# Evaluación del Método Split-Spectrum con Imágenes InSAR para la Estimación de Diferenciales Ionosféricos (ΔTEC) en los Departamentos de Cundinamarca y Boyacá entre los Años 2007 y 2010.

Presentado por:

Daniel Fernando Palomino Escobar cod.20132025008

Yesid Fernando Guerrero Guio cod.20132025020

Director: José Luis Herrera Escorcia

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESIA

PROYECTO DE GRADO

BOGOTÁ

2020

## AGRADECIMIENTOS

Dedicado en primer lugar a Dios, el dador de vida, por poder llevar a cabo este proyecto de grado y por ser nuestra guía en nuestras vidas.

A nuestros Padres por todo su esfuerzo y dedicación por darnos un mejor futuro.

A nuestros familiares y amigos por su apoyo constante en todo momento.

A nuestro director de tesis MSc. José Luis Escorcia por la confianza, apoyo y dirección en el desarrollo del proyecto.

A nuestra querida alma mater la Universidad Francisco José de Caldas, al proyecto de Ingeniería Catastral y Geodesia, y a toda la comunidad académica en general por las herramientas y apoyo brindado.

# 1 RESUMEN

En este trabajo se llevó a cabo una metodología de comparación con datos GNSS obtenidos de estaciones geodésicas con el fin de evaluar el módulo ionosférico de ISCE (Split-spectrum) para el cálculo del ΔTEC y la corrección ionosférica en trabajos de Interferometría. Se desarrolló la evaluación en una zona local de Colombia, en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, con imágenes del satélite ALOS-PALSAR en su mayoría en modo FBD y algunos en modo FBS entre los años 2007 y 2010, identificando cada uno de los días disponibles en el servidor de descarga vertex, según su actividad geomagnética e ionosférica, con el fin de determinar los días tranquilos y perturbados. Luego se organizaron pares interferométricos (perturbado-tranquilo, tranquilo-tranquilo, perturbado-perturbado) para observar las afectaciones ionosféricas en el interferograma en los diferentes anchos de banda. También se tuvo en cuenta la actividad sísmica en los intervalos de tiempo para descartar franjas debidas a movimientos de tierra. Mediante el software ISCE se realizó el procesamiento de lo interferogramas incorporando el módulo ionosférico Split-spectrum con los filtros y configuraciones por defecto, a su vez se solicitaron las estaciones GNSS en la zona para generar los mapas ΔTEC, según las configuraciones pares interferométricos. Finalmente se realizó la correlación entre los mapas diferenciales obtenidos por GNSS y Radar; en los resultados se muestran las dificultades de la división de la fase dispersiva por la baja coherencia y errores de procesamiento de las imágenes: En los cuatro frames del interferograma 6 (perturbado-tranquilo) se evidenciaron los efectos ionosféricos, aunque solo en dos se dividió la fase dispersiva adecuadamente, Finalmente al validar los resultados comparando los mapas TEC con los datos GNSS encontramos que la correlación fue de 0.14 y 0.83 para la franja 070 y 080 respectivamente, la baja correlación de la franja 070 se debe a que el desenvolvimiento de la fase no fue correcto. Se obtuvieron otros interferogramas

(tranquilo-tranquilo, perturbado-perturbado) donde aparentemente se calculó adecuadamente la fase dispersiva, sin embargo, la afectación ionosférica no es evidente y la correlación con los mapas TEC GNSS fue muy baja, debido a que el módulo ionosférico de interferometría no calcula adecuadamente las fases dispersivas ionosféricas donde los TEC diferenciales entre los días es nulo o muy cercano a cero. La fase dispersiva calculada por ISCE en estos casos se debe a otras fuentes dispersivas.

# 2 CONTENIDO

*AGRADECIMIENTOS* ..... *II*

*1 RESUMEN* ..... *III*

*2 CONTENIDO* ..... *V*

*3 LISTA DE FIGURAS* ..... *IX*

*4 LISTA DE TABLAS* ..... *XII*

*5 INTRODUCCIÓN* ..... *13*

**5.1 Justificación y planteamiento del Problema** ..... **15**

**5.2 Objetivo General** ..... **16**

5.2.1 Objetivos específicos. ..... 16

**5.3 Estado del Arte** ..... **17**

5.3.1 Metodología GNSS ..... 17

5.3.2 Metodología Split Spectrum ..... 20

5.3.3 Otros métodos ..... 23

*6 MARCO TEÓRICO* ..... *25*

**6.1 IONÓSFERA** ..... **25**

6.1.1 Definición de la ionósfera ..... 25

6.1.2 Clasificación terrestre de la ionósfera ..... 27

6.1.3 Contenido total de electrones ..... 28

**6.2 GNSS (Global Navigation Satellite System)** ..... **29**

**6.3 Conceptos Básicos de sistemas de Radar** ..... **29**

6.3.1 Sistemas de radar ..... 29
6.3.2 Ecuación del radar ..... 30
6.3.3 Bandas (frecuencias de radar) ..... 30
6.3.4 Radar de apertura sintética (SAR) ..... 31
6.3.5 Propagación de las ondas de radar ..... 32
6.3.5.1 Efectos ionosféricos en ondas de radio ..... 33
**6.4 Conceptos básicos de Interferometría ..... 36**
6.4.1 Fase interferométrica ..... 37
6.4.2 Efectos ionosféricos en los interferogramas ..... 38
**6.5 Método Split-Spectrum ..... 39**
***7 METODOLOGÍA ..... 40***
**7.1 Consulta de la bibliografía ..... 41**
**7.2 Definición del área de estudio ..... 41**
**7.3 Adquisición de los Datos ..... 42**
7.3.1 Adquisición de las imágenes de Radar ..... 42
7.3.2 Adquisición de los datos TEC Global ..... 42
7.3.3 Adquisición de los datos Rinex locales ..... 42
**7.4 Procesamiento de los datos InSAR ..... 43**
**7.5 Cálculo del mapa TEC global ..... 44**
**7.6 Procesamiento de los datos RINEX y Cálculo del mapa TEC local. ..... 44**
**7.7 Comparación y análisis de mapas TEC GNSS e InSAR ..... 44**
**7.8 Mitigación Interferograma ..... 44**
***8 DATOS ..... 45***

*9 DESARROLLO METODOLOGICO ..... 46*

**9.1 Elección de los Días. ..... 46**

9.1.1 Datos FBD ..... 46

9.1.1.1 Path: 144 ..... 46

9.1.1.2 Path: 145 ..... 49

9.1.2 Datos FBS ..... 51

**9.2 Configuración de los interferogramas ..... 51**

**9.3 Análisis Sismológico. ..... 53**

**9.4 Análisis Magnético e Ionosférico ..... 55**

9.4.1 Índices Magnéticos ..... 55

9.4.2 Mapas Globales Ionosféricos ..... 60

**9.5 Procesamiento ..... 64**

*10 RESULTADOS ..... 65*

**10.1 Método Split-Spectrum ..... 65**

10.1.1 Análisis Path 144 ..... 65

10.1.2 Análisis Path 145 ..... 69

10.1.3 Path 144 modo FBS ..... 74

10.1.4 Discusión ..... 76

**10.2 Mapas GNSS ..... 77**

10.2.1 26-07-2009 Y 10-09-2009 (Correspondiente al interferograma 2) ..... 77

10.2.2 07-08-2007 Y 09-05-2008 (Correspondiente al interferograma 6) ..... 78

10.2.3 09-05-2008 Y 24-06-2008 (Correspondiente al interferograma 7) ..... 79

10.2.4 13-03-2010 Y 28-04-2010 (Correspondiente al interferograma 11) ..... 80

**10.3 Correlaciones ..... 82**

10.3.1 Interferograma # 2 ..... 82

10.3.1.1 Frame 070 ..... 82

10.3.1.2 Frame 080 ..... 82

10.3.1.3 Frame 090 ..... 82

10.3.1.4 Frame 100 ..... 83

10.3.2 Interferograma # 6 ..... 84

10.3.2.1 Frame 070 ..... 84

10.3.2.2 Frame 080 ..... 85

10.3.2.3 Frame 090 ..... 86

10.3.2.4 Frame 100 ..... 87

10.3.3 Interferograma # 7 ..... 89

10.3.3.1 Frame 070 ..... 89

10.3.3.2 Frame 080 ..... 90

10.3.3.3 Frame 090 ..... 91

10.3.3.4 Frame 100 ..... 92

10.3.4 Interferograma 11 ..... 93

10.3.4.1 Frame 070 ..... 93

10.3.4.2 Frame 080 ..... 93

10.3.4.3 Frame 090 ..... 94

10.3.4.4 Frame 100 ..... 95

10.3.5 Discusión ..... 96

***11 CONCLUSIONES ..... 98***

***12 DISCUSIÓN ..... 100***

***13 BIBLIOGRAFÍA ..... 130***

# 3 LISTA DE FIGURAS

*Figura 1. Capas de la Ionósfera (Y.C.Yeh, 1972)* ..... *26*

*Figura 2. Sistema SAR desde un satélite. Ferretti et al. (2006)* ..... *32*

*Figura 3. Geometría de la interferometría de sistemas SAR. (Ferretti et al.2006, Pag 17)* ..... *36*

*Figura 4. Parámetros geométricos de un sistema de satélite de Interferometría SAR. (Ferretti et al.2006)* ..... *37*

*Figura 5. La ionosfera y el sistema SAR. (Ferretti et al.2006)* ..... *39*

*Figura 6. Zona de estudio* ..... *41*

*Figura 7. Comportamiento ionosférico diario de los días disponibles path 144 Modo FBD* ..... *48*

*Figura 8. Comportamiento ionosférico diario de los días disponibles path 145 Modo FBD* ..... *50*

*Figura 9. Comportamiento ionosférico diario de los días disponibles path 144 Modo FBS* ..... *51*

*Figura 10. Eventos sísmicos entre las fechas de los interferogramas. Datos obtenidos del servicio geológico colombiano. Path 144 Datos FBD* ..... *53*

*Figura 11. Eventos sísmicos entre las fechas de los interferogramas. Datos obtenidos del servicio geológico Colombiano. Path 145 FBD.* ..... *54*

*Figura 12. Path 144 FBS.* ..... *55*

*Figura 13. Ciclo solar. Tomado de (Spaceweather)* ..... *56*

*Figura 14. Resultados Path 144 Modo FBD.* ..... *65*

*Figura 15. Corrección del interferograma número 2. (a) Interferograma 2. (b) Fase ionosférica. (c) Mapa TEC ionosférico. (d) Interferograma compensado por ionósfera. (e) Exactitud esperada de la estimación ionosférica en cm.* ..... *68*

*Figura 16. Resultados Path 145 Modo FBD* ..... *69*

*Figura 17. Corrección del interferograma número 6. (a) Interferograma 6. (b) Fase ionosférica. (c) Mapa TEC ionosférico. (d) Interferograma compensado por ionósfera. (e) Exactitud esperada de la estimación ionosférica en cm.* ..... *71*

*Figura 18. Mapa TEC calculado por ISCE del Frame 070 interferograma 6.* ..... *73*

*Figura 19. Corrección del interferograma número 7. (a) Interferograma 7. (b) Fase ionosférica. (c) Mapa TEC ionosférico. (d) Interferograma compensado por ionósfera. (e) Exactitud esperada de la estimación ionosférica en cm.* ..... 73

*Figura 20. Resultados Path 144 Modo FBS (a) Interferograma 11. (b) Mapa de coherencia. (c) Fase Dispersiva. (d) Fase no dispersiva.* ..... 74

*Figura 21. Corrección del interferograma número 11. (a) Interferograma 11. (b) Fase ionosférica. (c) Mapa TEC ionosférico. (d) Interferograma compensado por ionósfera. (e) Exactitud esperada de la estimación ionosférica en cm.* ..... 75

*Figura 22. Mapa Diferencial TEC GNSS obtenido para los días correspondientes al interferograma 2.* ..... 77

*Figura 23. Mapa Diferencial TEC GNSS obtenido para los días correspondientes al interferograma 6.* ..... 78

*Figura 24. Mapa Diferencial TEC GNSS obtenido para los días correspondientes al interferograma 7.* ..... 79

*Figura 25. Mapa Diferencial TEC GNSS obtenido para los días correspondientes al interferograma 11* ..... 80

*Figura 26. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 2, frame 090* ..... 82

*Figura 27. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 2, frame 100* ..... 83

*Figura 28. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 6, frame 070.* ..... 84

*Figura 29. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 6, frame 080.* ..... 85

*Figura 30. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 6, frame 090.* ..... 86

*Figura 31. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 6, frame 100.* ..... 87

*Figura 32. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 7, frame 070* ..... 89

*Figura 33. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 7, frame 080* ..... 90

*Figura 34. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 7, frame 090* ..... 91

*Figura 35. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 7, frame 100* ..... 92

*Figura 36. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 11, frame 080* ..... 93

*Figura 37. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 11, frame 090* ..... 94

*Figura 38. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 11, frame 100* ..... 95

*Figura 39. Convención de nombres de archivos estandarizados ALOS PALSAR.* ..... 102

*Figura 40. Geometría de modos ALOS PALSAR (GITHUB)* ..... 102

*Figura 41. Características Alos PALSAR* ..... *103*

*Figura 42. Escalas de tormentas Geomágneticas. (NOAA)* ..... *104*

*Figura 43. Relación de Conversión índice Cp (Postdam).* ..... *105*

*Figura 44. Relación de conversión índice C9 (Potsdam)* ..... *105*

*Figura 45. Interfaz GPS_TEC* ..... *108*

*Figura 46. Red de estaciones MAGNA ECO* ..... *109*

*Figura 47. Mapas TEC.* ..... *112*

*Figura 48. Mapa diferencias TEC entre el 26 de julio de 2010 y el 10 de septiembre de 2009* ..... *113*

*Figura 49. Puntos de extracción del mapa GNSS TEC y mapa RADAR TEC para la correlacion (Fechas:13-03-2010 Y 28-04-2010)* ..... *114*

*Figura 50. Ejemplo de Datos de muestra* ..... *115*

*Figura 51. Ejemplo de correlación.* ..... *116*

*Figura 52. Gráfica de residuales interferograma 6, frame 070.* ..... *117*

*Figura 53. Gráfico Hat Values* ..... *119*

*Figura 54. Correlación sin datos atípicos interferograma 6, frame 070.* ..... *120*

*Figura 55. Gráfica de residuales interferograma 6, frame 080.* ..... *121*

*Figura 56. Gráfica Hat-Values* ..... *122*

*Figura 57. Correlación sin datos atípicos interferograma 6, frame 080* ..... *123*

*Figura 61. Gráfica de residuales interferograma 6, frame 090.* ..... *124*

*Figura 62. Gráfica Hat-Values* ..... *125*

*Figura 63. Correlación sin datos atípicos interferograma 6, frame 090.* ..... *126*

*Figura 58. Gráfica de residuales interferograma 6, frame 100.* ..... *127*

*Figura 59. Gráfica Hat-Values* ..... *128*

*Figura 60. Correlación sin datos atípicos interferograma 6, frame 100.* ..... *129*

# 4 LISTA DE TABLAS

*Tabla 1. Efectos de la ionósfera sobre las señales electromagnéticas Alos Palsar.* ..... *36*

*Tabla 2. Información de la Configuración de los pares interferométricos* ..... *52*

*Tabla 3. Índices magnéticos días Path 144 Modo FBD.* ..... *57*

*Tabla 4. Índices magnéticos días Path 145 Modo FBD* ..... *58*

*Tabla 5. Índices magnéticos días Path 14 Modo FBS* ..... *59*

*Tabla 6. Mapas Globales ionosféricos Path 144 Modo FBD. Elaboración propia* ..... *60*

*Tabla 7. Mapas Globales ionosféricos Path 145 Modo FBD. Elaboración propia* ..... *62*

*Tabla 8. Mapas Globales ionosféricos Path 144 Modo FBS. Elaboración propia* ..... *63*

*Tabla 9. Parámetros del satélite ALOS-2. Tomado de GOMBA* ..... *102*

# 5 INTRODUCCIÓN

Los satélites de radar recogen la información de la fase y la amplitud de las señales electromagnéticas reflejadas o redirigidas generando una matriz de valores complejos. Durante el recorrido, la señal electromagnética debe atravesar por la ionósfera, una capa gruesa de la atmósfera, que se extiende hasta arriba de la órbita del satélite. (Ferretti, Monti-Guarnieri, Prati, & Rocca, 2007). Como su nombre lo indica, la ionósfera está compuesta por iones positivos y negativos, que interactúan con la señal, produciendo retrasos que se reflejan en las imágenes como ruido.

