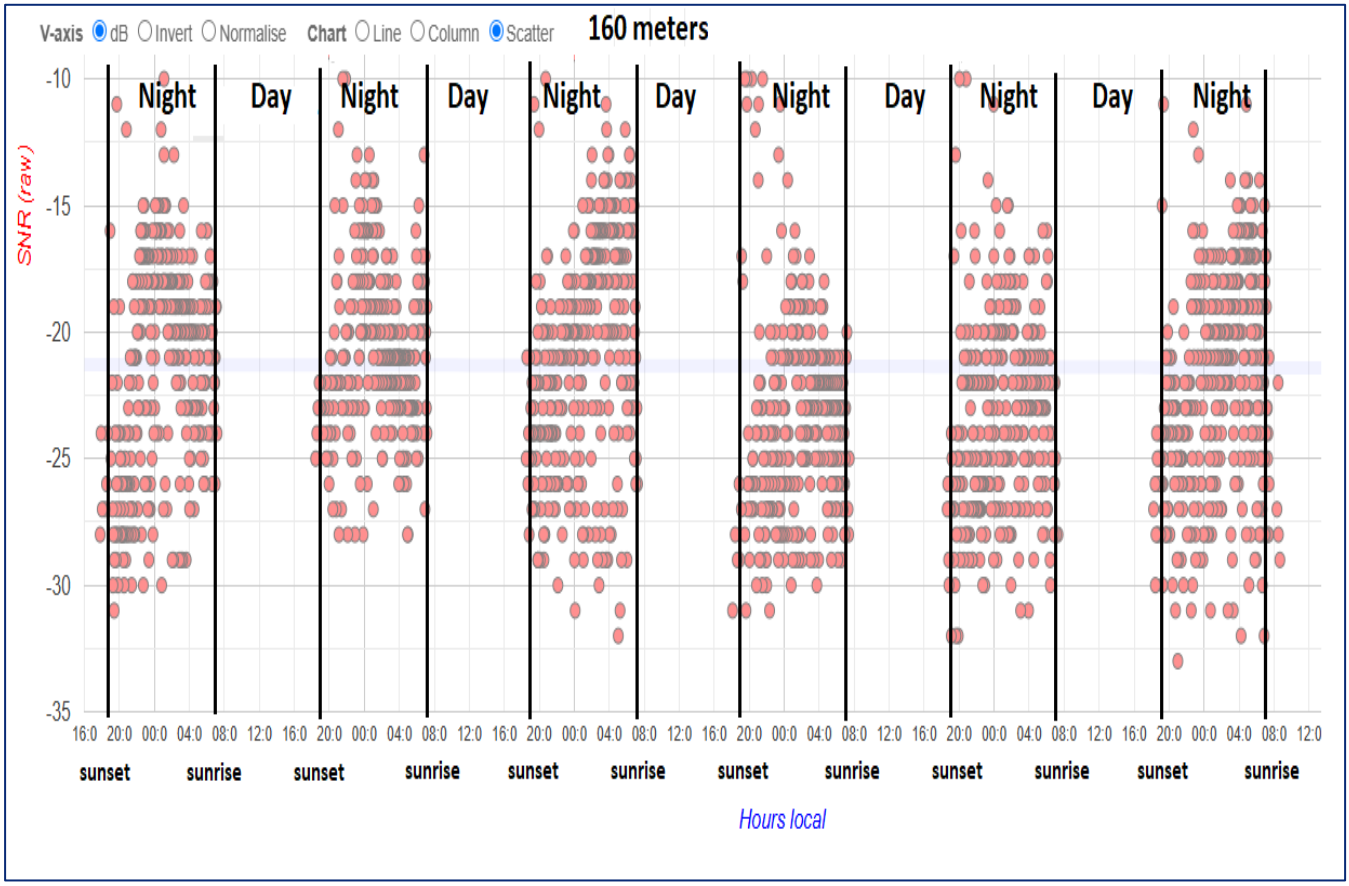

Fig. 3 – Ricezione WSPR in banda 160 metri (1.8 MHz) presso I0….
Analisi: A 1.8 MHz l'assorbimento del D-layer è così efficiente che anche segnali QRP vengono annullati al minimo incremento di ionizzazione[2]. Il comportamento è di tipo soglia/ON-OFF, senza risultati di persistenza o ritardo misurabili[3]. La banda si apre solo nelle ore notturne e si chiude istantaneamente all'alba[4].

