

Efectos de propagación magneto-iónica en las mediciones de dispersión incoherente del radar de Jicamarca

Marco Milla¹, Erhan Kudeki² y Jorge Chau¹

¹ Radio Observatorio de Jicamarca, Instituto Geofísico del Perú

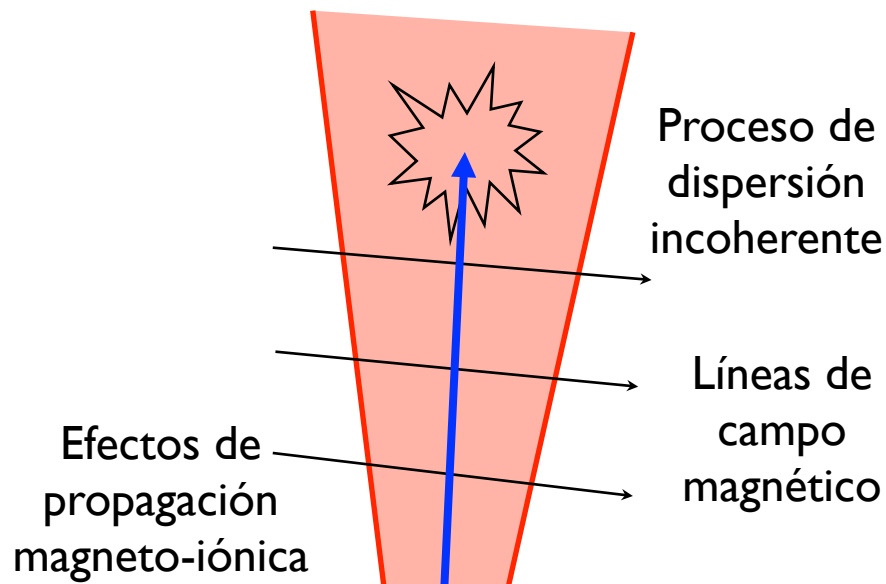
² University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA

Agosto 5, 2010

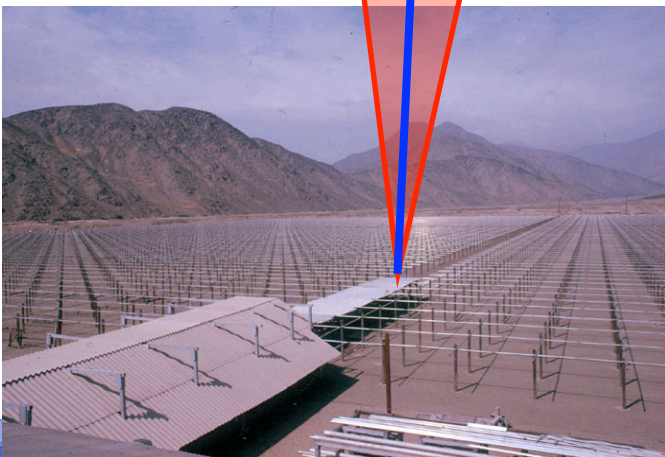
IX Encuentro Científico Internacional de Invierno
2 al 6 de Agosto de 2010, Lima, Perú



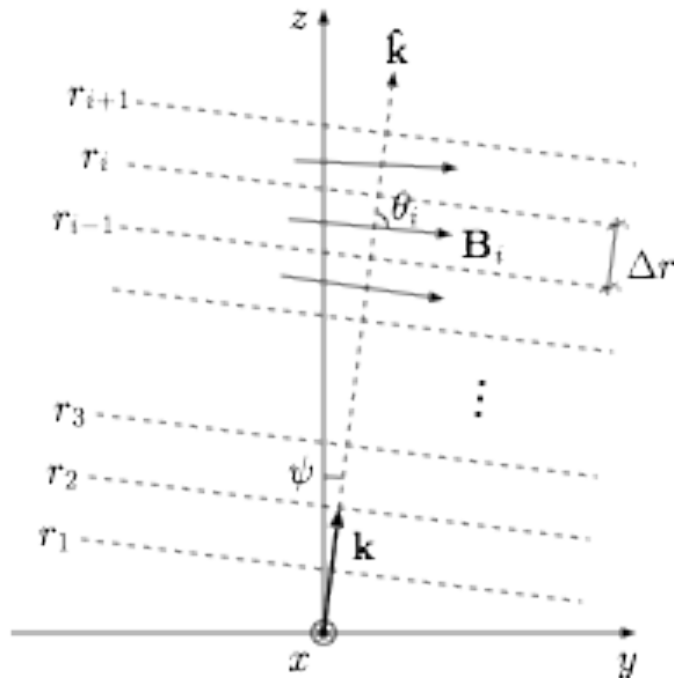
Jicamarca: Radar de dispersión incoherente



- Incoherent scatter (o dispersión incoherente): Re-radiación de ondas electromagnéticas producida por los electrones en la ionósfera.
- La estadística de las señales medidas por el radar es usada para estimar parámetros físicos de la ionósfera.
- La propagación de ondas electro-magnéticas en un medio magneto-iónico (como la ionósfera) también afecta la estadística de las señales.



Efectos de propagación magneto-iónica

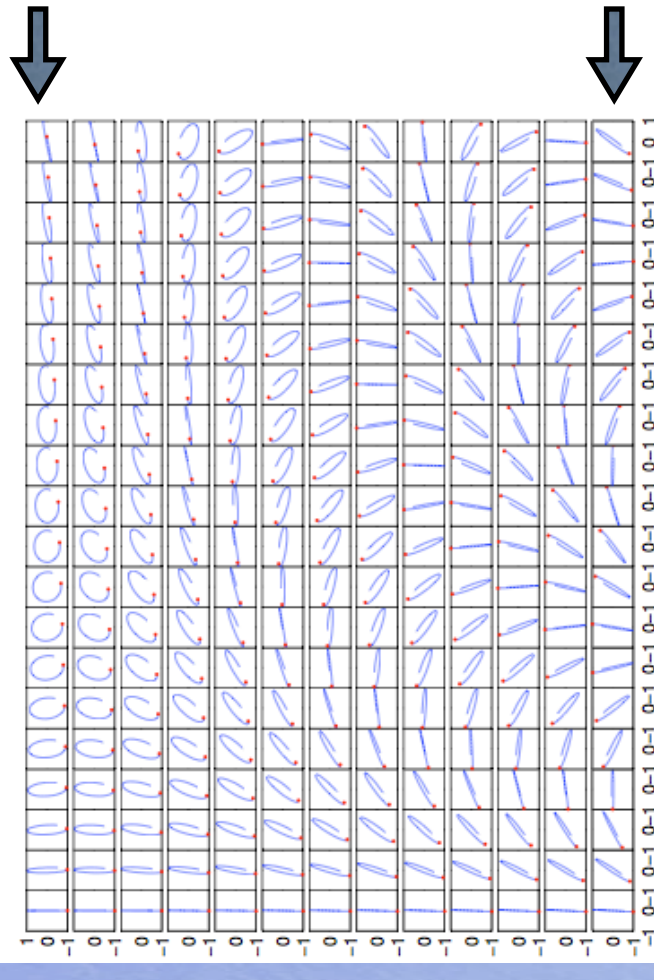


Los efectos de propagación dependen del ángulo entre la dirección de propagación y el campo magnético de la Tierra.