Ferretti et al.(2006) plantea que la ionósfera no afecta las imágenes en condiciones estáticas y asumiendo esta hipótesis se han tratado las imágenes SAR, sin embargo la ionósfera es una capa heterogénea, como lo han mostrado varios investigadores en sus trabajos: evaluando, implementando y mejorando métodos para la estimación, y corrección de los efectos de disturbios ionosféricos en diferentes condiciones (latitudes medias, pre-sismos, post sismos, movimientos de flujos de hielo y en auroras en latitudes altas).

La interferometría de Spaceborne Synthetic Aperture Radar (InSAR) ha sido exitosamente utilizada para la medición del movimiento de la superficie de la tierra, y determinación de la topografía; además se han realizado estudios sobre aplicaciones de monitoreo terrestre y geofísico. Por lo tanto, para obtener resultados exactos y confiables se deben corregir los retrasos en la señal.

El método Split spectrum puede estimar de manera efectiva la superposición de pantalla de fase ionosférica diferencial en interferogramas**.** Este método puede proporcionar un monitoreo de la ionósfera y permitiría abarcar amplias superficies terrestres sin necesidad de estaciones geodésicas, además que es un método económico, y puede hacer una evaluación de pixel por pixel,

es decir posee mejor resolución espacial para determinar los ΔTEC (Diferencial del contenido total de electrones).

## 5.1 Justificación y planteamiento del Problema

Actualmente las imágenes InSAR en Colombia se han utilizado para estudios geofísicos y de movimientos de tierra, pero no se ha implementado su uso para el estudio de la ionósfera o para realizar correcciones ionosféricas. En países de latitudes altas se ha empezado a investigar los efectos de la ionósfera en imágenes SAR, aprovechando las características de funcionamiento del radar. Sin embargo, en Colombia no se han tenido en cuenta estas afectaciones, por ejemplo, en los trabajos de grado realizados en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

El presente estudio aportará al desarrollo de una metodología, que todavía se tiene que seguir mejorando, para incentivar la investigación de la ionósfera en Colombia mediante las imágenes de radar, y aprovechando su funcionalidad para realizar las correcciones ionosféricas debidas en trabajos de Interferometría.

## 5.2 Objetivo General

Evaluar el método Split Spectrum para el cálculo de diferenciales ionosféricos en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá.

### 5.2.1 Objetivos específicos.

- Calcular y representar los ΔTEC obtenidos mediante imágenes InSAR.
- Calcular y representar los ΔTEC obtenidos a partir de datos GNSS.
- Comparar y analizar los resultados obtenidos en los métodos utilizados para el cálculo del ΔTEC.

## 5.3 Estado del Arte

El proceso de investigación se inició recopilando información bibliográfica relacionada con el tema. Los trabajos y estudios se han realizado desde diferentes perspectivas y diferentes metodologías, donde el objetivo es el estudio de las afectaciones y correcciones ionosféricas. Varios de estos proyectos han sido guía para proceso metodológico del presente proyecto. El método más utilizado es a partir de datos GNSS; sin embargo, existen otros que son interesantes porque se pueden evaluar ΔTEC con procesos totalmente diferentes, en el cual no dependen de la implementación de estaciones geodésicas como es el método split spectrum el cual está asociado con procesamiento de imágenes InSAR, y algunos métodos más que trataremos a continuación que son pertinentes para tener en cuenta en este trabajo.

### 5.3.1 Metodología GNSS

El algoritmo que calcula la corrección ionosférica se puede dividir en etapas o fases. En la primera, los datos GPS se combinan para calcular el observable ionosférico de código y fase, también denominado combinación libre de geometría. Las ecuaciones muestran las expresiones para el observable ionosférico del código y fase respectivamente para cada instante de medición:

- Observaciones de código:

$$P_1(t) = P_1(t) - P_2(t) = k\ sTEC(t) + b_r + b^s + \varepsilon_{p_1}$$

Donde:

$P_1\ y\ P_2$ Son las observaciones de código, $b_r\ y\ b^s$ son los retardos instrumentales del código del receptor y del satélite respectivamente, $\varepsilon_{p_1}$ es el error resultante de la combinación de los errores de medición para el código respectivamente, $k$ es una constante, los subíndices 1 y 2 refieren a las dos frecuencias $f_1$ ~ 1.5 GHz y $f_2$ ~ 1.2 GHz utilizadas por los satélites GPS.

- Observaciones de fase:

$$L_1(t) = L_1(t) - L_2(t) = k\ sTEC(t) + B_r + B^s + \beta + \varepsilon_{L_1}$$

Donde:

$L_1\ y\ L_2$ Son las observaciones de fase, $B_r\ y\ B^s$ son los retardos instrumentales del código del receptor y del satélite respectivamente, $\beta$ es el término que contiene a las ambigüedades de fase, $\varepsilon_{L_1}$ es el error resultante de la combinación de los errores de medición para el código respectivamente, $k$ es una constante, los subíndices 1 y 2 refieren a las dos frecuencias $f_1$ ~ 1.5 GHz y $f_2$ ~ 1.2 GHz utilizadas por los satélites GPS.

La unidad de medición del TEC se denomina TECu y equivale a $1x10^{16}$ electrones/ $m^2$. Cuando el camino S coincide con la dirección radial del punto de observación, es decir apunta en la dirección vertical, a la integral se la denomina vTEC (TEC vertical), en cualquier otro caso la integral se denomina sTEC (slant TEC).

Los retardos instrumentales se asumen como constantes para un periodo de algunos días. Los observables de código y fase contienen la misma información ionosférica pero sus propiedades son diferentes. El de código tiene la ventaja de no estar afectado por las ambigüedades que sí afectan al de fase. Sin embargo, este observable está contaminado por un alto ruido de medición y por el efecto del multicamino de las señales satelitales. El observable de fase tiene la ventaja de que los niveles de ruido y multicamino son unas 100 veces menores, pero su mayor desventaja es la presencia del término ß que contiene a las ambigüedades de fase. Ese término permanece constante para la señal del satélite que es rastreada sin saltos de ciclo; en otras palabras ß permanece constante para todo arco continuo de un satélite dado.

La etapa siguiente del algoritmo de procesamiento permite calcular una función que represente la distribución del vTEC, es decir una función que represente la corrección ionosférica para toda el

área de cobertura del sistema. De forma específica, ésta queda definida principalmente por el alcance espacial de los datos provistos por las estaciones de la red de control. La forma algebraica de la función que representa al vTEC en la región responde a las siguientes características: la variabilidad espacial está representada por un desarrollo en Armónicos Esféricos de grado 6 y orden 2; mientras que la variación temporal la aportan funciones constantes a tramo, a intervalos de 5 minutos, que modelan a los coeficientes del desarrollo. La siguiente ecuación resume las características para la distribución regional del vTEC.

$$vTEC(\lambda, m) = \sum_{i=0}^{6} \sum_{j=0}^{i} \left\{ a_{ij} cos(2\pi \frac{j\lambda}{24}) + b_{ij} sin(2\pi \frac{j\lambda}{24}) \right\} P_{ij}(sin\, m)$$

Donde:

$\lambda$ y $m$ son la longitud geográfica y la coordenada modip del IPP, $a_{ij}$ y $b_{ij}$ son los coeficientes del desarrollo en Armónicos Esféricos que se actualizan cada 5 minutos, $P_{ij}()$ es el polinomio de Legendre de grado $i$ y orden $j$, Los coeficientes del desarrollo se estiman a partir de bloques de datos de toda la red de control.

La formulación anterior se combina con un procedimiento de resolución de los coeficientes del desarrollo basado en un Filtro Kalman. El proceso comienza con valores iniciales $(a_{ij}, \sigma_{ij})_o$para los coeficientes y sus desviaciones estándares. Luego el Filtro Kalman utiliza el primer bloque de 5 minutos de datos y genera valores actualizados $(a_{ij}, \sigma_{ij})_1$. Estos parámetros tendrán una validez de aplicación de 5 minutos. En la etapa siguiente, el Filtro Kalman combina los coeficientes y desviaciones estándar de la etapa anterior con el siguiente bloque de 5 minutos de datos y se obtiene un nuevo juego de parámetros. Este procedimiento se repite hasta procesar el paquete de datos completos correspondiente a una semana completa.

Los parámetros $a_{ij}$ son los que permiten calcular la corrección ionosférica interpolada en cualquier punto de la región de cobertura. Los parámetros $s_{ij}$ permiten obtener un estimador del error que se está cometiendo con la interpolación a partir de una propagación estadística de errores. (C.BRUNINI, 2008)

### 5.3.2 Metodología Split Spectrum

En la propagación de señales GPS hay tres maneras de tratar y eliminar los efectos ionosféricos: mediante modelos ionosféricos (obtenidos a partir de datos de ionosondas); mediante mediciones de TEC con señales GNSS; y mediante la combinación L3 (combinación de dos frecuencias L1 y L2), por esta razón la señal GPS usa dos ondas portadoras de diferentes frecuencias L1 y L2, capaces de eliminar el error de primer orden por combinación de frecuencias (Berné Valero, Garrido Villén, & Anquela Julián, 2013). Las dos fases portadoras de diferentes frecuencias atraviesan un medio dispersivo (la ionósfera), y otros medios no dispersivos. Cada uno de estos medios tiene diferentes retrasos con respecto a la longitud de onda, lo que hace posible la separación de los efectos. Esto es aprovechado para las correcciones de los retrasos ionosféricos en señales GPS; y es el mismo principio que utiliza el método Split Spectrum para el cálculo de TEC en sistemas SAR (Rosen, y otros, 2011).

Los sistemas de radar al igual que sistemas GNSS utilizan señales electromagnéticas, y por lo tanto las imágenes son afectadas por la ionósfera. Esta es una capa que se encuentra entre 50-60 Km hasta 1000 km de la superficie, los satélites GNSS están ubicados en órbitas medias a una altura entre 19000 y 28000 km, muy por encima de la ionósfera, mientras que la mayoría de satélites de observación de la tierra (en el que se encuentra incluida ALOS PALSAR, altura 690 km) se encuentran en órbitas bajas a una altitud de más o menos 800 km, es decir que están

ubicadas dentro de los límites de la ionósfera. Según esto, las señales GNSS atraviesan toda la ionósfera, mientras que las señales de sistemas de RADAR sólo atraviesan una parte de la misma, además de que la señal de radar debe pasar doble vez durante el viaje de ida y retorno de la señal. Las afectaciones que puedan tener las señales han motivado a investigadores a realizar trabajos con el objetivo de detectar los efectos de la ionósfera en la fase y velocidad de grupo de la señal, y cómo podrían aparecer en interferogramas SAR.

Las frecuencias más bajas son las más sensibles a efectos ionosféricos, por esta razón los trabajos se han realizado utilizando la frecuencia L del sistema ALOS-PALSAR. La banda C presenta menos distorsiones, sin embargo, también se han evidenciado los efectos ionosféricos como desplazamiento en la dirección de acimut, e inclusive se ha concluido que los sistemas de banda C puedan también requerir correcciones ionosféricas. Las banda C y X han sido poco estudiadas en este campo, por lo tanto más pruebas son requeridas para probar la importancia de los efectos ionosféricos en estas dos bandas (Gomba, 2016). Los sistemas de radar se ven afectados por dos efectos de la ionósfera, el primero es un retraso de la señal lo que genera un error de fase, y el segundo es la rotación de Faraday causada por la condición anisotrópica de la ionósfera que genera la rotación del plano de polarización de la señal electromagnética. Del primer efecto se han desarrollado varios métodos debido a que el retraso de fase es proporcional al contenido total de electrones, del cual se desarrolló el método “Split Spectrum” para detectar cambios en grandes escalas y el método “azimuth shift” para detectar cambios en la dirección del acimut en pequeñas escalas. Ambos métodos son utilizados para interferometría y por esta razón sólo permiten calcular TEC relativos. El cálculo del TEC absoluto es algo en el que todavía se debe investigar. Del segundo efecto se desarrolló el método de rotación de Faraday utilizado para polarimetría. Los métodos Split Spectrum y rotación de Faraday fueron incluidos en el módulo ionosférico

desarrollado por el laboratorio de propulsión a chorro (Jet Propulsion laboratory) de la NASA en colaboración con la Universidad de Standford en el software ISCE (Rosen, y otros, 2011).

En otros trabajos realizados por (Gomba, 2016), se ha mejorado el algoritmo Split Spectrum, y se ha combinado con el método Azimuth Shift; (Hasni, Chen, & Zhuo, 2016) realiza un refinamiento al algoritmo del método entre otros. Los efectos sobre las imágenes de radar que se han encontrado, son azimuth streak (líneas en la dirección de acimut) y fuertes gradientes sobre las imágenes, las primeras detectables más fácilmente con el método Azimuth shift. Al realizar el cálculo de los mapas de $\Delta$TEC, se encuentran fuertes gradientes del contenido total de electrones y variaciones suaves de la ionósfera. Se han analizado imágenes en casos de estudios de interferometría, por ejemplo, el análisis de la precisión antes y después de la corrección ionosférica en latitudes altas (zonas polares) y medias (zonas con menores gradientes ionosféricos). En (Oliveira Moraes, y otros, 2018) analizan el efecto de los centelleos ionosféricos en las señales GNSS (frecuencias de banda L), producidos en el ecuador magnético que luego se convierten en burbujas de plasma que se mueven en dirección a los polos, estos centelleos se generan principalmente al atardecer y son más intensos a partir de la puesta del sol hasta medianoche. En esta zona cercana al ecuador se encuentra la anomalía ecuatorial. El análisis de los centelleos ionosféricos en imágenes SAR lo ha realizado (Pi, y otros) estudiando 2779 imágenes y comparando el centelleo en latitudes bajas con el método Azimutth shift.