Tabella 1 – Confronto tra bande basse HF (ricezioni WSPR presso I0…)

Banda	Frequenza (MHz)	Ora di apertura (≈)	Ora di chiusura (≈)	Tipo di transizione	Ritardo / Pers. serale stimato	Dominante fisico	Comportamen
60 m	5.0	~18:00 (≈ 25 min prima del tramonto)	~07:45 (≈ 20 min dopo l'alba)	Graduale, asimmetrica	20–30 min isteresi	Equilibrio F/D	Transizione morbida, istere parziale
80 m	3.5	~18:10 (≈ 15 min prima del tramonto)	~07:15 (≈ 10 min prima dell'alba)	Simmetrica, rapida	≤ 10 min	D-layer dominante	Quasi ON/OFF

Approfondimento sul Comportamento SNR in Banda 60 Metri: Dinamiche Alba–Tramonto
Un'analisi più dettagliata del grafico relativo alla banda 60 metri consente di evidenziare alcune caratteristiche distintive nella distribuzione dei valori SNR in prossimità delle transizioni solari.

Persistenza della ricezione oltre i limiti solari
Dopo il tramonto, si osservano ricezioni che si estendono fino a circa due ore oltre il tramonto geometrico, con valori SNR generalmente attenuati (intorno a –30 dB o inferiori). Questo comportamento suggerisce una decaduta graduale della ionizzazione nella regione D, che non si interrompe in modo netto al calar del sole. Prima dell'alba, si rilevano ricezioni fino a circa due ore antecedenti l'alba, con SNR comparabili o leggermente inferiori. Ciò indica che la propagazione può iniziare prima della comparsa del sole sull'orizzonte, probabilmente per effetto della ionizzazione anticipata indotta dalla radiazione solare diffusa.

Asimmetria tra alba e tramonto
L'andamento dei dati mostra una asimmetria temporale tra le due transizioni: dopo l'alba, la ripresa della propagazione appare più netta e rapida, con un incremento progressivo dei valori SNR. Al contrario, prima del tramonto, il declino della propagazione è più graduale e meno marcato. Questa differenza è coerente con il fenomeno di isteresi ionosferica, in cui la risposta della ionosfera alla variazione di irradiazione solare non è simmetrica. In particolare, la ricostruzione della ionizzazione al mattino risulta più efficiente rispetto alla dissoluzione serale, probabilmente per effetto della maggiore intensità fotonica e della temperatura elettronica in fase di risalita.

Dinamica della propagazione ionosferica in banda 60 m: evidenze di isteresi
Il grafico seguente rappresenta un focus di due giorni sulla banda 60 metri (5 MHz), basato sulle ricezioni WSPR effettuate da I0... Ogni punto giallo indica una singola ricezione, con indicazione oraria locale e valore SNR grezzo, mentre le linee verticali segnano gli orari di alba e tramonto per ciascun giorno. Si osserva una persistenza della propagazione fino a circa due ore dopo il tramonto e una riattivazione fino a due ore prima dell'alba, con SNR generalmente attenuati. Questo comportamento evidenzia una forma di isteresi ionosferica parziale, tipica della banda 60 m in condizioni di quiete geomagnetica: il declino serale appare graduale, mentre la ripresa mattutina è più netta, suggerendo una ricombinazione notturna più lenta rispetto alla ricostituzione mattutina dello strato ionizzato. La banda 60 m, al confine tra propagazione NVIS e a media distanza, risulta particolarmente sensibile alle transizioni ionosferiche, e l'assenza di disturbi geomagnetici consente di osservare con chiarezza la dinamica naturale degli strati D ed E. La regolarità delle ricezioni WSPR e la distribuzione temporale dei punti offrono inoltre una base utile per analisi statistiche e modellazioni didattiche.