~perp a B,
Efecto Cotton-Mouton,
modos lineales

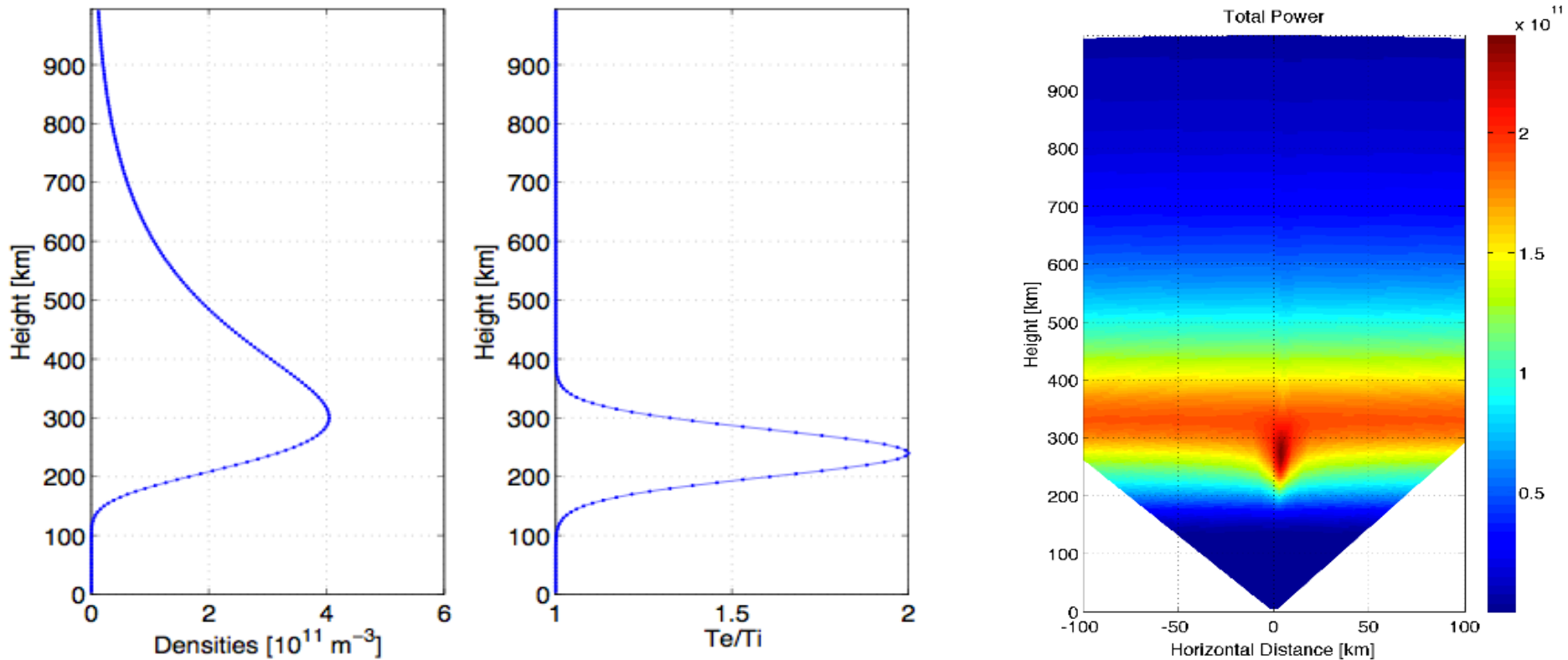
~2 deg de perp a B,
Rotación de Faraday,
modos quasi-circulares

a medida que la onda se propaga la polarización es modificada



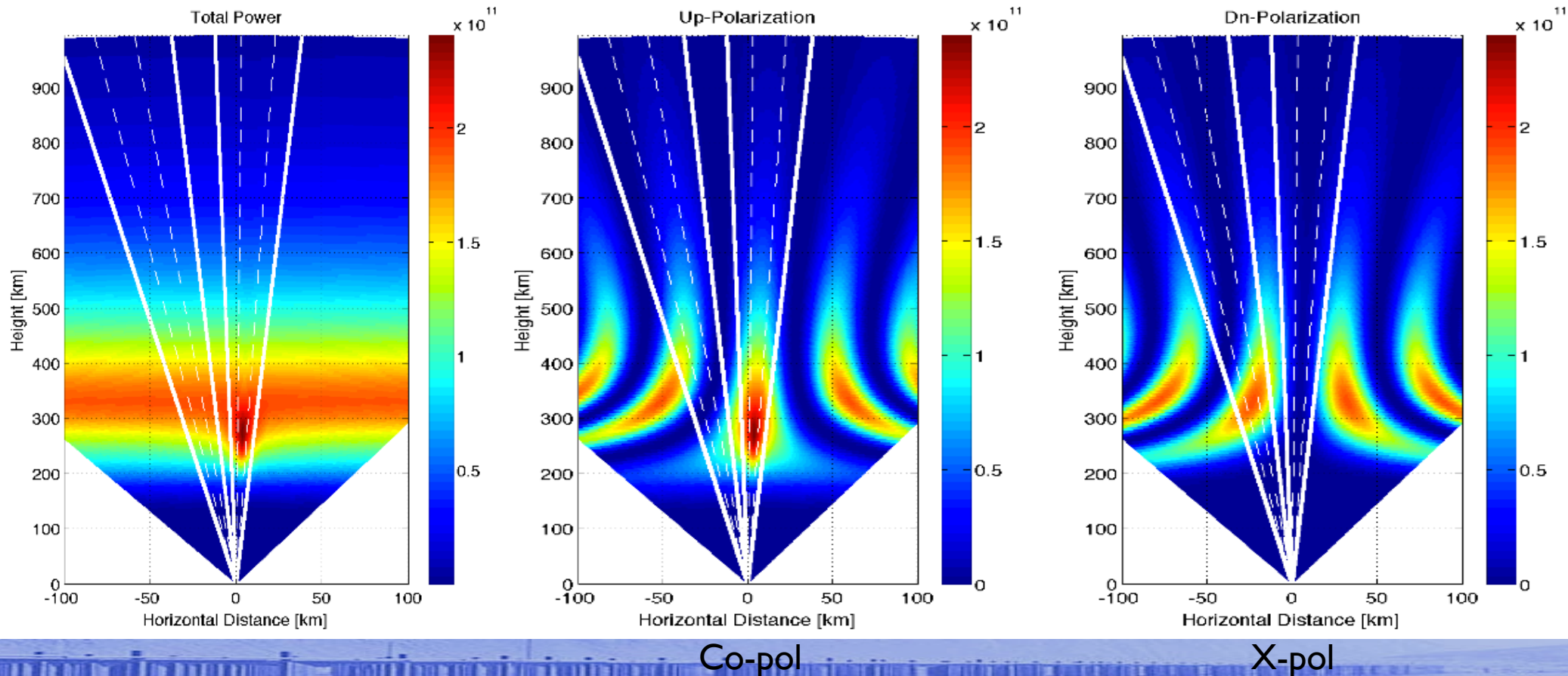
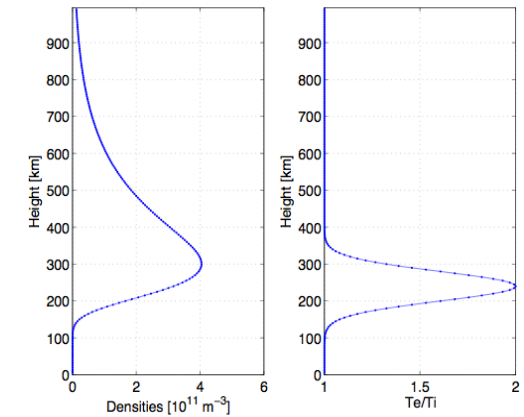
Despreciando los efectos magneto-iónicos:

Para una ionosfera con perfiles de Ne y Te/Ti mostrados abajo, un barrido de radar en la dirección norte-sur mostraría un mapa de potencia de la señal de retorno como el que se muestra a la derecha. Se puede observar un incremento en la potencia recibida en la dirección perpendicular a B. La teoría de dispersión incoherente predice este incremento a alturas donde $Te > Ti$.



Incluyendo los efectos magneto-iónicos:

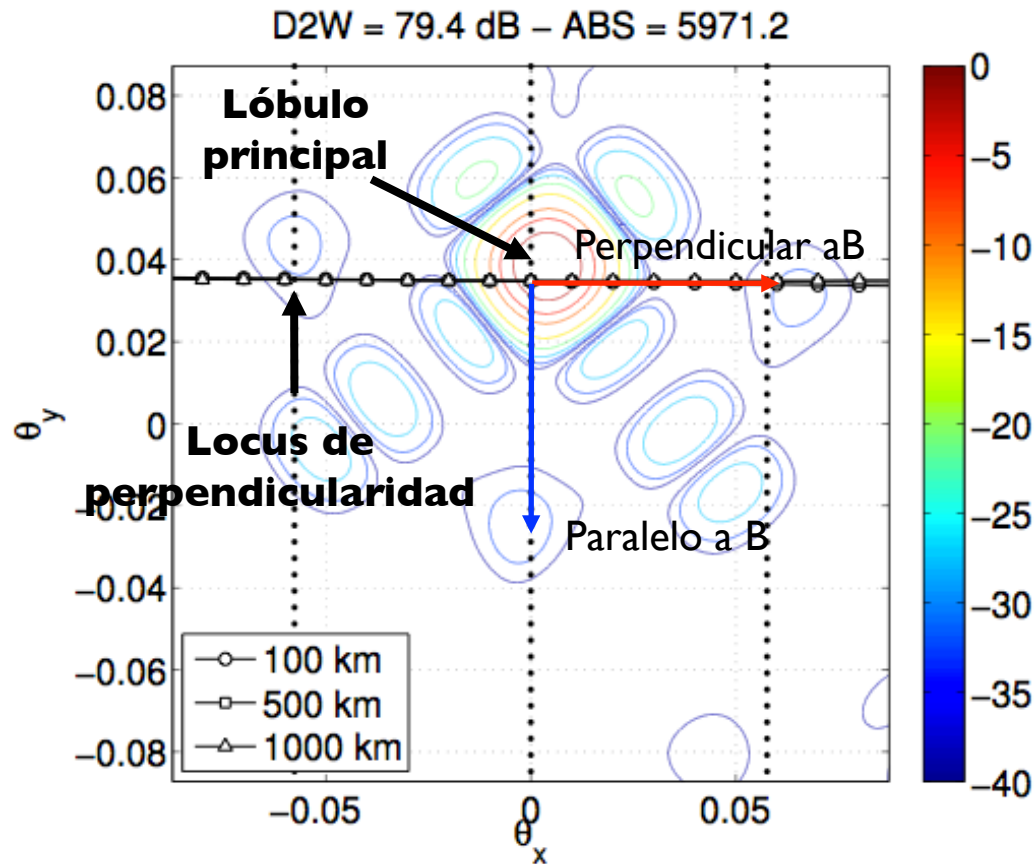
En Jicamarca, operando a 50 MHz, los efectos magneto-iónicos son importantes. Un barrido de la ionósfera con antenas de polarización orthogonal mostraría mapas como los de abajo (medio y derecha). Modelando estos efectos podemos estimar perfiles de Ne y Te/Ti.