Gomba (2016). En “Estimación and Compensation of Ionopheric Propagation Delay in Synthetic Aperture Radar (SAR) Signal” presenta un análisis de diferentes métodos. Analiza el método Split Spectrum y realiza una mejora al algoritmo para datos SAR, evaluando su efectividad en la corrección de interferogramas en tres casos de estudio: los terremotos de Kyrgyzstan y

Wenchuan del año 2008, y una zona de aurora boreal; también una extensión del método para TOPS and ScanSAR para la banda C de Sentinel fue desarrollado y probado; utiliza y propone el método Azimuth Shifts como un complemento del método Split Spectrum; y finalmente propone un nuevo método que combina la información de varias fuentes usando la inversión Bayesiana desarrollando y proponiendo los conceptos básicos para el desarrollo futuro de la estimación absoluta de la ionósfera.

Hasni, Chen, & Zhuo (2016). En "A refined Split-Spectrum Algorith for Correcting Ionospheric Effects on Interferograms of Spaceborne D-InSAR at longer Wavelength" introducen un nuevo algoritmo al método Split Spectrum. El método es evaluado con datos de ALOS/Palsar, calculando los ΔTEC desde el día 15 de julio de 2007 hasta el 20 de octubre de 2009 en el sur de California, una zona activa sísmicamente.

Hasni, Chen, & Zhuo (2010) describen un método para mapear la ionósfera basado en datos InSAR con un proceso técnico de división del espectro. Analiza los datos PALSAR en diferentes casos de estudio: En la Antártida analiza el movimiento de hielo, En Sichuan realiza un análisis Co-sísmico y Post-sísmico, y en Alaska analiza la Tundra/Aurora.

### 5.3.3 Otros métodos

También se han realizado estudios sobre la ionósfera y su efecto sobre el radar utilizando otros métodos, es el caso de Hasni, Chen, & Zhuo (2000) donde analizan la relación entre la zona auroral y los disturbios ionosféricos en la banda C, y presenta las desventajas de usar la Interferometría para el cálculo. (Musico, y otros, 2018) Utiliza el método "Azimuth Shift" para calcular los valores ΔTEC desde las imágenes InSAR y luego analizar la correlación con los mapas TEC obtenidos de la Red GNSS, y donde asegura la potencial combinación de ambos para investigar la variación espacial TEC a pequeñas escalas. Se analizan tres casos de estudio en Italia.

Chen & Zebker (2012) También han desarrollado otros métodos para medir la variación TEC, en Islandia, California y Hawaii. (Pi, Meyer, Chotoo, Freeman, Caton, & Bridgwood) Analizaron el impacto de los centelleos ionosféricos en SAR en latitudes bajas usando datos GNSS. Chen A (2015) Presenta un método para compensar la variación de la propagación ionosférica usando la corregistracion de la imagen en dos casos de estudio, Groenlandia e Islandia. También se ha aprovechado la polarimetría para calcular los valores TEC utilizando la rotación de Faraday. (Meyer, Bamler, Jakowski, & Fritz, 2006), (Rios, 2014) y (Pi, Meyer, Chotoo, Freeman, Caton, & Bridgwood).

# 6 MARCO TEÓRICO

## 6.1 IONÓSFERA

### 6.1.1 Definición de la ionósfera

La ionósfera está definida de acuerdo al estándar de la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) como “la parte de la atmósfera planetaria en que electrones y iones se presenta en cantidades suficientes para afectar la propagación de las ondas de radio”. Por lo tanto, la ionósfera está definida desde el punto de vista de sus efectos sobre las ondas de radio. (Y.C.Yeh, 1972)

La ionósfera comprende la región de la atmósfera terrestre donde los electrones libres se concentran en cantidades suficientes como para perturbar la propagación de ondas electromagnéticas. Estos electrones son producidos principalmente por fotoionización de los átomos y moléculas neutras presentes en la atmósfera, siendo responsable de este fenómeno la radiación ultravioleta y de rayos X proveniente del Sol. (Conte, 2015)

La ionósfera es un medio interesante para el estudio de propagación de ondas. La densidad de electrones varía en cuatro órdenes de magnitud (Figura 1), además que es un medio no homogéneo y anisotrópico. (Y.C.Yeh, 1972).

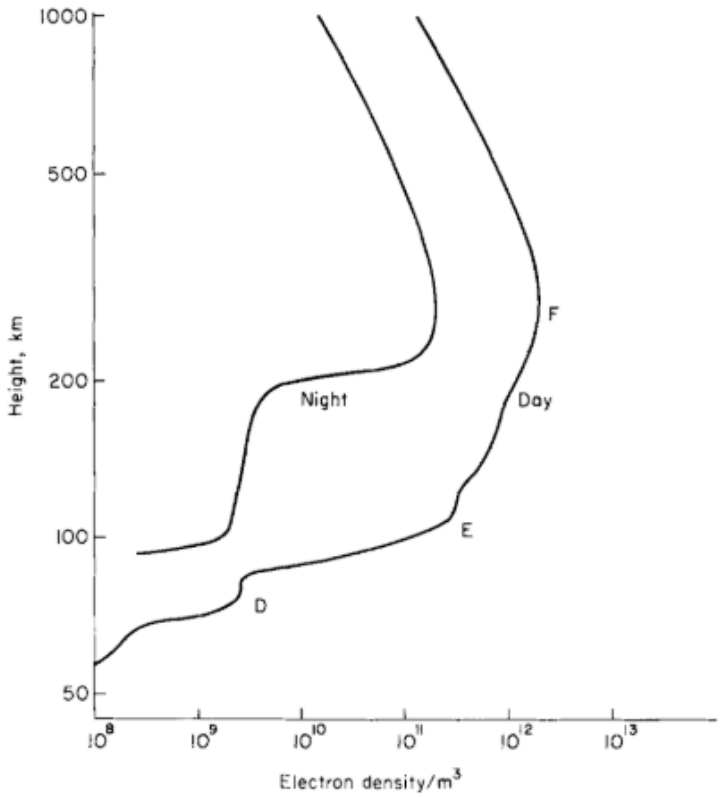



**Figura 1.** ***Capas de la Ionósfera*** **(Y.C.Yeh, 1972)**

Aunque no hay fronteras perfectamente definidas entre las diferentes regiones atmosféricas (cualquiera sea el parámetro respecto al cual se esté clasificando la Ionósfera), generalmente se considera a la ionósfera como aquella región atmosférica comprendida entre los 50-60 km de altura y los 1000 km de altura. El límite inferior se debe a que por debajo de esas alturas la radiación ionizante ha sido completamente absorbida por las capas superiores de la atmósfera (de allí que se denomine atmósfera neutra a la región ubicada por debajo de los 50-60 km de altura). Por encima de los 1000 km de altura la atmósfera está prácticamente ionizada en su totalidad, pero la densidad decrece rápidamente. No todos los átomos y moléculas de la ionósfera están ionizados. De hecho, la ionósfera se caracteriza por ser una mezcla de partículas eléctricamente cargadas y partículas neutras. Si bien menos del 1% de la masa total de la atmósfera se concentra en la ionósfera, los electrones libres se encuentran en cantidades suficientes como para perturbar la propagación de

ondas electromagnéticas. Es por esta razón que el conocimiento preciso de la distribución de electrones libres en la ionósfera es de vital importancia para el desarrollo y optimización de los sistemas de navegación global basados en satélites, y para la radiocomunicación. La tasa de ionización (producción de electrones libres) depende de la densidad del gas atmosférico y de la intensidad de la radiación solar (Conte, 2015).

### 6.1.2 Clasificación terrestre de la ionósfera

Debido a que diferentes átomos, iones y moléculas contribuyen a la formación de la ionósfera y a que distintos mecanismos físicos dominan estos procesos de formación a diferentes alturas y momentos del día, la distribución de electrones libres con la altura está representada por una curva difusa con varios picos característicos a diferentes alturas. Estos picos son asociados a regiones de gran concentración de electrones libres, y son denominadas con las letras D, E y F a medida que aumenta la altura. Además, durante el día la región F se divide en dos capas denominadas F1 y F2 (Conte, 2015).

La región más baja es llamada la región D la cual se extiende en altura desde 40 km a 90 Km. Esta región es la responsable de la absorción de ondas de radio. La densidad de electrones es acerca de $2{,}5x10^{9}/m^{3}$ por día disminuyendo a un valor insignificante en la noche.

La región del medio es llamada la región E. Esta es la región de la ionósfera entre los 90 Km y 160 Km de altitud, la densidad de electrones de esta región se comporta regularmente en lo que respecta a su dependencia del ángulo cenital solar y la actividad solar; la densidad puede tener valores de $2x10^{11}/m^{3}$ durante el día y este valor es lo suficientemente alto como para reflejar las ondas de radio con una frecuencia de varios megahertz. En la noche la densidad de electrones en la región E es más de una magnitud de orden inferior.

Encima de la región E se encuentra la región F. El comportamiento de la región F es bastante irregular y generalmente se clasifica en una serie de anomalías, como la anomalía ecuatorial y la anomalía estacional. La densidad del electrón en el pico tiene un valor promedio de $2x10^{12}/m^3$por dia y en la noche de $2x10^{11}/m^3$.Esta región es la responsable por la reflexión de las ondas de radio (Y.C.Yeh, 1972).

La capa F2 coincide con la altura en la cual se observa el máximo de concentración electrónica de toda la ionósfera (de hecho, la capa F2 se define dónde se produce el máximo de concentración electrónica). A partir de este punto, la densidad de electrones libres decaerá rápidamente (exponencialmente) con la altura, constituyendo la región ionosférica comúnmente denominada top-side, el grado de ionización al clasificar la atmósfera de acuerdo al contenido de plasma, suele expresarse en número de electrones libres por elemento de volumen, en este caso 3 cm. En primera aproximación, el grado de ionización describe el equilibrio entre la densidad del gas neutro atmosférico, que decrece con la altura, y la radiación solar, que crece a medida que aumenta la altura (Conte, 2015).

### 6.1.3 Contenido total de electrones

Se define el contenido total de electrones TEC entre el punto A y el punto B como el número total de electrones libres contenidos en una columna (de sección 1 m2) que une A y B. Es decir

$$TEC = \int_A^B N.dh$$

Donde $N$ es la densidad electrónica (en $e/m^3$), $dh$ es el incremento en altura (en $m$) y la integral se calcula a lo largo del camino que une los puntos A y B. En el caso de ser una columna vertical tendremos el TEC vertical, es decir, en la dirección del cénit.

Los valores para el TEC suelen variar entre $10^{16}$ y $10^{19}$ $e/m^2$, dependiendo de la hora del día, la estación del año, la actividad solar (ciclo solar), la actividad magnética, la latitud geomagnética,

etc. Además se observa una importante variación de un día para otro, lo que hace muy difícil su predicción (E.Sardon, 1993).

## 6.2 GNSS (Global Navigation Satellite System)

El Servicio Internacional GNSS (IGS) fue establecido oficialmente en enero de 1994 como servicio de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG 2008). Desde junio de 1992, la IGS-originalmente conocido como el "Servicio Internacional de GPS" para Geodinámica (M. Dow, E. Neilan, & Rizos, 2009), desde 1999 simplemente el" GPS Internacional Servicio ", y por último desde marzo de 2005 la" Internacional Servicio GNSS " ha estado poniendo gratuitamente a disposición de los interesados Orbitales satelitales GPS de precisión y correcciones de reloj (M. Dow, E. Neilan, & Rizos, 2009).

El Servicio Internacional de GNSS (IGS), es una colaboración voluntaria de más de 200 organizaciones contribuyentes en más de 80 países. La red de seguimiento global IGS de más de 300 estaciones de GPS permanentes y de funcionamiento continuo proporcionan un rico conjunto de datos para el análisis de IGS Centros que formulan productos precisos, como soluciones de relojería y efemérides satelitales. Los centros proporcionan libremente todos los datos y productos de IGS en beneficio de cualquier investigador (Kouba, 2009)

## 6.3 Conceptos Básicos de sistemas de Radar

### 6.3.1 Sistemas de radar.

Radar es una contracción de la palabra *radio detection and ranging*. Es un sistema electromagnético para la detección y localización de objetos, utiliza energía artificialmente generada, para iluminar la superficie del terreno de la que recoge sus señales de retorno. (Villegas Vega, 2008). La longitud de onda empleada en la región de microondas, hace factible el estudio de la superficie terrestre en cualquier situación atmosférica, Esto permite la adquisición de

imágenes a cualquier hora (Lira, 2002). Opera transmitiendo una particular longitud de onda sinusoidal de pulso moderado, y que detecta la naturaleza del eco de la señal. Un importante atributo es su capacidad de medir la distancia o rango, una de las más importantes funciones del radar, esta es determinada por la medida del tiempo que le toma al pulso viajar al objetivo y retornar (Ecuación 1).

$$R = \frac{cT_R}{2} \quad (1)$$

Donde R es el rango, c la velocidad de la luz igual a 3 x $10^8$ m/s y $T_R$ es el tiempo que le toma al pulso viajar hasta el objetivo y retornar. La energía electromagnética se propaga a la velocidad de la luz c=3 x $10^8$ m/s (Skolnik, 1981).

### 6.3.2 Ecuación del radar

La ecuación del radar relaciona el rango de un radar y las características del transmisor, receptor, antena, objetivo y ambiente. Es útil no solo como medio para determinar la distancia máxima desde el radar hasta el objetivo, también puede servir como una herramienta para entender la operación del radar y como es su diseño básico.

$$P_r = \frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \quad (2)$$

Donde $P_t$ es la potencia del radar transmitida, G es la ganancia de la antena, $A_e$ es el área efectiva de la antena receptor, σ es la sección transversal del radar, R es el rango del radar y $P_r$ es la potencia recibida por el receptor. (Skolnik, 1981)

### 6.3.3 Bandas (frecuencias de radar)

Los radares convencionales generalmente han estado operando en frecuencias desde 220 MHz a 35 GHz, un rango de más de 7 octavas. Temprano en el desarrollo del radar, un código de letras tales como S, X, L etc., fueron empleadas para designar las bandas de frecuencia de radar. (Skolnik, 1981)

**Banda L:** 15 a 30 cm (2 a 1 Ghz). Es empleada por el satélite JERS-1, SEASAT y ALOS PALSAR. Por corresponder con longitudes de onda largas, tiene la capacidad de penetrar algunos materiales superficiales, siempre y cuando estén secos y consolidados, razón por la cual se espera sea muy útil cuando se utiliza en área desértica. Esta banda ha demostrado ser útil para propósitos geológicos, a pesar de mostrar una fuerte dispersión en terrenos con bastante vegetación (Villegas Vega, 2008). La banda L debido a su baja frecuencia, experimenta más distorsiones ionosféricas comparadas con sistemas de banda C o Banda X (Gomba, Parizzi, De Zan, & Eineder, 2016).