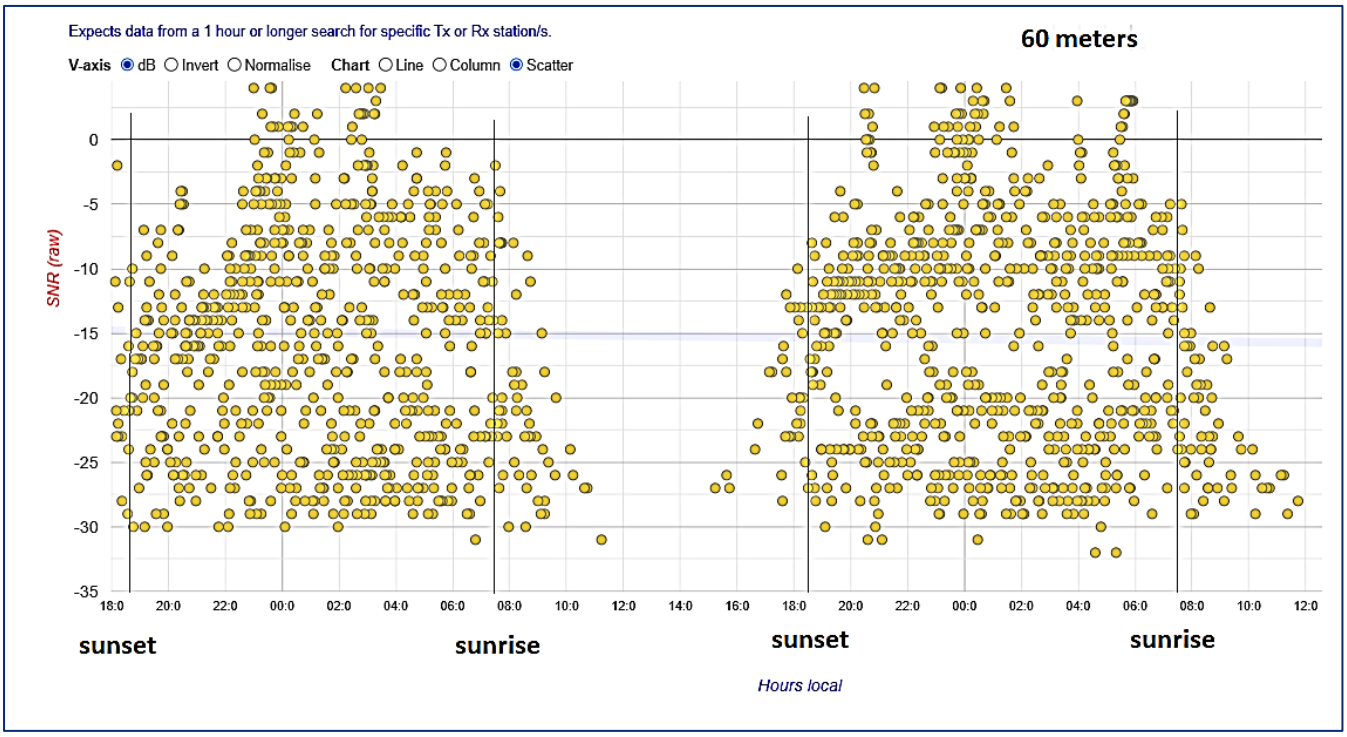

Fig. 4 – Distribuzione dei valori SNR in banda 60 metri (5 MHz) ricevuti da I0…. Ogni punto rappresenta una singola ricezione WSPR, con orario locale di rilevazione e valore SNR rilevato (riportato direttamente dal

software WSPR). Le linee verticali indicano gli orari locali di alba e tramonto per ciascun giorno. Si osserva una persistenza della propagazione fino a circa due ore dopo il tramonto e una riattivazione fino a due ore prima dell'alba, con SNR generalmente attenuati. La ripresa mattutina appare più netta rispetto al declino serale, evidenziando una forma di isteresi ionosferica parziale, tipica della banda 60 m in condizioni di quiete geomagnetica.

Confronto e discussione

Confrontando le tre bande emerge una progressione netta: a 60 m si osserva un equilibrio tra F-layer e D-layer, con una significativa componente di isteresi temporale; a 80 m l'assorbimento del D-layer limita fortemente la persistenza, rendendo le transizioni più brusche; a 160 m l'effetto D è dominante al punto da annullare qualsiasi residuo di propagazione dovuto agli strati superiori. Dal punto di vista operativo, i 60 m si prestano bene per indagare l'isteresi in condizioni di transizione, mentre le bande 80 e 160 m risultano più adatte per osservare i fenomeni di assorbimento ionosferico e comportamento soglia. La comprensione di questi regimi è utile per pianificare esperimenti WSPR e prevedere le finestre operative nelle attività radioamatoriali. La progressione tra le tre bande può essere sintetizzata nella seguente tabella, che evidenzia il passaggio da un comportamento graduale e temporale (60 m) a una risposta sempre più netta e soglia (80 e 160 m), coerente con la crescente dominanza dello strato D.

Verifica incrociata con stazioni europee

Per valutare l'applicabilità più ampia dei meccanismi di isteresi osservati, sono state condotte analisi supplementari utilizzando dati WSPR provenienti da altre stazioni europee. Questi dataset indipendenti hanno evidenziato asimmetrie temporali e comportamenti di transizione simili nelle stesse bande di frequenza (60, 80 e 160 metri). Questa verifica incrociata conferma la generalità dei risultati al di là della specifica stazione I0.., indicando che le dinamiche di isteresi descritte in questo studio rappresentano un comportamento ionosferico più ampio, osservabile in condizioni geomagnetiche tranquille.