Modelando los efectos de propagación magneto-iónica en las señales de dispersión incoherente



Patrón de radiación de la antena



El campo magnético es modelado con IGRF 2010.

- La antena de Jicamarca apunta perp a B (ancho de beam: ~ 1 deg).
- La señal medida es la suma de las señales que provienen de diferentes direcciones.

Ecuación de radar:

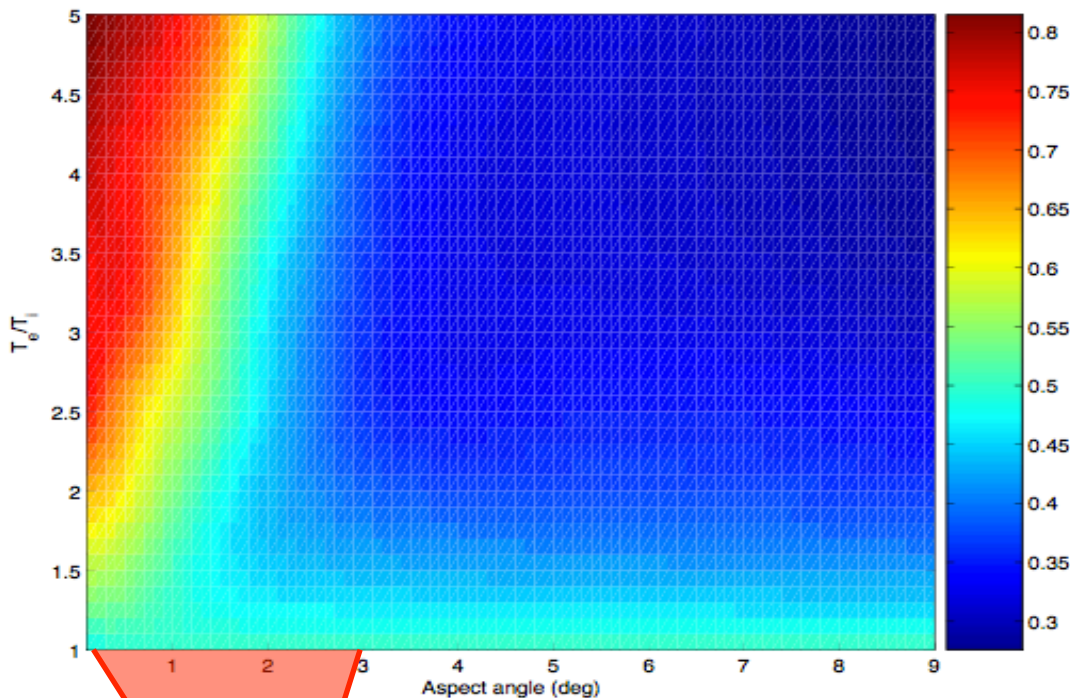
$$\frac{P_r}{E_t K} = \frac{\delta R}{R^2} \int d\Omega W(\hat{\mathbf{r}}) \int d\omega \sigma(\vec{k}, \omega)$$

↑
IS-RCS

$$\sigma(\vec{k}, \omega) = 4\pi r_e^2 \langle |n_e(\vec{k}, \omega)|^2 \rangle$$

IS-RCS y colisiones de Coulomb

Dependencia del IS-RCS con T_e/T_i y ángulo magnético:



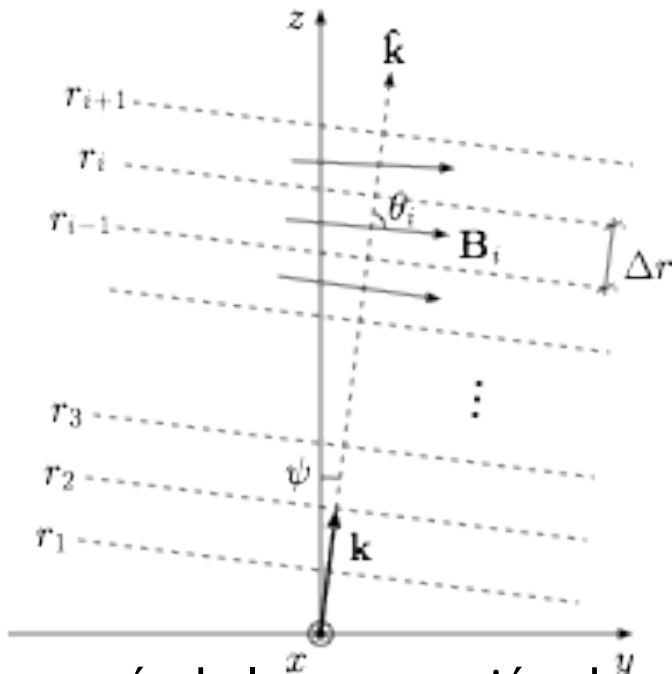
Usando la teoría de dispersión incoherente con colisiones de Coulomb hemos calculado el IS-RCS en función de T_e/T_i y ángulo magnético.

$$\tilde{\sigma} = 4\pi r_e^2 N_e f\left(\frac{T_e}{T_i}\right)$$



La antena de Jicamarca ilumina un rango finito de ángulos magnéticos

Modelo de propagación magneto-iónica (I)



Geometría de la propagación de onda a través un medio no homogéneo magnetizado (ionósfera)

Ecuaciones de Appleton-Hartree

$$Y_L = Y \cos \theta, \quad Y_T = Y \sin \theta, \quad Y = \frac{\Omega}{\omega}, \quad X = \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

$$F_O = F_1 - F_2, \quad F_X = F_1 + F_2, \quad F_1 = \frac{Y_T^2/2}{1-X}, \quad F_2^2 = F_1^2 + Y_L^2$$

$$n_{O,X}^2 = 1 - \frac{X}{1-F_{O,X}}$$

$$\Delta n = \frac{n_O - n_X}{2} \quad \bar{n} = \frac{n_O + n_X}{2} \quad a = \frac{F_O}{Y_L}$$

$$\begin{bmatrix} E_\theta^i \\ E_\phi^i \end{bmatrix} = \frac{e^{-jk_o \bar{n} r}}{1+a^2} \underbrace{\begin{bmatrix} e^{-jk_o \Delta nr} + a^2 e^{jk_o \Delta nr} & 2a \sin(k_o \Delta nr) \\ -2a \sin(k_o \Delta nr) & a^2 e^{-jk_o \Delta nr} + e^{jk_o \Delta nr} \end{bmatrix}}_{\bar{T}_i} \begin{bmatrix} E_\theta^{i-1} \\ E_\phi^{i-1} \end{bmatrix}$$

Vector de campo eléctrico recibido en cada dirección

$$\vec{E}_O^r \propto \kappa_i \underbrace{\bar{T}_1 \bar{T}_2 \cdots \bar{T}_i \bar{T}_i \cdots \bar{T}_2 \bar{T}_1}_{\bar{\Pi}_i} \vec{E}_O^t$$

Matriz de propagación resultante $\rightarrow \bar{\Pi}_i$

Modelo de propagación magneto-iónica (2)