### 6.3.4 Radar de apertura sintética (SAR)

El ancho de la señal es controlado por el ancho de su antena, razón por la cual se les denominó radares de apertura real. El radar de apertura real tiene limitaciones en cuanto a la resolución que puede ser alcanzada, como solución surge el diseño llamado Radar de Apertura Sintética (SAR) (Lira, 2002). Sistemas más sofisticados utilizan la naturaleza coherente de la energía artificial del microondas y el efecto doppler, para simular una antena extremadamente larga, con un ancho constante y estrecho. La teoría de la antena de radar, demuestra que el ancho de la señal es inversamente proporcional a la longitud de la antena. Se desarrolló una técnica que permite crear una antena virtual, a partir de una serie de señales recibidas por la antena real. (Villegas Vega, 2008). SAR logra una alta resolución en la dimensión de rango cruzado aprovechando como ventaja el movimiento del vehículo que lleva el radar sintetizando el efecto de una gran antena de apertura (Skolnik, 1981).

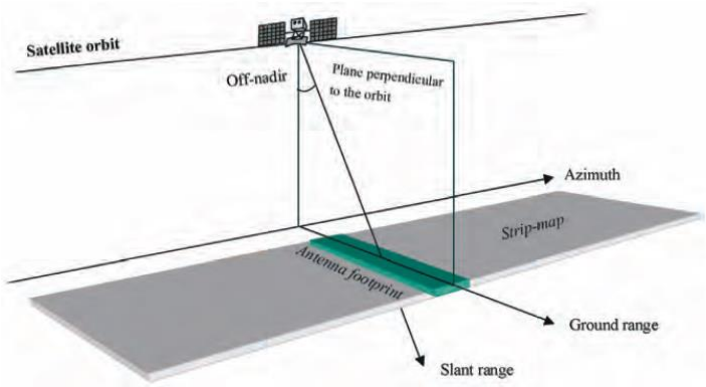



**Figura 2.** ***Sistema SAR desde un satélite*****. Ferretti et al. (2006)**

Un satélite lleva un radar con la antena apuntando a la superficie de la tierra en el plano perpendicular a la órbita (En la práctica esto no es estrictamente cierto, porque es necesario compensar la rotación de la tierra). La inclinación de la antena con respecto al nadir es llamado el ángulo Off-nadir y un sistema usualmente está entre los rangos 20° y 50°. Debido a la curvatura de la superficie de la tierra, el ángulo de incidencia de la radiación en un plano horizontal del terreno es más grande que el Off-nadir. Sin embargo, por simplicidad asumimos que la tierra es plana, y por lo tanto que el ángulo de incidencia es igual al ángulo Off-nadir. El área iluminada sobre la tierra (Antenna Footprint) es de 5 km en la dirección a lo largo de la pista (También llamado dirección de acimut) y de unos 100 km en la dirección a través de la pista (también llamado rango de la dirección en el terreno). La dirección a lo largo de la línea de vuelo (LOS por sus siglas en inglés) es usualmente llamada la dirección slant-range. (Ferretti, Monti-Guarnieri, Prati, & Rocca, 2007)

### 6.3.5 Propagación de las ondas de radar

La propagación de las ondas de radar está afectada por la superficie de la tierra y su atmósfera. La ecuación del radar es formulada asumiendo que opera en el vacío, pero este rendimiento es modificado por la dispersión de la energía electromagnética desde la superficie de la tierra, la refracción causada por la atmósfera no homogénea, y la atenuación debido a los gases que

constituyen la atmósfera. El radar también es afectado por la reflexión de la energía debido a la superficie de la tierra y la lluvia, nieve, aves y otros objetos (Skolnik, 1981).

#### *6.3.5.1 Efectos ionosféricos en ondas de radio*

La propagación de las ondas electromagnéticas en frecuencia de radio a través de la ionosfera depende de la densidad de electrones libres. La ecuación 3 de Appleton-Hartree relaciona el índice de refracción a su ionización asumiendo el campo magnético despreciable.

$$n^2 = 1 - (\frac{f_N}{f})^2 \quad (3)$$

Donde n es el índice de refracción para una onda con frecuencia f. $f_N$es la frecuencia del plasma dada por la ecuación 4 donde N es la densidad de electrones, e, m y $e_0$ son respectivamente carga, masa y permisividad del vacío.

$$f_N = \frac{Ne^2}{4\pi^2 e_0 m} \quad (4)$$

Reemplazando la ecuación 4 en la ecuación 3 obtenemos

$$n^2 = 1 - 2\frac{N}{f^2}, \quad (5) \quad \Rightarrow \quad n \approx 1 - K\frac{N}{f^2} \quad (6)$$

Donde $K = e_0/(8\pi^2 e_0 m) \approx 40.28 m^3/s^2$. Si la frecuencia de la onda electromagnética es menor o igual que la frecuencia del plasma la onda no se puede propagar, solamente atravesará la ionosfera cuando la frecuencia de la onda es mayor que la frecuencia del plasma. Cuando la $f \gg f_N$, el índice de refracción se representa mediante la ecuación 6, que decrece cuando incrementa la densidad de electrones y disminuye la frecuencia.

Si la velocidad a la cual se propaga una onda a través de un medio, depende de la frecuencia de la onda, el medio es llamado dispersivo. La velocidad de la onda se puede definir en velocidad de fase y velocidad de grupo. La velocidad de fase se define como

$$v_p = \frac{c}{n} \tag{7}$$

Y la velocidad de grupo

$$v_g = cn \tag{8}$$

Donde c es la velocidad de la luz. Y ya que n siempre es menor a 1 la onda siempre se propaga a través de la ionosfera más lento que en el vacío, es decir que a la onda le toma más tiempo viajar en el medio dispersivo, la onda tiene un retardo. Para calcular el retraso se debe restar el tiempo que tarda la onda en viajar en la ionosfera menos el tiempo que tarda en el vacío una misma distancia.

$$\triangle t = \int_L \frac{1}{v_g} dl - \int_L \frac{1}{c} dl \approx \frac{K}{cf^2} TEC \tag{9}$$

Similarmente la fase offset de una onda que viaja a través de la ionosfera con respecto a la onda que viaja en el vacío es

$$\Delta\Phi = 2\pi \int_L \frac{dl}{\lambda} - 2\pi \int_L \frac{dl}{\lambda_0} = -\frac{2\pi K}{cf} TEC \tag{10}$$

-Fase Avanzada: La distribución de la variación espacial TEC introduce errores de fase en los datos crudos SAR. Los efectos pueden ser agrupados dentro de las siguientes 3 clases.

La longitud de onda espacial de distribución TEC mucho más larga que el tamaño de la imagen SAR resulta en una macroscópica fase de pantalla (Phase screen) en la imagen enfocada, asemejándose a una pendiente en la dirección del rango. La pendiente es causada por la

dependencia del rango de la señal de ruta a través de la ionósfera (Meyer, Bamler, Jakowski, & Fritz, 2006).

La no homogeneidad del medio espacial en el que se mueven las longitudes de onda, pueden causar gradientes de fase “phase gradientes” a través del azimut, el cual resulta en un “azimuth shift” de objetos en la imagen enfocada. Estos efectos, los cuales son debido a los “Azimuth streaks” fueron reportados y atribuidos a efectos ionosféricos (Meyer, Bamler, Jakowski, & Fritz, 2006).

Cuando el pulso de radar se propaga a través de la ionósfera, la fase está dada por una cantidad proporcional al contenido total de electrones (TEC) a lo largo de la ruta de propagación. La variación de la frecuencia espacial baja en TEC no desenfoca las Imágenes SAR, pero pueden cambiar la fase observada y causa la decorrelación InSAR (Chen A. , 2015). El radar usa el tiempo de propagación emitido, reflejado y recibido para calcular la distancia entre el sensor y el objetivo. Debido a que en la ionósfera la onda se propaga más lento con respecto al vacío, la distancia medida es alterada haciendo que los objetivos parezcan más distantes. La distancia extra en metro debido a la ionosfera en los dos caminos es

$$\Delta r = -\frac{2k}{f_0^2} TEC \tag{11}$$

Donde TEC es el contenido total de electrones sumado a lo largo de la ruta de propagación, $f_0$ es la frecuencia portadora y $\Delta r$ es la distancia extra debido a la ionósfera. La fase es:

$$\Delta \emptyset = \frac{4\pi K}{c f_0} TEC \tag{12}$$

Retraso de grupo: valores constantes TEC a través de la imagen SAR causa un rango de error de la señal SAR. Variaciones espaciales TEC generan distorsiones geométricas locales de las imágenes SAR enfocadas y que afectan la corregistracion con mapas u otras imágenes SAR.

Variación temporal TEC permitirá diferencias de rango entre imágenes SAR multitemporales. (Meyer, Bamler, Jakowski, & Fritz, 2006)

**Tabla 1. Efectos de la ionósfera sobre las señales electromagnéticas Alos Palsar.**

| Efecto | Parámetros ionosféricos | L-Band |
|---|---|---|
| Retraso de rango | TEC=10 TECU | 5 m |
| Fase avanzada | TEC=10 TECU | 21 ciclos |

La tabla me indica que 10 unidades TECU producen un retraso de la señal en rango de 5 metros, y que en esa distancia hay aproximadamente 21 ciclos de la longitud de onda del sistema satelital Alos Palsar en Banda L ( Aprox 22 cm) (Gomba, Estimation and Compensation of Ionospheric Propagation, 2016)

## 6.4 Conceptos básicos de Interferometría

Un satélite SAR puede observar la misma área de terreno desde diferentes perspectivas, ya sea simultáneamente (Es decir con dos radares montados en la misma plataforma) o el mismo satélite en diferentes tiempos. La distancia entre dos satélites (o órbitas) en el plano perpendicular a la órbita es llamada **la línea base interferométrica** y su proyección perpendicular a slant range es la **line base perpendicular** (Ferretti, Monti-Guarnieri, Prati, & Rocca, 2007).

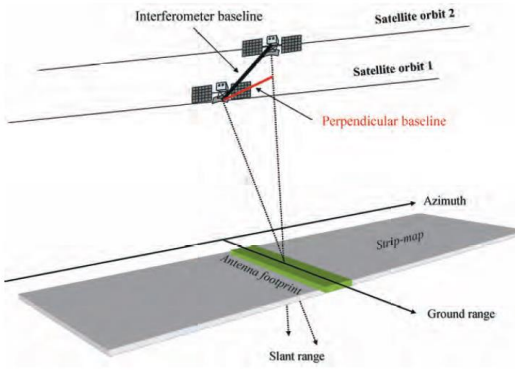



**Figura 3. Geometría de la interferometría de sistemas SAR. (Ferretti et al.2006, Pag 17)**

El principio de la Interferometría de radar explota cuidadosamente las diferencias entre las imágenes de radar. La fase de las imágenes con una diferencia de posición (dos antenas adquieren las imágenes simultáneamente) o con una diferencia de tiempo (una antena adquiere las imágenes

en distinto tiempo), puede ser comparado después de una correcto registro de la imagen. El resultado de la diferencia de fases es un nuevo tipo de imagen llamado un interferograma (Feigl, 1998). El interferograma SAR es generado por multiplicación cruzada, pixel por pixel. La amplitud del interferograma es la amplitud de la primera imagen multiplicada por la de la segunda, mientras que la fase (fase interferométrica) es la diferencia de fase entre las imágenes (Ferretti, Monti-Guarnieri, Prati, & Rocca, 2007).

### 6.4.1 Fase interferométrica.

Suponiendo que un punto que no cambia con el tiempo sobre la superficie, es observada por dos SARs desde perspectivas diferentes, la fase interferométrica de cada pixel de la imagen SAR dependería únicamente de la diferencia de las rutas de viaje de cada uno de los dos SARs. La variación de la diferencia de ruta que resulta de pasar de una celda de resolución a otra, es dada por una simple expresión (Ecuación 13). (Ferretti et al.2006, Pag 18-A)

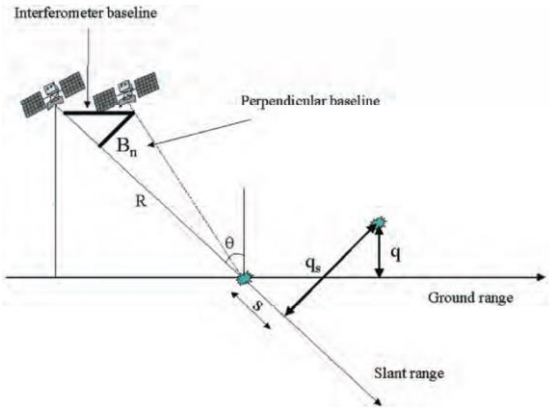



**Figura 4. Parámetros geométricos de un sistema de satélite de Interferometría SAR. (Ferretti et al.2006)**

$$\Delta r = -2\frac{B_n q_s}{R} \qquad (13)$$

Donde Δr es la variación de la diferencia de ruta de viaje, $B_n$ es la línea base perpendicular, $q_s$ es el desplazamiento entre las celdas de resolución a lo largo de la línea perpendicular al rango inclinado (Slant range) y R es la distancia entre el radar y el objetivo.

La variación de la fase interferométrica Δφ es luego proporcional a Δr dividido entre la longitud de onda transmitida λ (Ferretti, Monti-Guarnieri, Prati, & Rocca, 2007).

$$\Delta\emptyset = \frac{2\pi\Delta r}{\lambda} = -\frac{4\pi}{\lambda}\frac{B_n q_s}{R} \quad (14)$$

La fase interferométrica tiene dos componentes: el componente no dispersivo compuesto por las fases topográficas, de deformación y troposférica; y el componente dispersivo que es la fase ionosférica (Ecuación 15). (Hasni, Chen, & Zhuo, 2016)

$$\Delta\emptyset = \Delta\emptyset^{topo} + \Delta\emptyset^{defo} + \Delta\emptyset^{tropo} + \Delta\emptyset^{iono} = \Delta\emptyset_{no-disp} + \Delta\emptyset_{disp} \quad (15)$$

La contribución ionosférica dispersiva $\Delta\emptyset_{disp}$ es inversamente proporcional a la frecuencia, mientras que la fase no dispersiva $\Delta\emptyset_{no-disp}$ es directamente proporcional a la frecuencia. Esta característica puede ser usada para separar estos dos componentes. (Gomba, Parizzi, De Zan, & Eineder, 2016)

$$\Delta\emptyset_{no-disp} = \frac{4\pi f_0}{c}(\Delta r^{topo} + \Delta r^{defo} + \Delta r^{tropo}) \quad (16)$$

### 6.4.2 Efectos ionosféricos en los interferogramas

La fase Ionosférica en un interferograma es definido como:

$$\Delta\emptyset_{disp} = \Delta\emptyset^{iono} = -\frac{4\pi K\lambda}{c^2}\Delta TEC \quad (17)$$

Donde K=40.28 $m^3/s^2$, λ es la longitud de onda, c la velocidad de la luz y ΔTEC es el diferencial TEC.