Banda HF	Frequenza	Comportamento alla transizione solare	Dominanza ionosferica	Tipo di isteresi osservata
60 m	5 MHz	Graduale, con persistenza post-tramonto e riattivazione pre-alba	Equilibrio F/D	Parziale, temporale
80 m	3.5 MHz	Transizioni più brusche, apertura e chiusura nette	D-layer dominante	Debole, soglia attenuata
160 m	1.8 MHz	Comportamento soglia ON/OFF, cessazione immediata all'alba	D-layer prevalente	Assente, risposta binaria

Distribuzione SNR in funzione della Distanza: Evidenze Geometriche e di Assorbimento

I grafici seguenti rappresentano la distribuzione dei valori SNR in funzione della distanza delle stazioni ricevute da I0…, per ciascuna banda analizzata (160, 80, 60 e 40 metri). Ogni punto corrisponde a una singola ricezione WSPR, con asse orizzontale indicante la distanza (in km) e asse verticale il valore SNR grezzo. Questa visualizzazione consente di evidenziare le caratteristiche geometriche e di assorbimento della propagazione ionosferica alle diverse frequenze. Nelle bande più basse (160 e 80 m), la propagazione è fortemente limitata al corto-medio raggio, con assenza di segnali oltre i 2000 km, a causa dell'elevata efficienza dell'assorbimento del D-layer. Al contrario, la banda 60 m mostra una distribuzione più ampia e articolata, con ricezioni NVIS a corto raggio e segnali a media distanza fino a circa 3750 km, confermando il ruolo intermedio tra riflessione F-layer e assorbimento D-layer. La banda 40 m, inclusa come riferimento superiore, presenta la propagazione più estesa, con ricezioni regolari oltre i 10.000 km e valori SNR elevati, evidenziando la minore influenza del D-layer e la predominanza della riflessione ionosferica. L'analisi SNR vs distanza rafforza la progressione osservata nei

grafici temporali: da una propagazione soglia e discreta (160 m) a una risposta graduale e stratificata (60 m), fino alla propagazione estesa e continua (40 m).

Banda (Lunghezza d'onda)	Frequenza (MHz)	Dominanza Ionosferica	Manifestazione dell'Isteresi (Temporale e Spaziale)
160 m	1.8	D-layer Prevalente	**Assente**, comportamento a soglia. Propagazione confinata al corto-medio raggio (< 1500 km). Chiusura istantanea all'alba.
80 m	3.5	D-layer Dominante	**Debole**, soglia attenuata. Propagazione concentrata al corto-medio raggio (< 2000 km). Transizioni più brusche e nette.
60 m	5.0	Equilibrio F/D	**Parziale, temporale** e graduale. Propagazione NVIS/Medio Raggio con segnali DX. Persistenza serale e riattivazione pre-alba.
40 m	7.0	F-layer (Riferimento)	Isteresi meno critica. Propagazione a Lunga Distanza estesa (> 10.000 km). Usato come contrasto alla dominanza D.

Conclusioni

I risultati sperimentali ottenuti tramite il monitoraggio WSPR a bassa potenza (QRP) presso I0… confermano che la natura dell'isteresi ionosferica cambia radicalmente con la frequenza HF. L'analisi combinata dei dati temporali e spaziali (SNR vs. Distanza) rivela una chiara progressione di regime: A 60 m (5 MHz), la dominanza dell'Equilibrio F/D consente una propagazione regionale (NVIS) con un'isteresi parziale e graduale. * A 80 m (3.5 MHz) e 160 m (1.8 MHz), l'efficacia crescente dell'assorbimento del D-layer limita drasticamente la propagazione al corto-medio raggio. L'effetto di questo strato inferiore si traduce in una dinamica temporale che, a 160 m, diventa un comportamento a soglia netto, annullando di fatto l'isteresi misurabile. Questo studio dimostra come le bande inferiori siano interruttori ionosferici sensibili all'irradiazione solare minima, mentre la banda 60 m si presti bene a indagare l'asimmetria temporale intrinseca dell'ionosfera quieta. L'approccio QRP-WSPR si conferma uno strumento sensibile per mettere in luce questi meccanismi. Futuri sviluppi includono l'analisi stagionale, l'inclusione di dati geomagnetici e lo studio sistematico dei path per isolare gli effetti geometrici.

Crediti: I dati di ricezione WSPR utilizzati in questa analisi provengono da WSPR.Rocks - https://wspr.rocks/ (gestito da Phil – VK7JJ) e sono utilizzati con autorizzazione del gestore del sito.

Questo articolo è distribuito con licenza Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). Può essere condiviso e adattato per scopi non commerciali, a condizione che venga attribuito all’autore originale.