Ecuación de radar:

$$\frac{P_r}{E_t K} = \frac{\delta R}{R^2} \int d\Omega W(\hat{\mathbf{r}}) \int d\omega \sigma(\vec{k}, \omega) \quad \sigma(\vec{k}, \omega) = 4\pi r_e^2 \langle |n_e(\vec{k}, \omega)|^2 \rangle$$

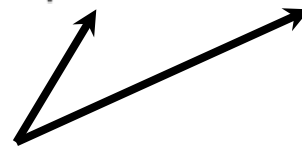
Igual que la anterior, pero $W(\vec{r})$ es un patrón de radiación efectivo

$$W(\vec{r}) = \frac{1}{k^2} G_t(\hat{\mathbf{r}}) G_r(\hat{\mathbf{r}}) \Gamma(\vec{r})$$

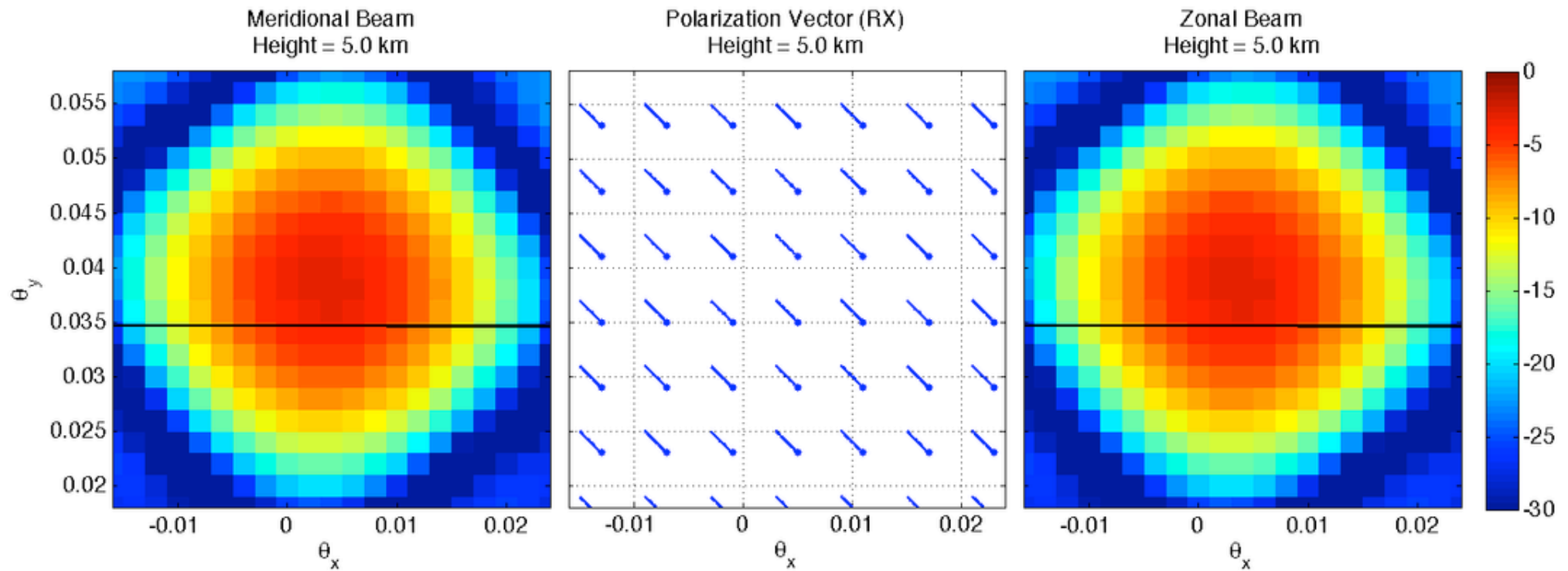
donde $\Gamma(\vec{r})$ es un coeficiente de polarización

$$\Gamma(\vec{r}) = |\hat{\mathbf{p}}_r^\top \bar{\mathbf{\Pi}}(\vec{r}) \hat{\mathbf{p}}_t|^2$$

Vectores unitarios de
polarización



Patrones de radiación modificados por los efectos de propagación magneto-iónica



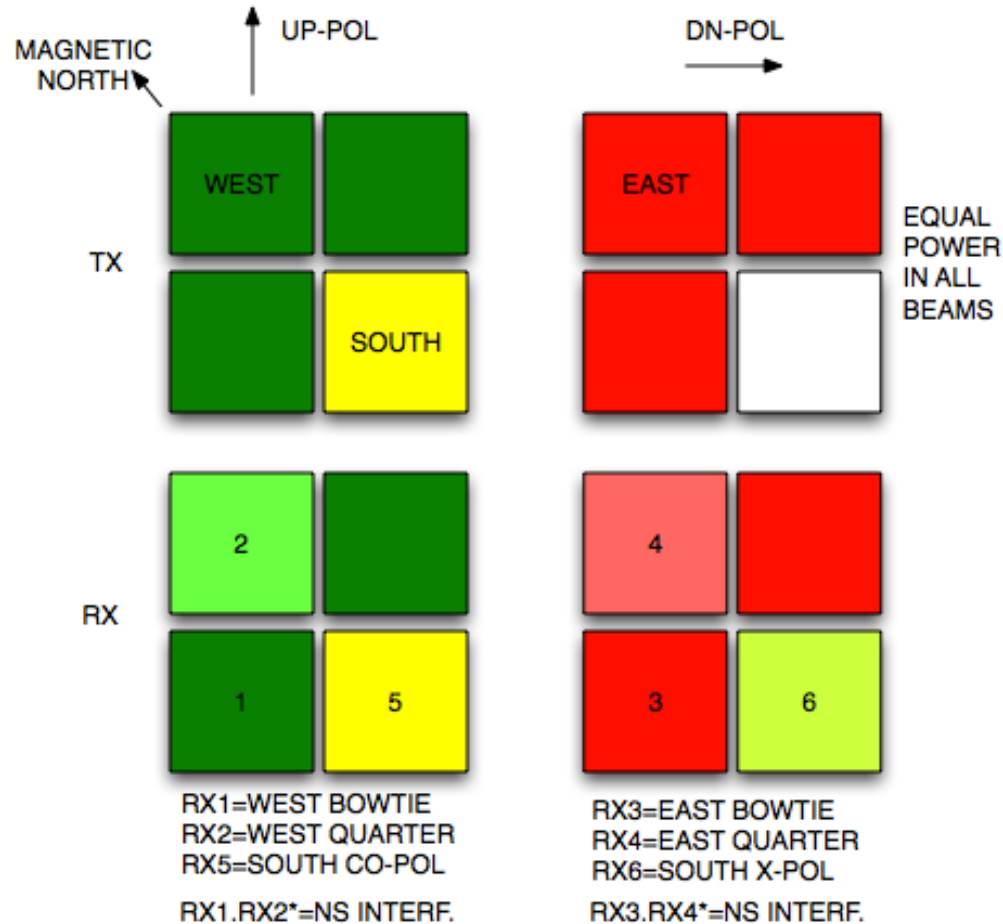
Simulación



Experimento de radar apuntando en 3 direcciones para la estimación de densidades (Ne) y relación de temperaturas (Te/Ti)