Dos efectos de la ionósfera en las ondas microondas pueden ser derivadas de la ecuación de Appleton-Hartree (3), que relaciona el índice de refracción del plasma y su ionización. El primer efecto es una fase avanzada del portador (Ecuación 14). El segundo efecto es una rotación del ángulo de polarización, un fenómeno conocido como la rotación de Faraday y dado que su

contribución es mínima al interferograma, será despreciada (Gomba, Parizzi, De Zan, & Eineder, 2016).

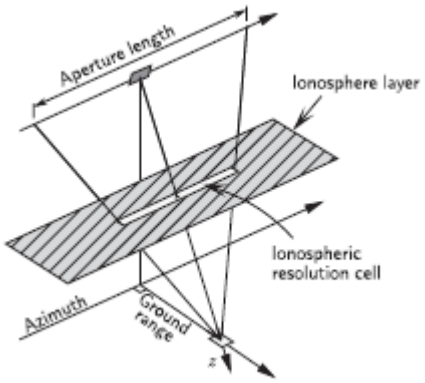



*Figura 5. La ionosfera y el sistema SAR. (Ferretti et al.2006)*

## 6.5 Método Split-Spectrum

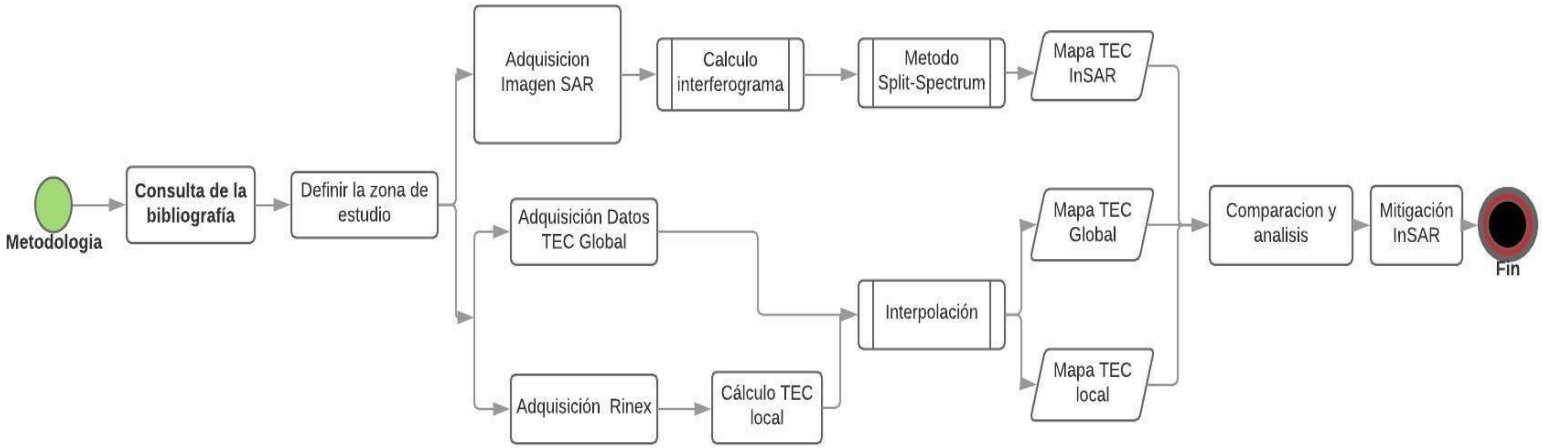
El método Split-spectrum aprovecha el comportamiento diferente de la frecuencia en el componente dispersivo y no dispersivo de la fase interferométrica para separarlos. El procedimiento consiste en la generación de dos subbandas (índice L para la subbanda Lower y H para la subbanda Higher) con frecuencias centrales $f_L$ y $f_H$ respectivamente. El interferograma calculado a partir de cada subbanda produce las fases $\Delta\emptyset_L$ y $\Delta\emptyset_H$. Reescribiendo las ecuaciones 16 y 17 se tienen dos interferogramas en términos del componente dispersivo y del no dispersivo.

$$\begin{aligned}\Delta\emptyset_L &= \Delta\emptyset_{no-disp}\frac{f_L}{f_0} + \Delta\emptyset_{disp}\frac{f_0}{f_L}\\ \Delta\emptyset_H &= \Delta\emptyset_{no-disp}\frac{f_H}{f_0} + \Delta\emptyset_{disp}\frac{f_0}{f_H}\end{aligned} \tag{18}$$

Resolviendo las ecuaciones, el componente dispersivo $\Delta\emptyset_{Iono}$ y el componente no dispersivo $\Delta\emptyset_{no-disp}$ pueden ser estimados asi:

$$\begin{aligned}\Delta\emptyset_{Iono} &= \frac{f_L f_H}{f_0(f_H^2 - f_L^2)}(\Delta\emptyset_L f_H - \Delta\emptyset_H f_L)\\ \Delta\emptyset_{no-disp} &= \frac{f_0}{(f_H^2 - f_L^2)}(\Delta\emptyset_H f_H - \Delta\emptyset_L f_L)\end{aligned} \tag{19}$$

# 7 METODOLOGÍA



## 7.1 Consulta de la bibliografía

La consulta de la bibliografía se realiza mediante las bases de datos disponibles en la página de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Las revistas consultadas fueron: IEEE, AGU100 (Advancing earth and space scince), la red social científica Researchgate y el servidor de búsqueda Google.

## 7.2 Definición del área de estudio

La zona de estudio fue definida según la cantidad de estaciones GNSS que se encontraban en la zona, de tal manera que se encontraran suficientes para poder realizar una buena aproximación confiable de los mapas TEC locales mediante las estaciones GNSS. Además, que se cuenta con datos de ALOS-PALSAR de esta zona.

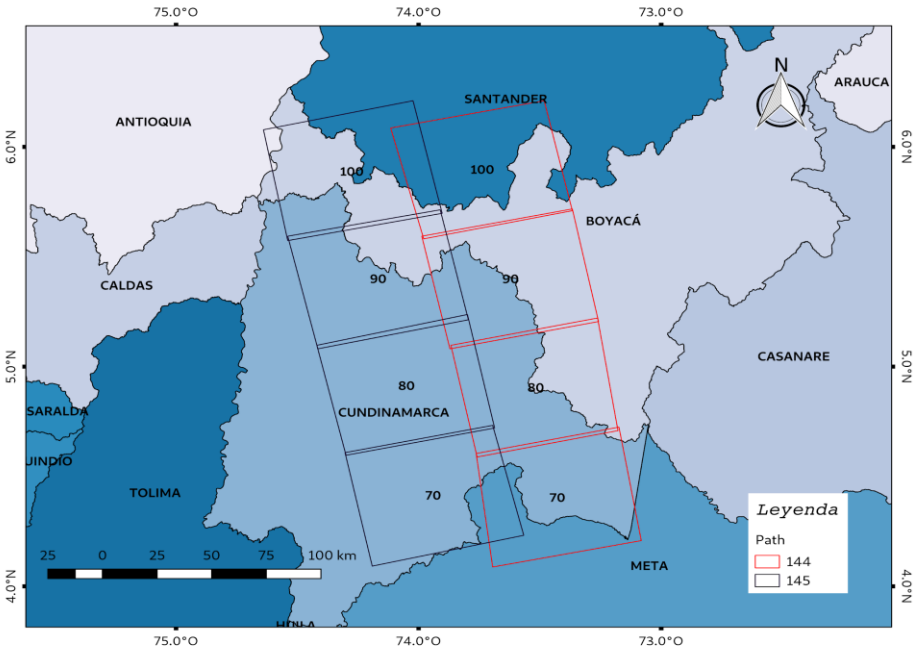



Figura 6. Zona de estudio

Se escogieron los path 144 y 145 del Satélite Alos Palsar como zona de estudio según disponibilidad de datos en la plataforma vertex y estaciones GNSS disponibles (Figura 6).

## 7.3 Adquisición de los Datos

### 7.3.1 Adquisición de las imágenes de Radar

Las imágenes SAR del satélite ALOS-PALSAR Pueden ser adquiridos desde el portal de datos de “Alaska Satellite Facility” Vertex para el monitoreo remoto de la tierra. Los datos fueron adquiridos del siguiente Link:

https://vertex.daac.asf.alaska.edu/

### 7.3.2 Adquisición de los datos TEC Global

International GNSS Service (IGS) recolecta, archiva y distribuye conjunto de datos observados de GPS. Los productos proporcionados contienen mapas de contenido de electrones verticales de la ionosfera derivados de datos GNSS de doble frecuencia, proporcionados en formato IONEX (intercambio de ionosfera). Pueden ser obtenidos de:

https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/115003935351

ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gnss/products/ionex/

ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/ionosphere/

### 7.3.3 Adquisición de los datos Rinex locales

Los datos fueron adquiridos de la Red MAGNA-ECO, ya que GeoRED no tenía suficientes estaciones disponibles. La Red Magna-eco es un conjunto de estaciones GNSS (sistema global de navegación por satélite) de rastreo continuo, que se encuentran ubicadas estratégicamente en el territorio nacional y sirven como base de referencia para los levantamientos diferenciales, porque reciben información satelital en tiempo real.

La Red está conformada por 46 estaciones las cuales están compuestas por: 1 antena, 1 receptor, mástil o pilastra para la monumentación y 1 equipo de comunicación para la transferencia de datos al Centro de Control del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC.

La Red MAGNA-ECO forma parte de la Red SIRGAS "Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas" de funcionamiento continuo (SIRGAS-CON) con 44 estaciones GNSS que se encuentran registradas en SIRGAS.

En el Geoportal del IGAC, se encuentran disponibles los archivos RINEX para la descarga de información de los últimos 60 días, si requiere información de una fecha anterior es necesario hacer la solicitud al correo magnaeco@igac.gov.co, indicando la fecha y Estación Continua solicitada.

La Red MAGNA-ECO, es procesada semanalmente por los Centros Locales de Procesamiento SIRGAS y en cooperación con el centro de análisis regional del servicio internacional GPS (IGS-RNAAC-SIR: Regional Network Associate Analysis Center-SIRGAS), estos Centros generan soluciones semanales que detallan coordenadas de precisión milimétrica (Asociadas a una época específica de referencia) y sus cambios a través del tiempo (Velocidades de las estaciones) para cada estación, lo cual garantiza su orientación permanente dentro del mismo sistema de coordenadas al que se refieren los satélites GNSS. (IGAC)

### 7.4 Procesamiento de los datos InSAR

El cálculo del interferograma y de la pantalla de fase ionosférica se realizan mediante el software ISCE (InSAR Scientific Computing Environment), desarrollado por WinSAR (Western North America Interferometric Synthetic Aperture Radar Consortium). Para descargar el programa WinSAR se debe ser miembro institucional WinSAR. Se pueden descargar de los siguientes Links:

https://winsar.unavco.org/software/isce

Se utilizó el software QGIS para la generación de mapas

### 7.5 Cálculo del mapa TEC global

Es necesario interpolar en espacio la estimación TEC global. El servicio GNSS internacional produce Mapas TEC diariamente con una resolución temporal de 2 horas. Estos mapas usan medidas GNSS adaptada a modelos ionosférico al estado actual de la ionosfera. Son capaces de capturar las variaciones ionosféricas a grandes escalas del fondo ionosférico, localizando efectos como TIDs, auroras, spread-F o gradientes locales.

### 7.6 Procesamiento de los datos RINEX y Cálculo del mapa TEC local.

Los datos RINEX se procesarán mediante el software GPS-TEC Program Ver_2.9.5 Desarrollado por el Dr. Gopi Krishna Seemala en el instituto de Geomagnetismo de la India. El software calcula el TEC desde valores observados de datos RINEX de GPS. http://seemala.blogspot.com/

### 7.7 Comparación y análisis de mapas TEC GNSS e InSAR

La comparación y análisis entre Mapas TEC GNSS e INSAR se realizara mediante correlación, con el software"R". La interpolación de los mapas de TEC realizados con datos GNSS se desarrollará mediante el software ArcGIS.

### 7.8 Mitigación Interferograma

Corrección al interferograma de la fase ionosférica mediante código Python.

# 8 DATOS

ALOS PALSAR opera en una órbita heliosíncrona a una altitud de 690 km, Pasando sobre Colombia entre 3 a 4 UT (Hora Local: 10-11 pm) en dirección ascendente.

Considerando la baja actividad ionosférica en la noche, se analizaron gráficas TEC del LISN ( Low Latitude Ionospheric Sensor Network) de los días disponibles entre los años 2007 y 2010 para los Path 144 y 145 (Figura 6) , con el fin de determinar los días con valores TEC altos y TEC bajos.

Se utilizó una combinación de 4 frames ubicados en la parte central de Colombia entre longitud 73° W y 74.6° W y entre latitud 4° N y 6.2°N. Los números de adquisición por cada path son los Frame: 070, 080, 090, 100 (Figura 6). Los cuatro frames ocupan un área de 68 x 226 km.

Adquirimos los datos en dos modos; 36 imágenes en fine beam dual polarization (FBD) y 6 imágenes en el modo fine beam single polarization (FBS), con un nivel de procesamiento 1.1 Complex.