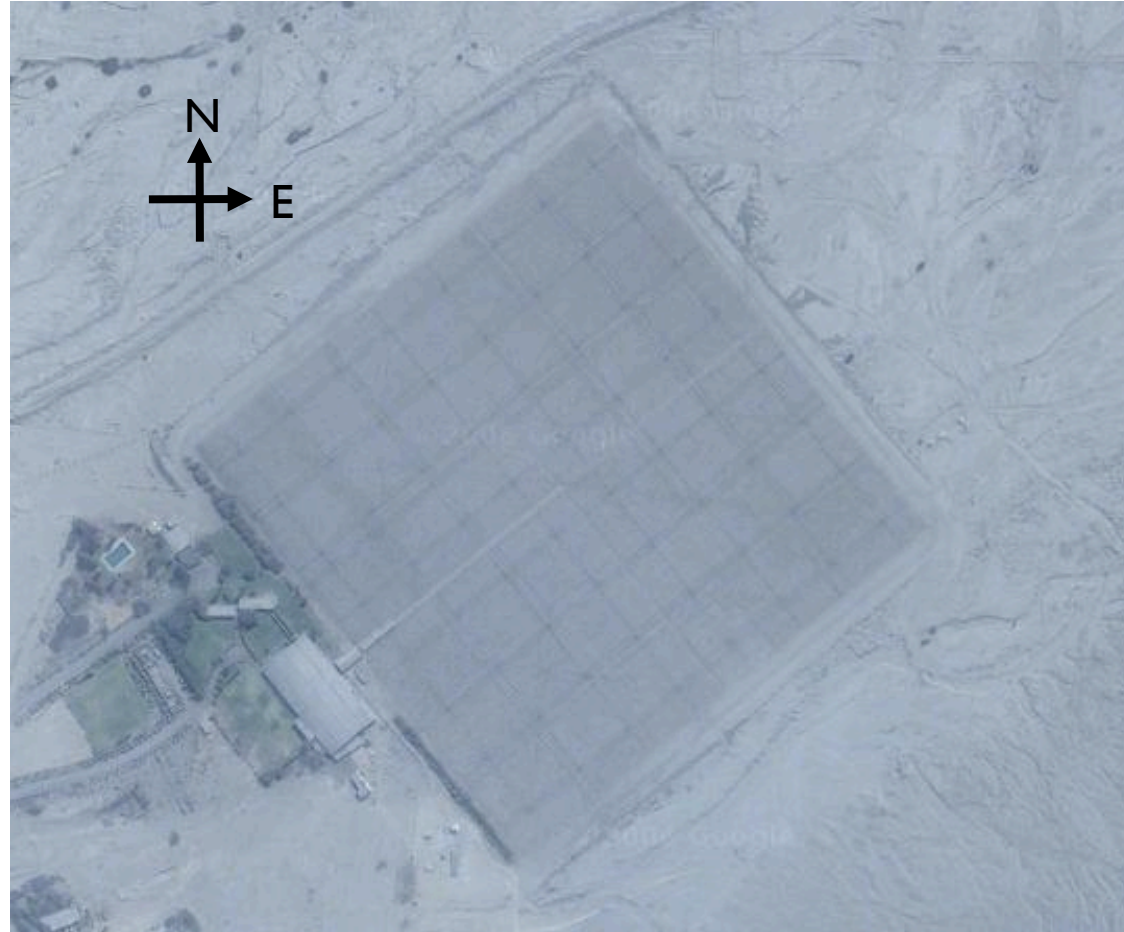


Experimentos de radar con tres haces



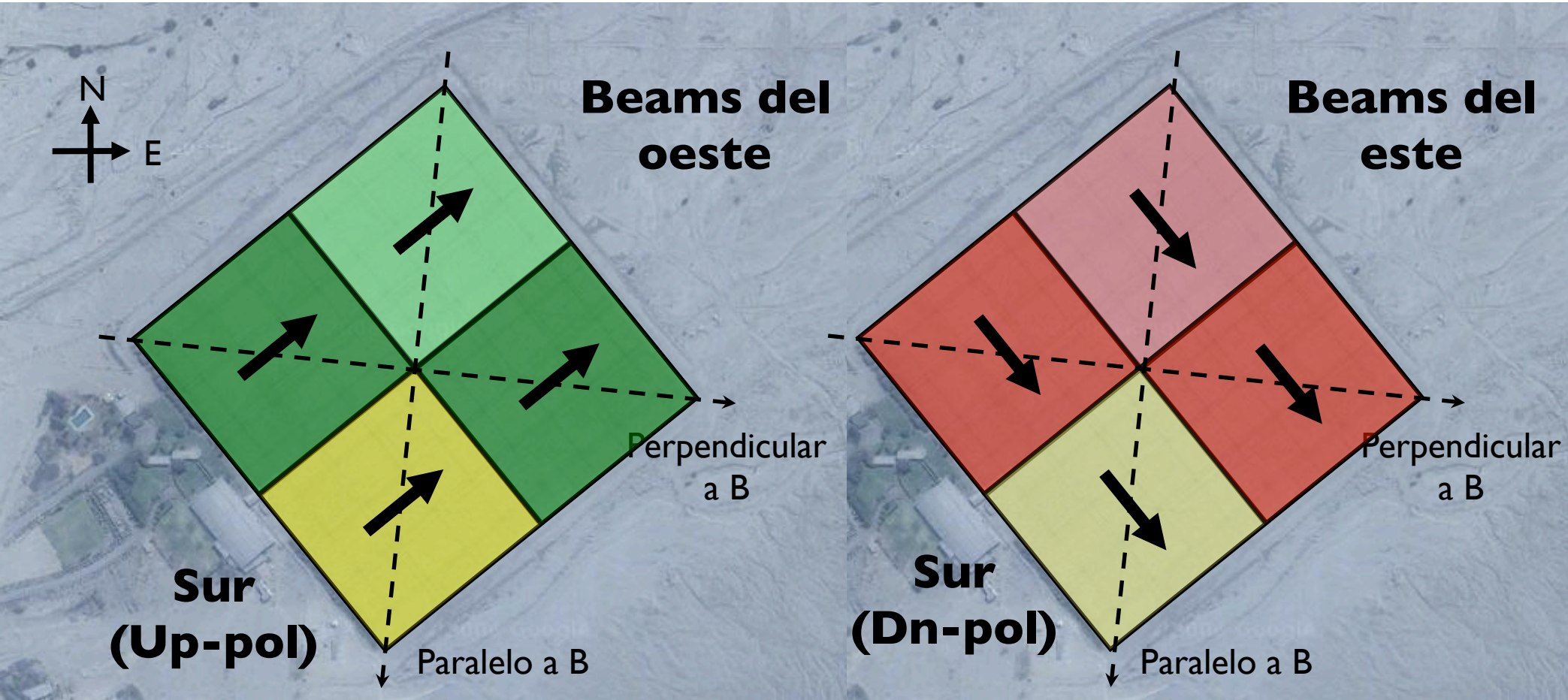
- Tres direcciones de apunte:
 - Este y Oeste (perp a B)
 - Sur ($\sim 3^\circ$ a 4° de perp a B)
- 6 canales de recepción, 2 por cada dirección de apunte.
- Diversidad en polarización (sur)
- Diversidad espacial (este y oeste)
- Parámetros físicos
 - Derivas verticales y zonales
 - Densidad de electrones (N_e)
 - Relación de temperaturas (T_e/T_i)

La antena de Jicamarca tiene 2 polarizaciones, cada polarización es dividida en cuartos:

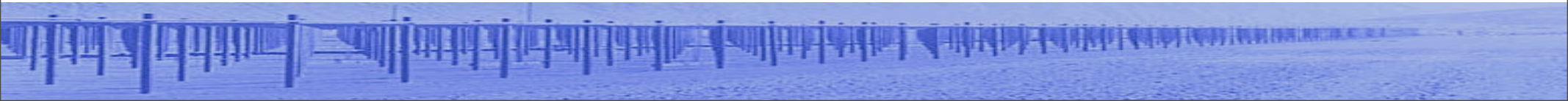


La antena de Jicamarca tiene 2 polarizaciones, cada polarización es dividida en cuartos:

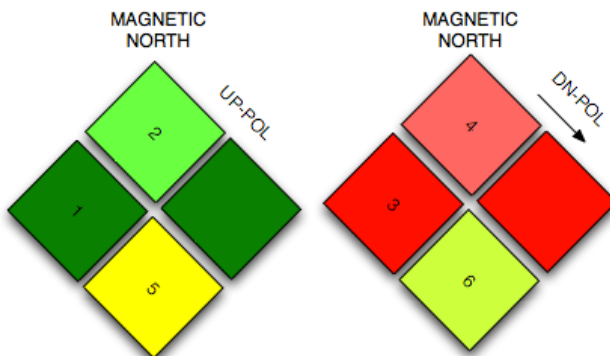
Up-pol: 3 cuartos apuntan al oeste



Dn-pol : 3 cuartos apuntan al este



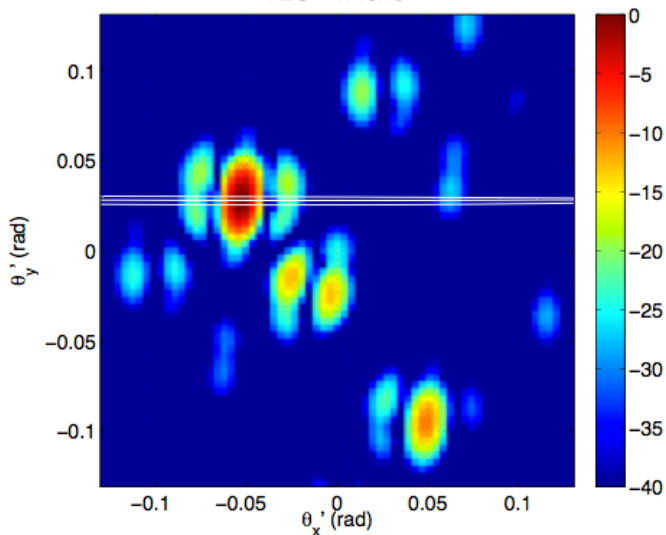
3-Tx, 6-Rx 3 direcciones de apunte



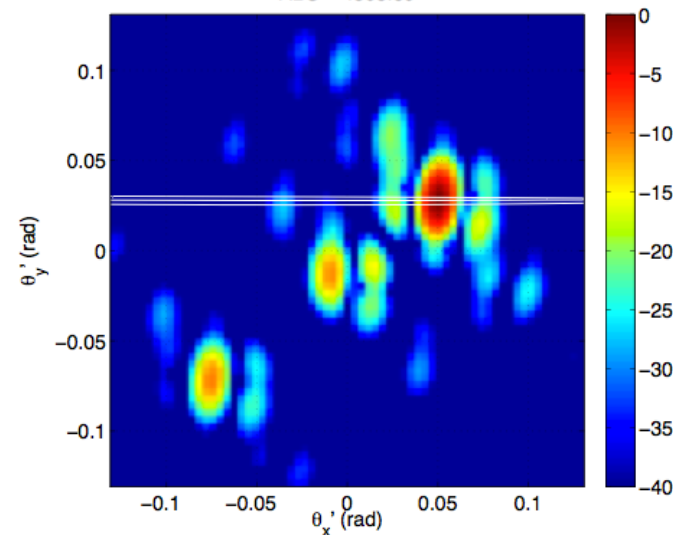
RX1=WEST BOWTIE
RX2=WEST QUARTER
RX5=SOUTH CO-POL
RX1.RX2*=NS INTERF.

RX3=EAST BOWTIE
RX4=EAST QUARTER
RX6=SOUTH X-POL
RX3.RX4*=NS INTERF.

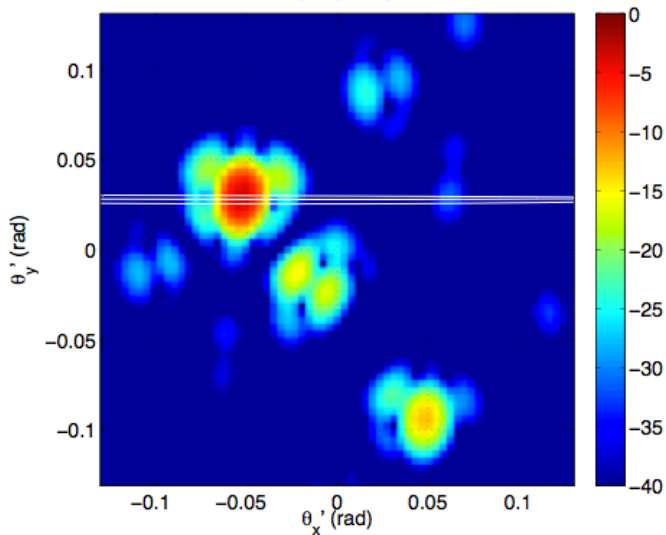
West beam (Bow-tie)
D2W = 78.30 dB
ABS = 4716.19



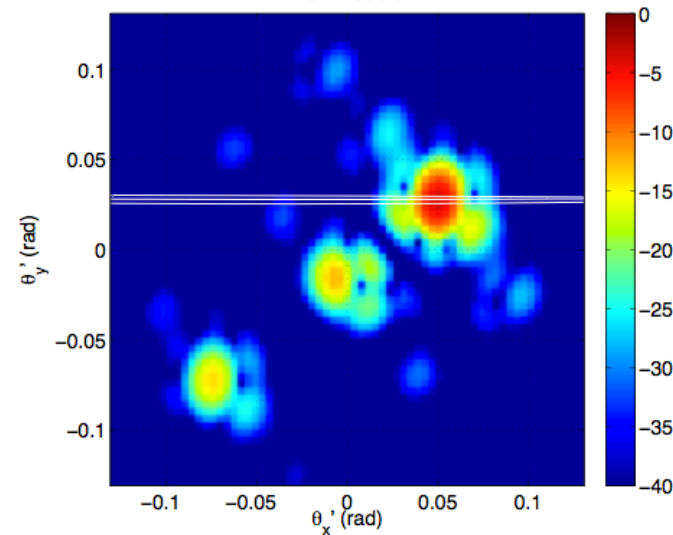
East beam (Bow-tie)
D2W = 78.04 dB
ABS = 4363.89



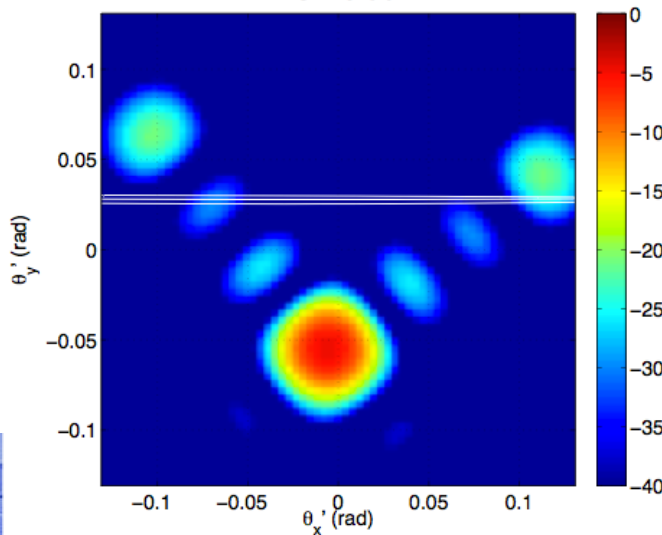
West beam (One quarter)
D2W = 74.88 dB
ABS = 3111.32



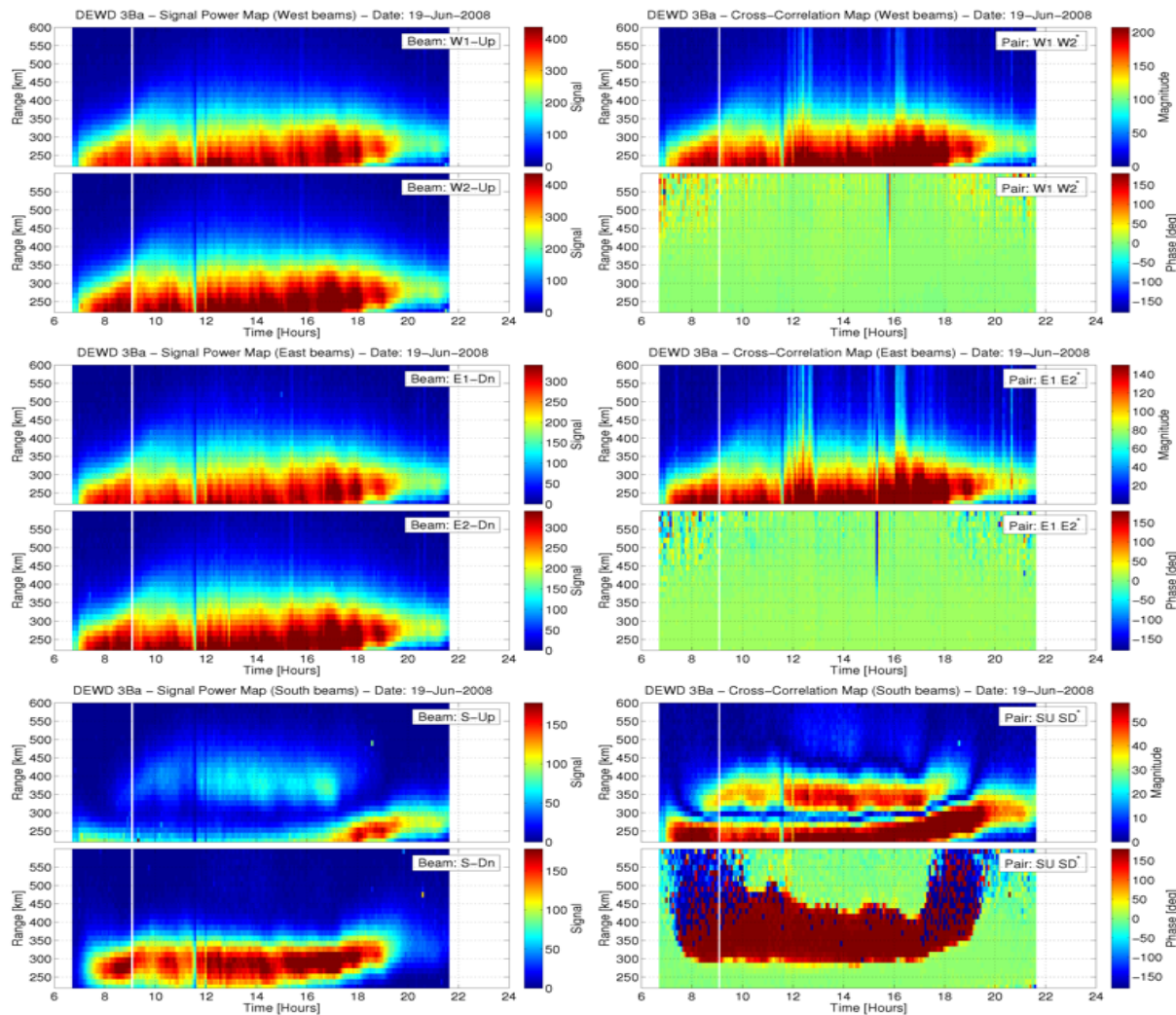
East beam (One quarter)
D2W = 74.54 dB
ABS = 2888.92