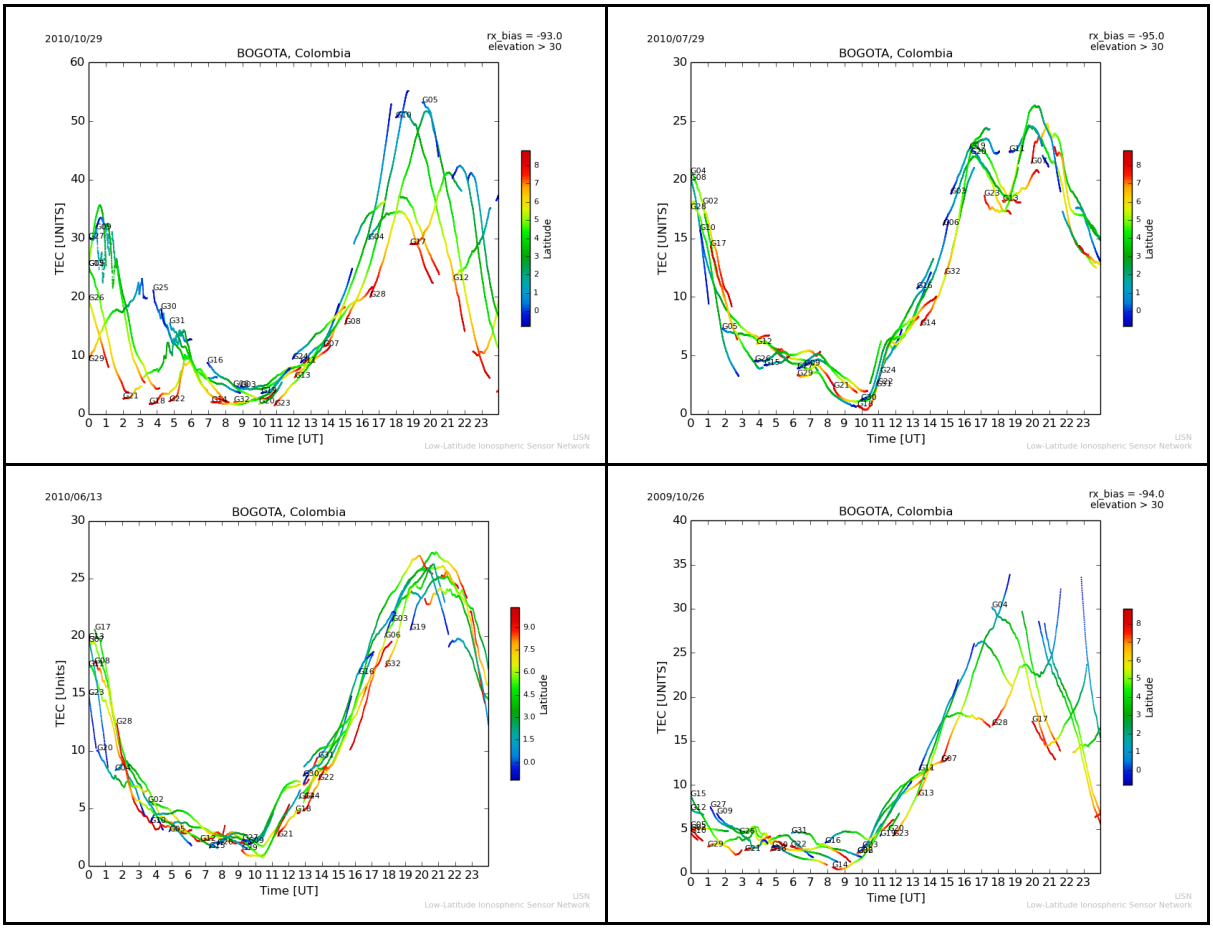
# 9 DESARROLLO METODOLOGICO

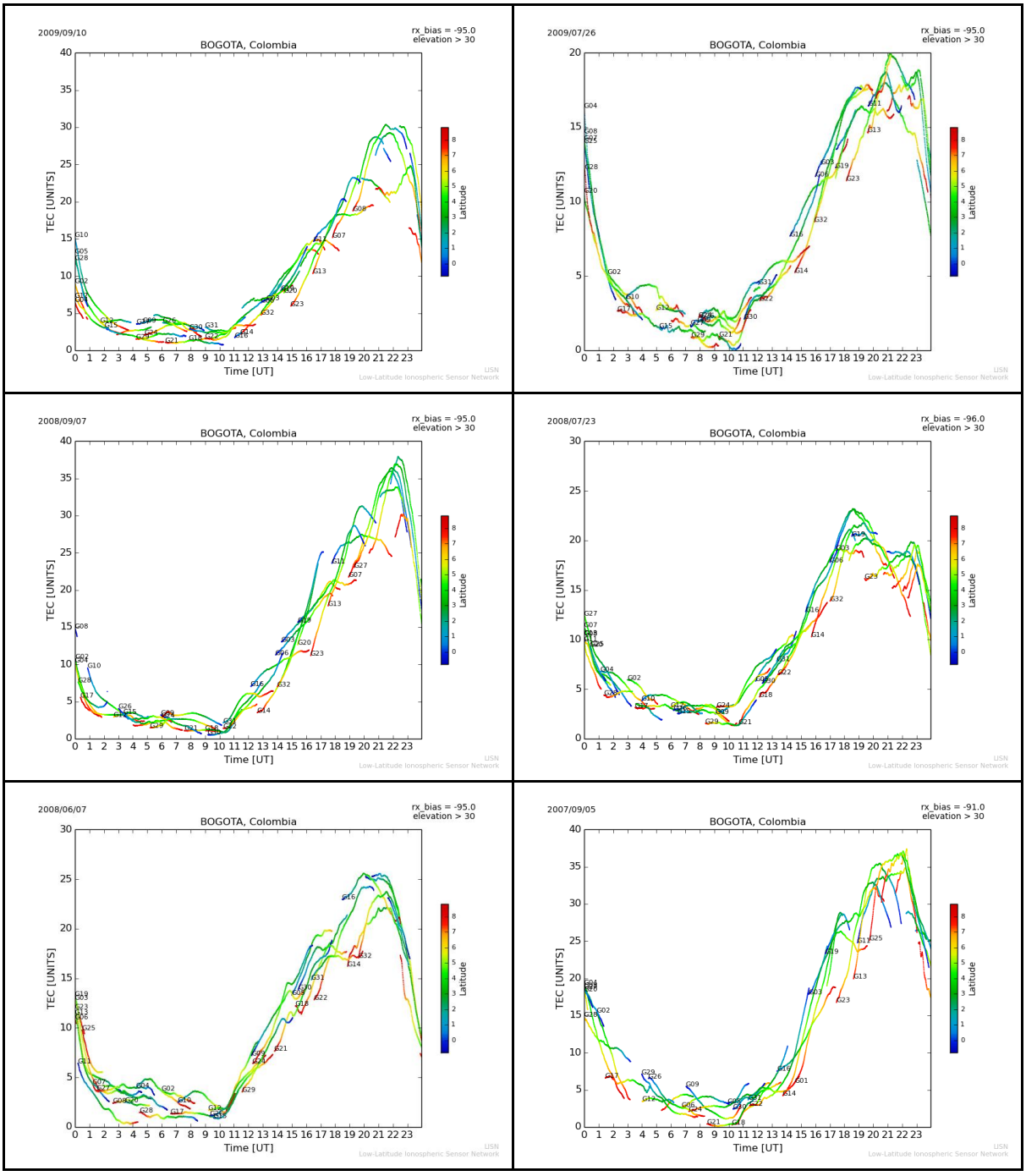
## 9.1 Elección de los Días.

Se analizaron gráficas TEC de los días disponibles con el fin de determinar los días con comportamiento perturbado y los días con comportamiento tranquilo.

### 9.1.1 Datos FBD

#### *9.1.1.1 Path: 144*




2009/09/10
BOGOTA, Colombia
rx_bias = -95.0
elevation > 30
TEC [UNITS]
Time [UT]
Latitude
2009/07/26
BOGOTA, Colombia
rx_bias = -95.0
elevation > 30
TEC [UNITS]
Time [UT]
Latitude
2008/09/07
BOGOTA, Colombia
rx_bias = -95.0
elevation > 30
TEC [UNITS]
Time [UT]
Latitude
2008/07/23
BOGOTA, Colombia
rx_bias = -96.0
elevation > 30
TEC [UNITS]
Time [UT]
Latitude
2008/06/07
BOGOTA, Colombia
rx_bias = -95.0
elevation > 30
TEC [UNITS]
Time [UT]
Latitude
2007/09/05
BOGOTA, Colombia
rx_bias = -91.0
elevation > 30
TEC [UNITS]
Time [UT]
Latitude

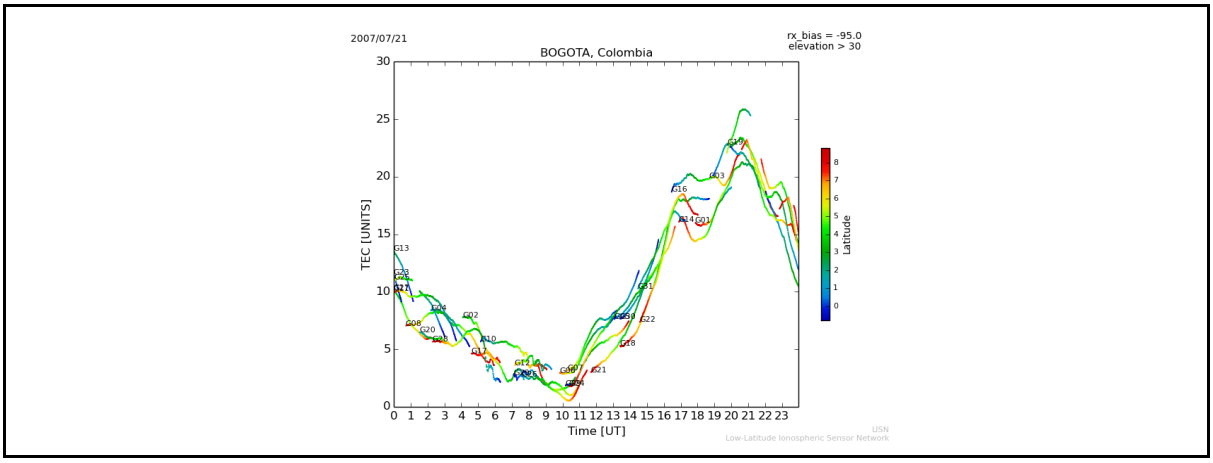



**Figura 7. Comportamiento ionosférico diario de los días disponibles path 144 Modo FBD**

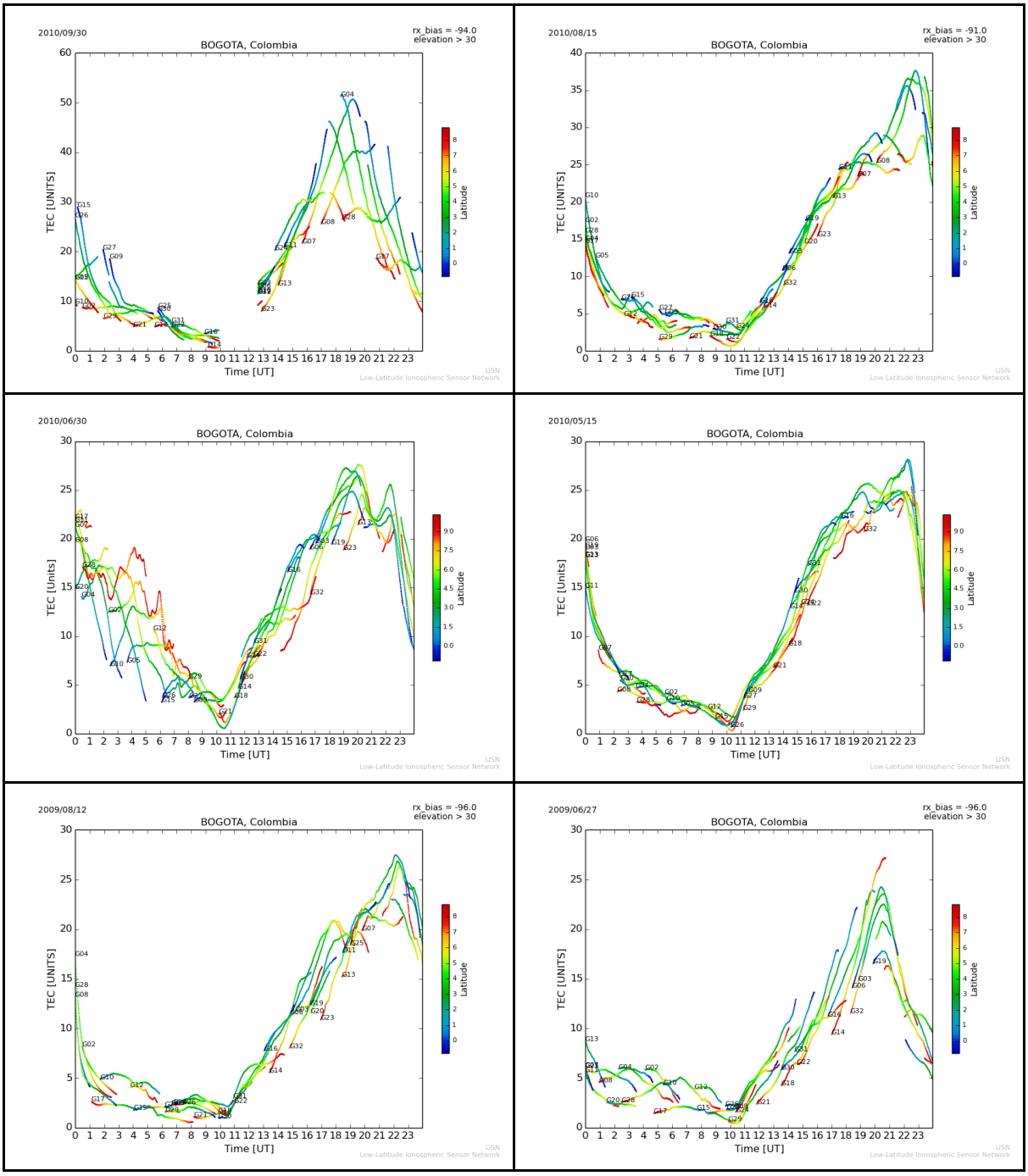
El comportamiento general y la relación directa que tiene el sol sobre la ionósfera durante el día se evidencia en las gráficas obtenidas del LISN de la estación GPS ubicada en Bogotá. A partir de las 11 UT (6:00 am hora local) el TEC aumenta rápidamente hasta las 20-21 UT (15:00-16:00 pm Hora Local), donde alcanza los valores máximos para luego descender hasta las 11 UT del siguiente día.

En el intervalo de tiempo de 3-4 UT los días 26 de Julio de 2009, 10 de septiembre de 2009, 26 de julio de 2009, 7 de septiembre de 2008 y 7 de junio de 2008 tienen valores de 5 o menos unidades. Los días 21 de julio de 2007, 5 de septiembre 2007, 23 de julio de 2008, 13 de junio de 2010 y 29 de julio de 2010 tienen valores entre 4 y 10 unidades TEC. El día 29 de octubre de 2010 valores entre 3 y 23 unidades.

Las gráficas presentan valores generalmente más altos en latitud 0 (Línea azul) y valores más bajos en latitud 8 (Línea Roja), debido a su ubicación con respecto al ecuador magnético y al centro de la anomalía de ionización ecuatorial. En un intervalo de tiempo durante la noche, la latitud con valor más alto no tiene una diferencia mayor a 6 unidades con respecto a la latitud con el valor más bajo, y durante el día la diferencia no es mayor a 15 unidades. Sin embargo, el día 29 de octubre del 2010 la diferencia en la noche es de alrededor de 25 unidades y en el día de 30 unidades.

**Días escogidos:** Es evidente que el día 29 de octubre de 2010 el comportamiento de la ionósfera es diferente con respecto a los demás días. En contraste, los días 07 de septiembre de 2008, 26 de julio de 2009 y 10 de septiembre de 2009 tienen comportamiento tranquilo.