South beam (One quarter)
D2W = 73.73 dB
ABS = 4375.94

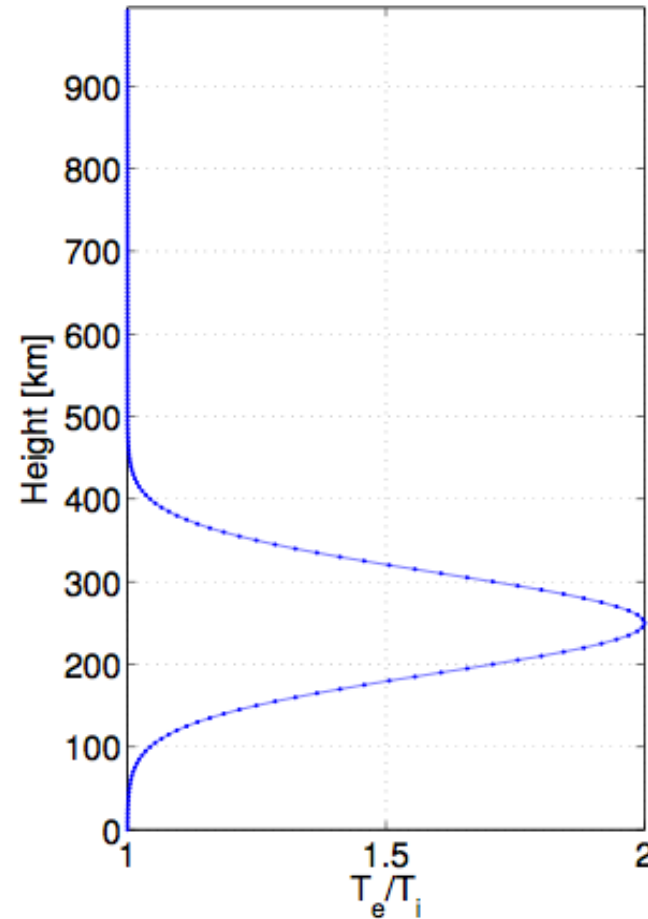
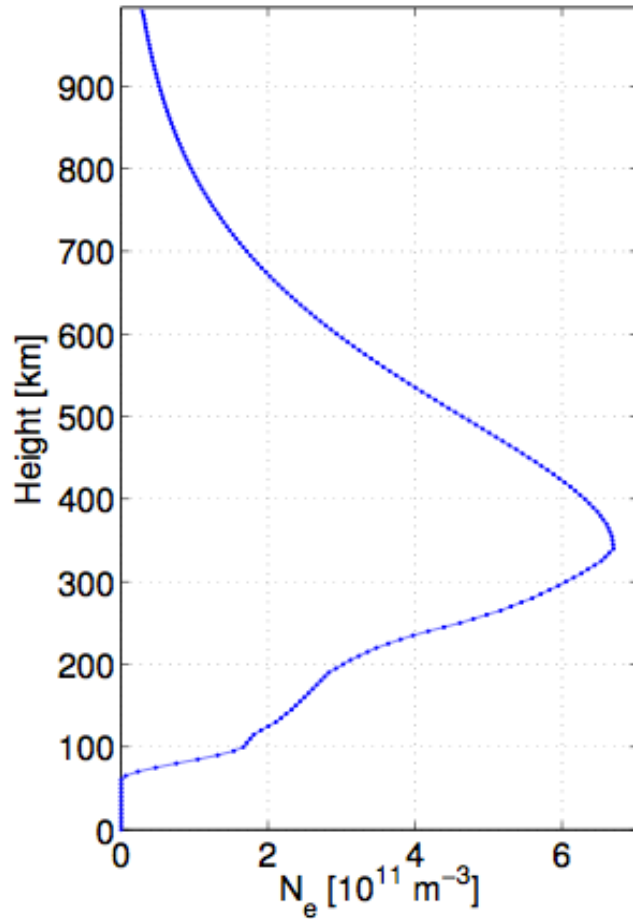


Medidas de potencia y correlación cruzada



- Gráficos de altura vs. tiempo de la potencia y correlación de las señales medidas en el experimento de Junio 19, 2008.
- A la izquierda se muestran los datos de potencia medidos por cada receptor (6 canales).
- A la derecha se muestran los gráficos de magnitud y fase de los datos de correlación entre pares de canales.

Perfiles de N_e y T_e/T_i

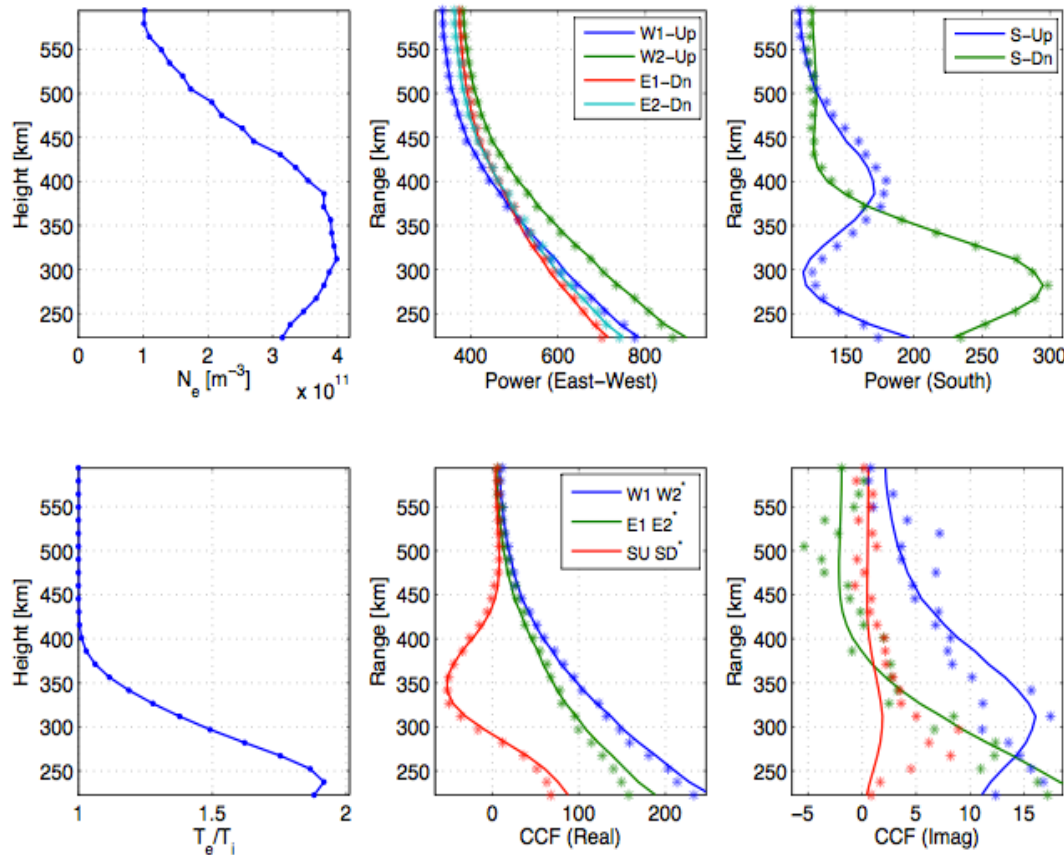


El perfil de densidad se modela como un “piece-wise polinomial” de tercer orden.