### *9.1.1.2 Path: 145*



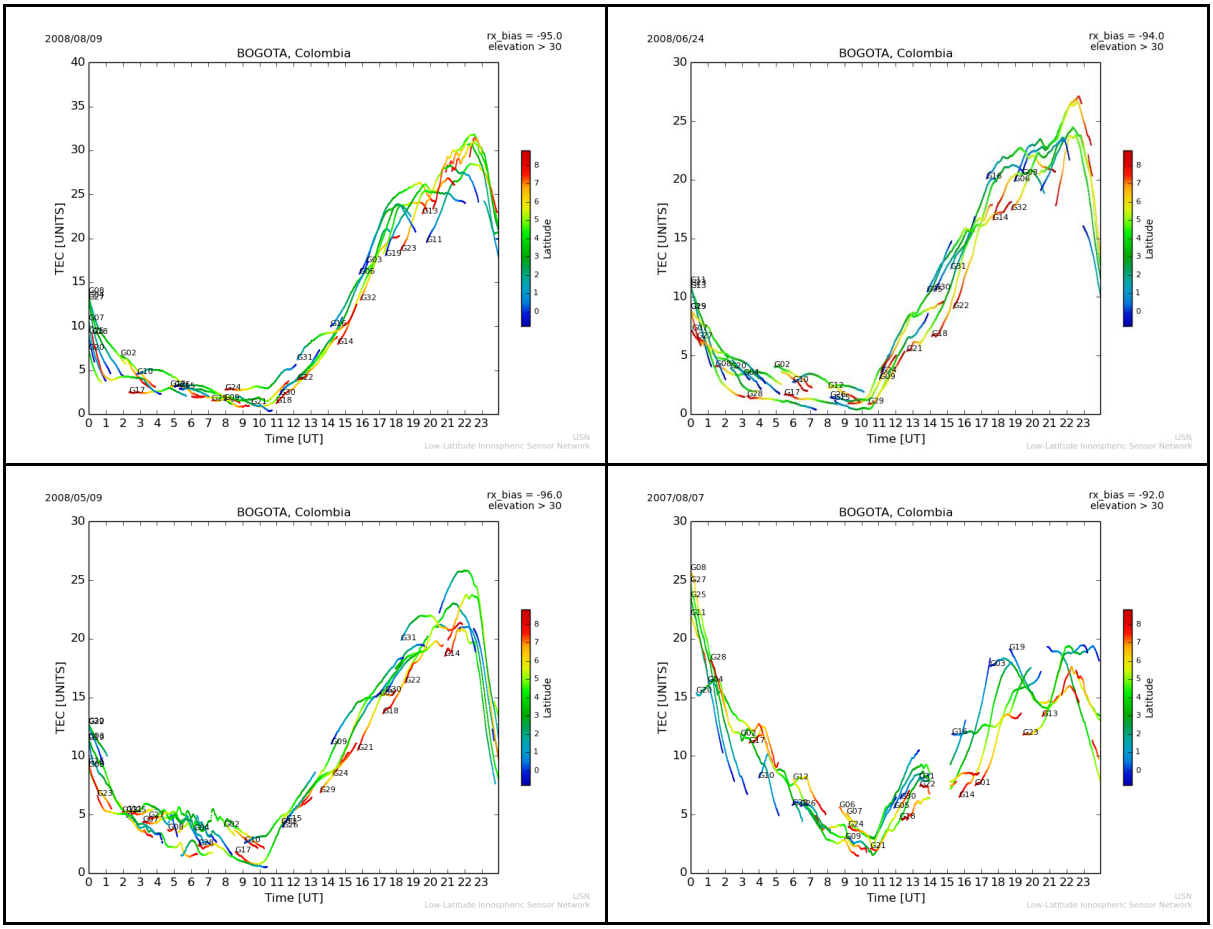



**Figura 8. Comportamiento ionosférico diario de los días disponibles path 145 Modo FBD**

De 3-4 UT los días 9 de mayo de 2008, 24 de junio de 2008, 9 de agosto de 2008, 27 de junio de 2009, 12 de agosto de 2009, 15 de mayo de 2010 y 15 de agosto de 2010 los valores TEC son iguales o menores a 7 unidades. Los días 7 de agosto de 2007, 30 de junio de 2010 y 30 de septiembre de 2010 presentan valores mayores a 7 unidades, y la diferencia entre el valor más alto y valor más bajo es de 7, 13 y 4 TEC respectivamente.

**Días escogidos:** El día 30 de junio de 2010 es un día con un comportamiento diferente con respecto a los otros días. En el día 07 de agosto de 2007 los valores durante el día son menores a los valores que tiene durante la noche. Y los días 9 de mayo de 2008, 24 de junio de 2008, 9 de agosto de 2008 tienen comportamiento tranquilo.

### 9.1.2 Datos FBS

Se obtuvo solo 2 días en el path 144 debido a que varias imágenes no tenían el formato en nivel complex. Por la misma razón no se pudo obtener datos del path 145.

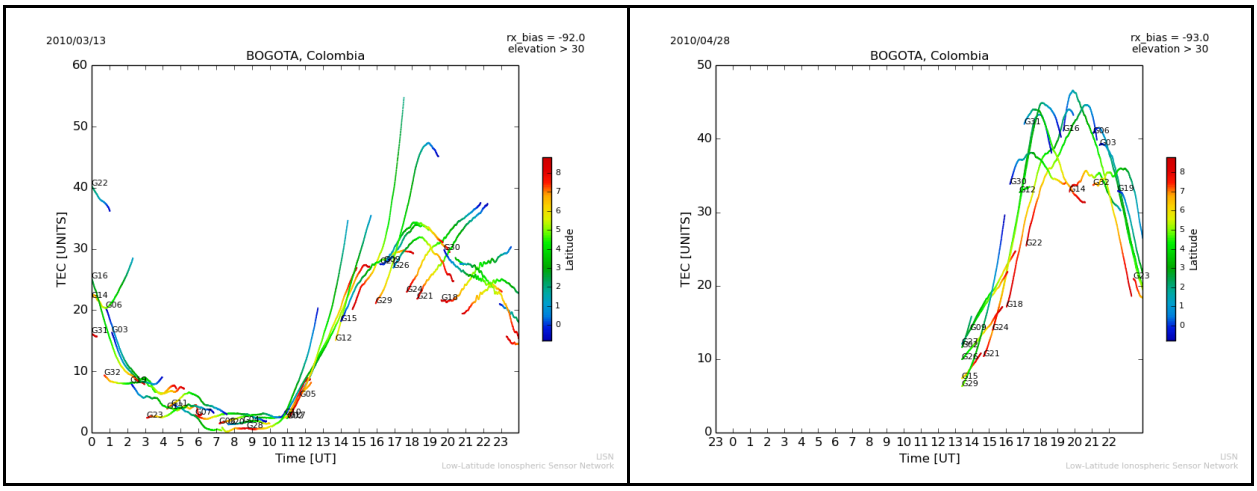



**Figura 9. Comportamiento ionosférico diario de los días disponibles path 144 Modo FBS**

El comportamiento de la ionosfera para el día 13 de marzo de 2010 es tranquilo durante la noche, de 3-4 UT el valor TEC es menor a 10 unidades, y la diferencia entre el valor máximo y mínimo no es mayor a 7 unidades. No hay información disponible durante la noche para el día 28 de abril de 2010.

## 9.2 Configuración de los interferogramas

Para observar el comportamiento de la ionósfera se decidió realizar dos interferogramas con el día perturbado en común, combinándolo con días tranquilos diferentes y esperando que en los resultados la afectación se evidencie de manera similar. Las demás combinaciones se realizaron entre días tranquilos esperando obtener estructuras diferentes a los anteriores interferogramas, ya que es poco probable que se repita la estructura atmosférica.

La tabla 2 muestra las combinaciones e información de los interferogramas escogidos.

Tabla 2. Información de la Configuración de los pares interferométricos

| Interferograma | Master | Slave | LBT*(Días) | Modo | Path | LBP*(m) 100 090 080 070 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 7 Sept 2008 | 26 Jul 2009 | 322 | FBD | 144 | 260 233 206 179 |
| 2 | 26 Jul 2009 | 10 Sept 2009 | 46 | FBD | 144 | 237 232 227 221 |
| 3 | 10 Sept 2009 | 29 Oct 2010 | 414 | FBD | 144 | 356 321 284 250 |
| | | | | | | |
| 4 | 7 Sept 2008 | 10 Sept 2009 | 368 | FBD | 144 | 497 465 433 400 |
| 5 | 7 Sept 2008 | 29 Oct 2010 | 782 | FBD | 144 | 853 786 717 650 |
| | | | | | | |
| 6 | 7 Agos 2007 | 9 May 2008 | 276 | FBD | 145 | 279 249 219 190 |
| 7 | 9 May 2008 | 24 Jun 2008 | 46 | FBD | 145 | -26 18 61 104 |
| 8 | 24 Jun 2008 | 9 Ago 2008 | 46 | FBD | 145 | -1092 -1059 -1026 -993 |
| 9 | 9 Ago 2008 | 30 Jun 2010 | 690 | FBD | 145 | 928 867 806 744 |
| | | | | | | |
| 10 | 24 Jun 2008 | 30 Jun 2010 | 736 | FBD | 145 | -165 -192 -220 -249 |
| | | | | | | |
| 11 | 13 Mar 2010 | 28 Abr 2010 | 46 | FBS | 144 | -424 -427 -431 |

*LBT-Línea Base Temporal, LBP-Línea Base Perpendicular.

## 9.3 Análisis Sismológico.

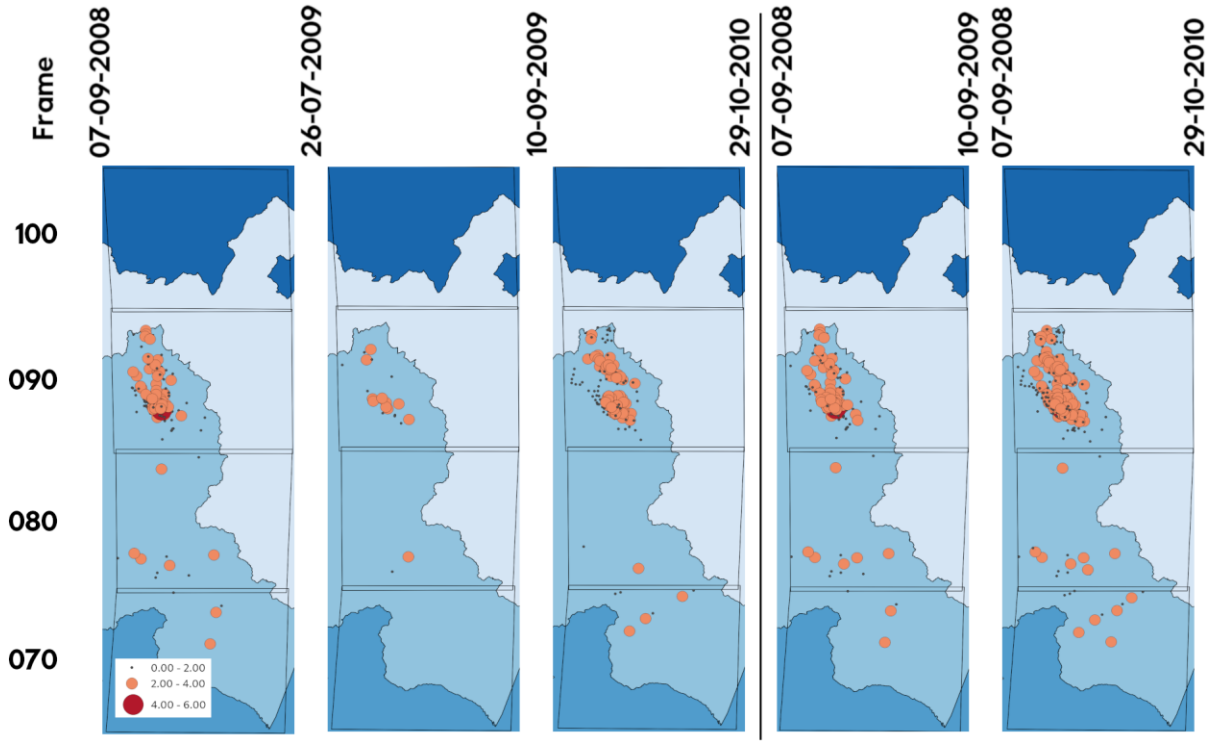



**Figura 10. Eventos sísmicos entre las fechas de los interferogramas. Datos obtenidos del servicio geológico colombiano. Path 144 Datos FBD**

La línea de base temporal (Tabla 2) de los interferogramas 1, 3, 4 y 5 es mayor a 300 días, abarcando una mayor cantidad de eventos sísmicos comparado con el interferograma 2 (LBT=46 Días) (Figura 10**)**. La mayor concentración de eventos se presenta en el frame 090, en los municipios de Lenguazaque, Cucunubá, Ubaté, Guachetá, Fúquene, Susa y Simijaca ubicados en el departamento de Cundinamarca. En los periodos prevalecen los eventos sísmicos de magnitud menores a 4, registrando solo un evento de magnitud 4,1 en el intervalo de tiempo del interferograma 1 y por lo tanto de los interferograma 4 y 5.

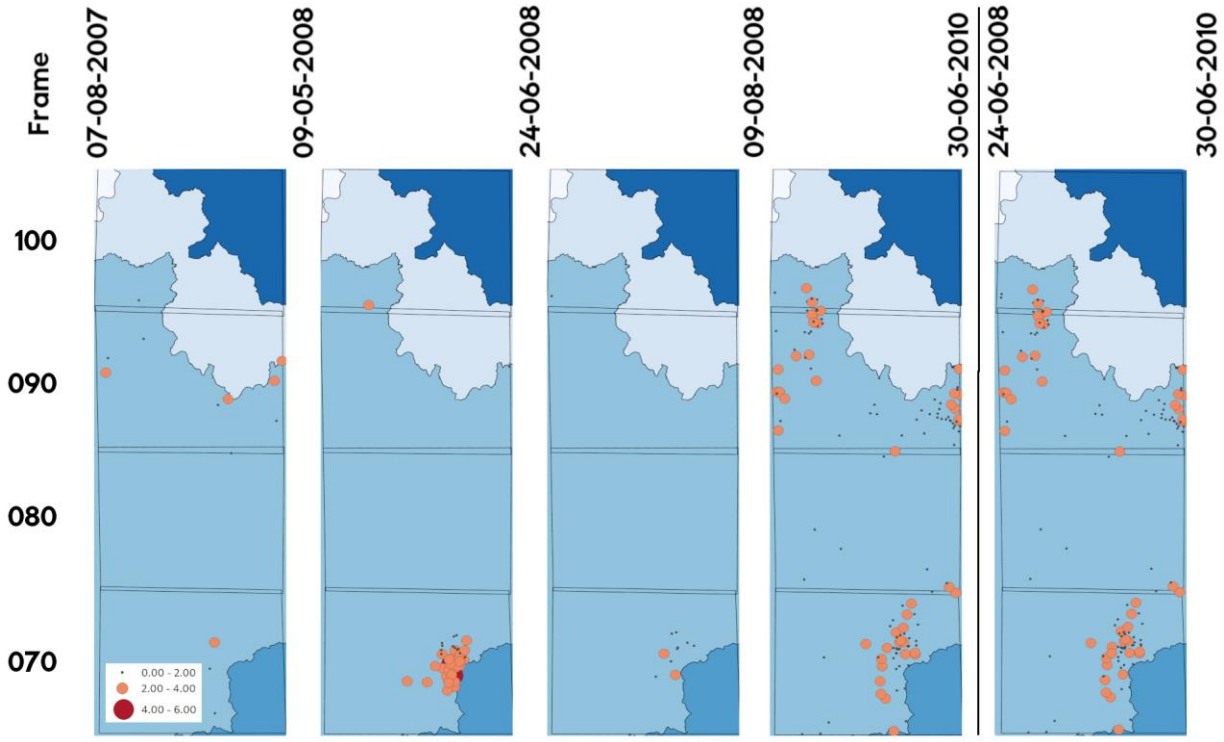



**Figura 11. Eventos sísmicos entre las fechas de los interferogramas. Datos obtenidos del servicio geológico Colombiano. Path 145 FBD.**

Los interferograma 9 y 10 tienen un LBT de 690 y 736 días respectivamente, abarcando una gran de cantidad de eventos dispersos en los frame 090 y 070, con un intervalo de tiempo en común de 690 días, evidenciado un panorama similar.