El perfil de T_e/T_i se caracteriza por una función gaussiana, asumiendo que $T_e/T_i > 1$.

Ajustes de datos de potencia y correlación

DEWD 3Ba - Date: 19-Jun-2008 13:00:00



Algoritmo de minimización en 2 pasos:
 1. Ajustar por Ne ($T_e = T_i$).
 2. Ajustar por Ne y T_e/T_i .
 Función de costo a minimizar:

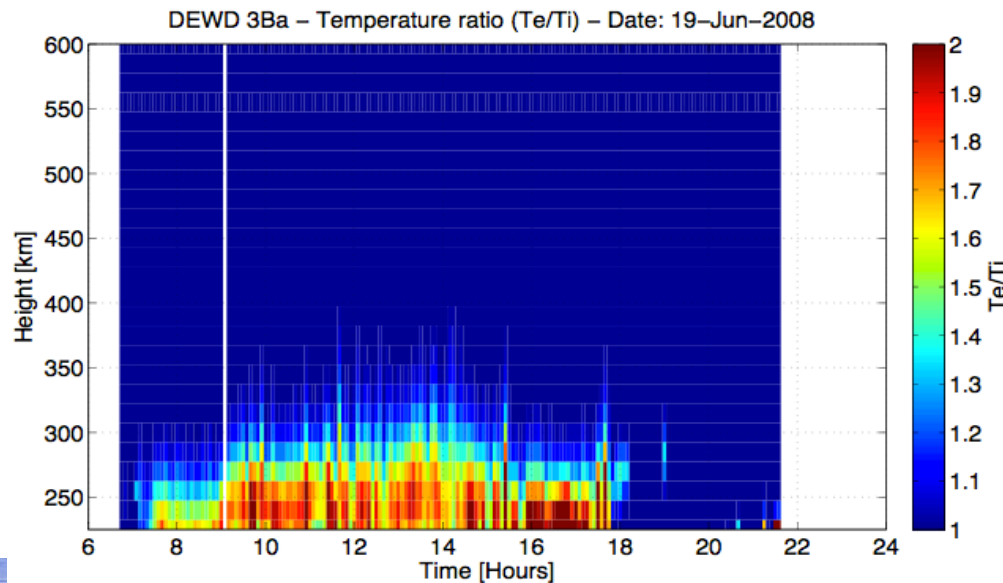
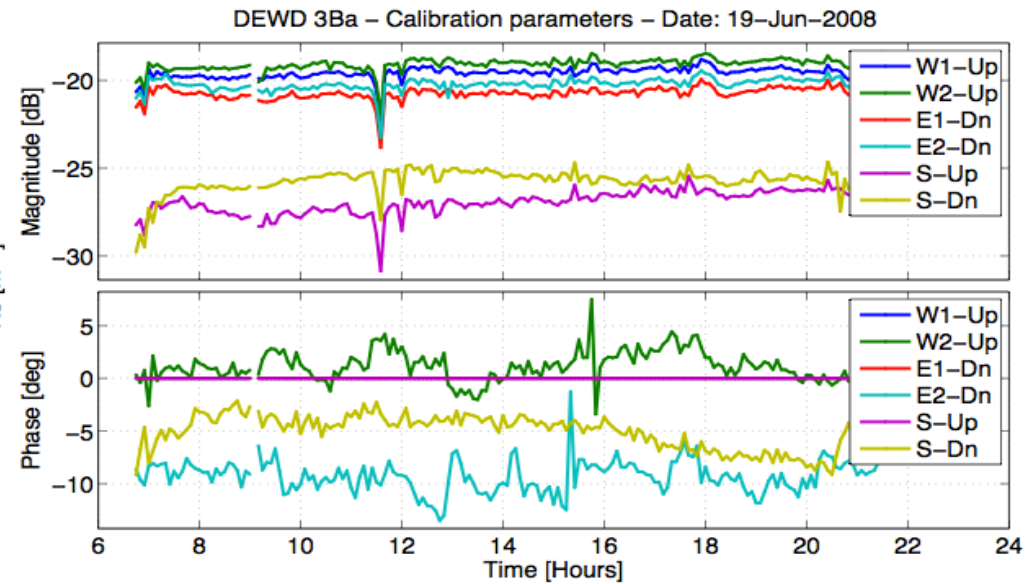
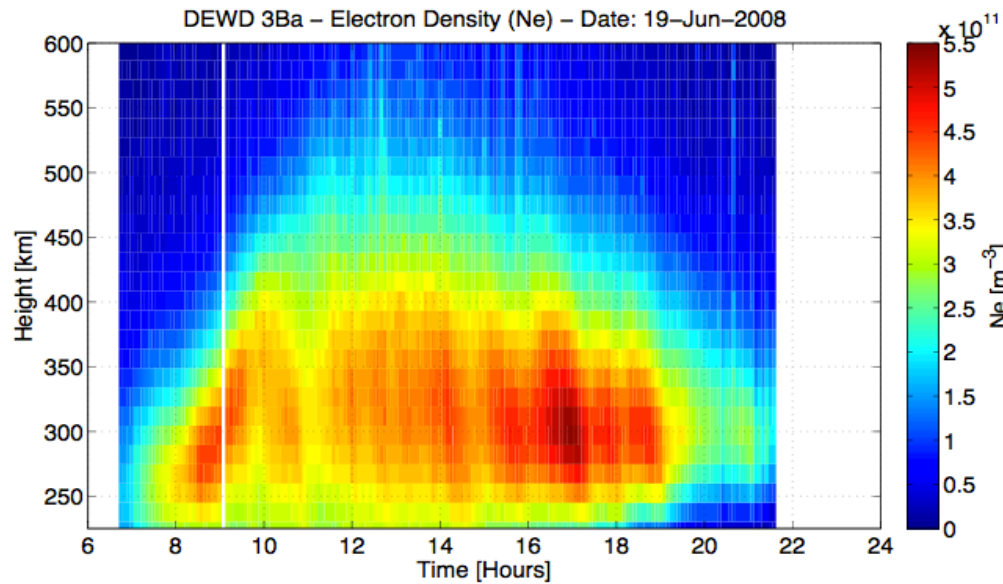
$$\mathcal{E}_{i,j}^2 = \sum_n \delta \vec{m}_{i,j}^T [n] \bar{\mathbf{M}}_{i,j}^{-1} [n] \delta \vec{m}_{i,j} [n]$$

Vector de errores:

$$\delta \vec{m}_{i,j} [n] = \begin{bmatrix} \delta P_i [n] \\ \delta P_j [n] \\ \delta R_{i,j} [n] \\ \delta Q_{i,j} [n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_i [n] - P_i [n] \\ p_j [n] - P_j [n] \\ r_{i,j} [n] - R_{i,j} [n] \\ q_{i,j} [n] - Q_{i,j} [n] \end{bmatrix}$$

Matriz de covarianza $\bar{\mathbf{M}}_{i,j} = \frac{1}{I} \begin{bmatrix} P_i^2 & R_{i,j}^2 + Q_{i,j}^2 & P_i R_{i,j} & P_i Q_{i,j} \\ R_{i,j}^2 + Q_{i,j}^2 & P_j^2 & P_j R_{i,j} & P_j Q_{i,j} \\ P_i R_{i,j} & P_j R_{i,j} & \frac{1}{2} (R_{i,j}^2 - Q_{i,j}^2 + P_i P_j) & R_{i,j} Q_{i,j} \\ P_i Q_{i,j} & P_j Q_{i,j} & R_{i,j} Q_{i,j} & \frac{1}{2} (Q_{i,j}^2 - R_{i,j}^2 + P_i P_j) \end{bmatrix}$

Resultados de la inversión



Parámetros estimados:

- Densidad de electrones
- Perfiles de Te/Ti
- Parámetros de calibración

Conclusiones y trabajos futuros

- El modelado de los datos de radar de dispersión incoherente medidos por el radar de Jicamarca debe considerar:
 - Efectos de colisiones de Coulomb entre electrones e iones
 - Efectos de propagación magneto-iónica
 - Forma de los patrones de radiación de las antenas
- Hemos desarrollado las herramientas para modelar todos estos efectos, pero necesitamos optimizar nuestros algoritmos para su uso rutinario.
- Necesitamos estudiar en mayor detalle la sensibilidad de nuestro modelo a las temperaturas y densidades de la ionósfera.
- Nuestro modelo fue desarrollado solo para un plasma de oxígeno (O^+), necesitamos extender nuestro modelo a plasmas con hidrógeno y helio (H^+ y He^+) para las observaciones la región alta de la ionósfera.



Gracias por su atención.