El interferograma 6 a pesar de tener un LBT igual a 276 días la actividad sísmica es bajo. El interferograma 8 tiene 46 días de LBT justificando su baja actividad. Y en el interferograma 7 se muestra una alta densidad de eventos concentrados en el frame 070 a pesar de tener un LBT de 46 días; El día 24 de mayo de 2008 se presentaron 3 eventos de magnitudes 5.7, 4.5 y 4.1 a las 19 horas UTC en los municipios de Quetame y Fómeque, el mismo día se presentaron más eventos de magnitud menor a 4, el día 25 se presentó un evento de magnitud 4.3, luego varios eventos de magnitud menor a 4 durante los días 25, 26 y 27. Y nuevamente se registró un evento de magnitud 4 el día 28. Finalmente, nuevamente eventos de magnitud menores a 4 en los días siguientes pero un poco menos frecuentes.

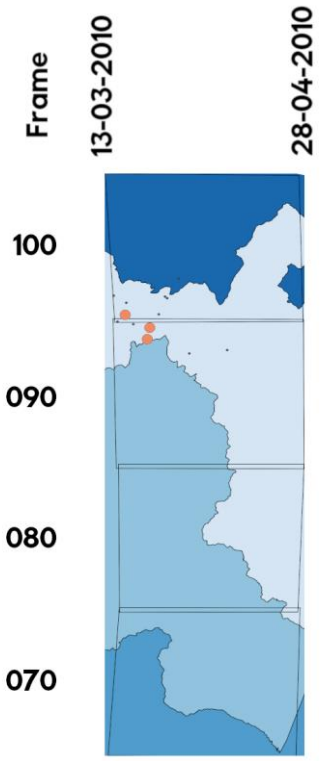



Figura 12. Path 144 FBS.

En el intervalo de tiempo hay pocos eventos sísmicos. Algunos están concentrados entre el frame 100 y 090. La mayoría son eventos de magnitud menor a 2 y solo unos pocos están entre magnitud 2 y 4.

## 9.4 Análisis Magnético e Ionosférico

### 9.4.1 Índices Magnéticos

Las partículas provenientes del sol son la principal fuente de activación de la ionósfera, su interacción con las partículas del campo magnético de la tierra activa eléctricamente los gases provocando ionización, y generando las diferentes divisiones espaciales, temporales y anuales en la ionosfera.

En el día las ionizaciones son mayores provocando altos valores TEC, pero se presentan densidades diferentes dependiendo de la altura (Figura 1), siendo la capa F la más inestable, debido a que es la que mayor interactúa con la radiación solar y la magnetosfera. En la noche el número de capas disminuyen (Figura 1).

El comportamiento de la ionosfera es diferente según la latitud, en general se dividen 3 zonas: la región ecuatorial o latitudes bajas, donde debido a la gran incidencia del sol, lo convierte en la zona más inestable y por lo tanto más difícil de predecir. La región media o latitud media, es la región más estable de la ionósfera; y los polos o latitudes altas, donde debido a la interacción del campo magnético de la tierra y el viento solar, se producen las auroras boreales.

Durante el ciclo, el polo norte y sur del sol cambian de lugar en aproximadamente 11 años (Figura 13). El flujo magnético del sol produce las manchas solares, si la intensidad es alta aparecerán bastantes manchas solares, por el contrario, si la intensidad es baja se verán pocas.

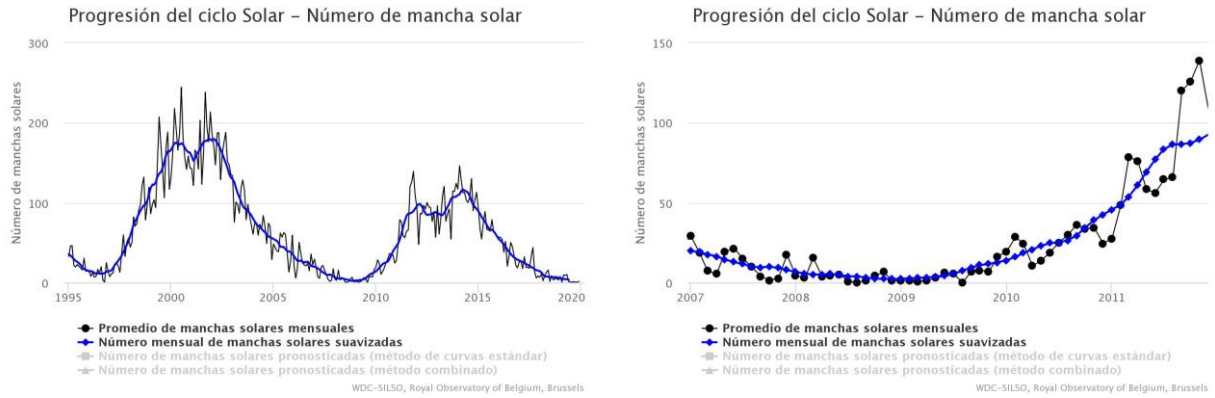



**Figura 13. Ciclo solar. Tomado de (Spaceweather)**

Desde el año 1995 hasta el año 2020 han pasado dos ciclos solares con máximos en el año 2001 y 2014. El primer ciclo presenta mayor cantidad de manchas solares que el segundo ciclo en sus máximos. En el intervalo de tiempo desde el año 2007 hasta el año 2011, las cantidades de manchas solares no alcanzan las 100 por mes. En el año 2009 se presenta el mínimo solar (1/mes), luego la cantidad de manchas solares aumentan y en el año 2011 la cantidad es de 61 /mes.

**Tabla 3. Índices magnéticos días Path 144 Modo FBD.**

| Fecha | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | Ap | Cp | C9 | # MS | 10.7cm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 07-09-2008 | **Kp** | 3 | 2+ | 1- | 1 | 3- | 2- | 3+ | 1 | | | | | |
| | **ap** | 15 | 9 | 3 | 4 | 12 | 6 | 18 | 4 | 8.875 | 0.5 | 2 | 0 | 67.60 |
| 26-07-2009 | **Kp** | 1- | 0+ | 1- | 0+ | 1- | 0+ | 0+ | 0 | | | | | |
| | **ap** | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 0 | 2.125 | 0.0 | 0 | 0 | 69.80 |
| 10-09-2009 | **Kp** | 0+ | 0 | 0 | 1- | 2- | 0 | 1- | 0+ | | | | | |
| | **ap** | 2 | 0 | 0 | 3 | 6 | 2 | 3 | 2 | 2.25 | 0.0 | 0 | 0 | 70.20 |
| 29-10-2010 | **Kp** | 2- | 2 | 1- | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | | | | | |
| | **ap** | 6 | 7 | 3 | 0 | 4 | 4 | 0 | 0 | 3 | 0.1 | 0 | 27 | 84.50 |

MS- Manchas Solares 8 intervalos de 3 horas. Tomado de (NOAA)

El índice Ap nos indica que la Actividad geomagnética de los 4 días es tranquila (Anexo B). Debido a que los índices kp y ap que se presentan durante el día son bajos. El 07 de septiembre de 2008 presenta el mayor valor, mientras que el 26 de junio de 2009 el menor valor. En el intervalo de tiempo 2 (3 a 6 UTC) los valores más altos del índice kp y ap son los días 07 de septiembre de 2008 seguido del 29 de octubre de 2010.

Sin embargo, se observa que en el día 29 de octubre de 2010 tiene el valor F10.7 cm más alto e igualmente el número de manchas solares.

Tabla 4. Índices magnéticos días Path 145 Modo FBD

| Fecha | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | Ap | Cp | C9 | # MS | 10.7cm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 07-08-2007 | **Kp** | 5 | 3+ | 4 | 2+ | 3 | 3+ | 4- | 3+ | | | | | |
| | **ap** | 48 | 18 | 27 | 9 | 15 | 18 | 22 | 18 | 21.875 | 1.1 | 5 | 8 | 71.00 |
| 09-05-2008 | **Kp** | 1+ | 1- | 1- | 1- | 1- | 0+ | 0+ | 1- | | | | | |
| | **ap** | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 0.1 | 0 | 0 | 68.60 |
| 24-06-2008 | **Kp** | 1- | 1- | 1- | 1- | 1- | 1 | 2 | 3 | | | | | |
| | **ap** | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 7 | 15 | 5.125 | 0.2 | 1 | 0 | 68.60 |
| 09-08-2008 | **Kp** | 2+ | 3+ | 2+ | 2 | 2+ | 4- | 5- | 5+ | | | | | |
| | **ap** | 9 | 18 | 9 | 7 | 9 | 22 | 39 | 56 | 21.125 | 1.1 | 5 | 0 | 67.30 |
| 30-06-2010 | **Kp** | 4+ | 4 | 3 | 3- | 3- | 2+ | 2+ | 3 | | | | | |
| | **ap** | 32 | 27 | 15 | 12 | 12 | 9 | 9 | 15 | 16.375 | 0.9 | 4 | 8 | 76.30 |

MS- Manchas Solares 8 intervalos de 3 horas. Tomado de (NOAA)

El índice Ap nos indica que la actividad Geomagnética de los días 07 de agosto de 2007 y 09 de agosto de 2008 es activa, el día 30 de junio de 2010 es inestable, y los días 09 de mayo y 24 de junio de 2008 son días tranquilos. En el intervalo de tiempo 2 (3 a 6 horas UT) el día con los índices kp y ap más altos son el 30 de junio de 2010 seguido de los días 07 de agosto de 2007 y 09 de agosto de 2008; y los más tranquilos 09 de mayo de 2008 y 24 de junio de 2008. Por Último, el índice de manchas solares y F10.7 es más alto para los días 30 de junio de 2010 y 07 de agosto de 2007.

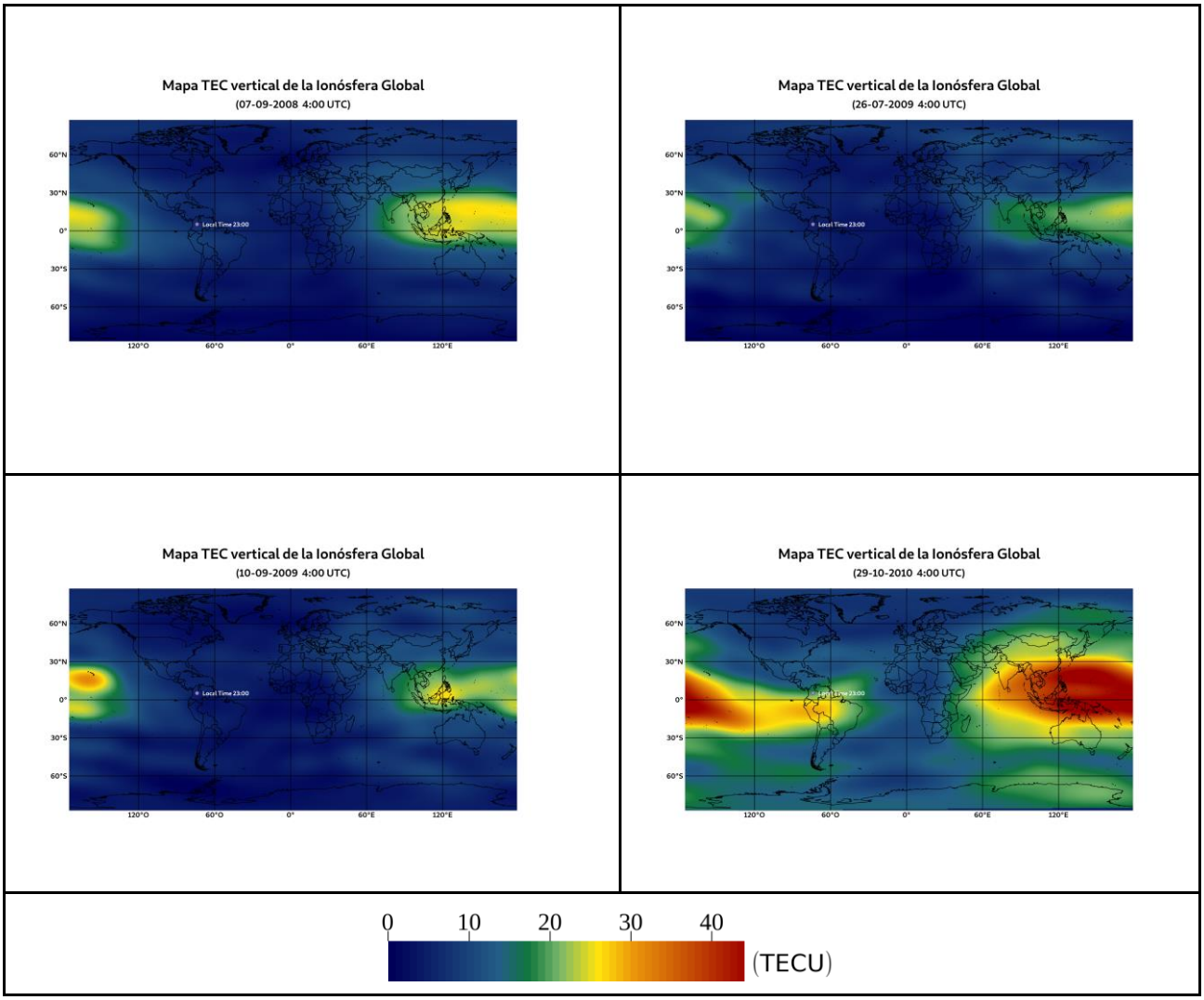
Tabla 5. Índices magnéticos días Path 14 Modo FBS

| Fecha | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | Ap | Cp | C9 | # MS | 10.7cm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 13-03-2010 | **Kp** | 1 | 0 | 0+ | 0+ | 0 | 1 | 2- | 1 | | | | | |
| | **ap** | 5 | 0 | 2 | 2 | 0 | 4 | 6 | 4 | 23 | 0.1 | 0 | 20 | 90.70 |
| 28-04-2010 | **Kp** | 1 | 1- | 1 | 0+ | 1+ | 1- | 0+ | 1 | | | | | |
| | **ap** | 4 | 3 | 4 | 2 | 5 | 3 | 2 | 4 | 27 | 0.1 | 0 | 8 | 77.20 |

El índice Ap nos indica que la actividad Geomagnética de los dos días es activa. En el intervalo de tiempo 2 (3 a 6 UTC) la actividad geomagnética es baja, pero se presentan gran número de manchas solares durante los días y el índice F10.7 cm es más alto comparado a días anteriores.

### 9.4.2 Mapas Globales Ionosféricos

Tabla 6. Mapas Globales ionosféricos Path 144 Modo FBD. Elaboración propia

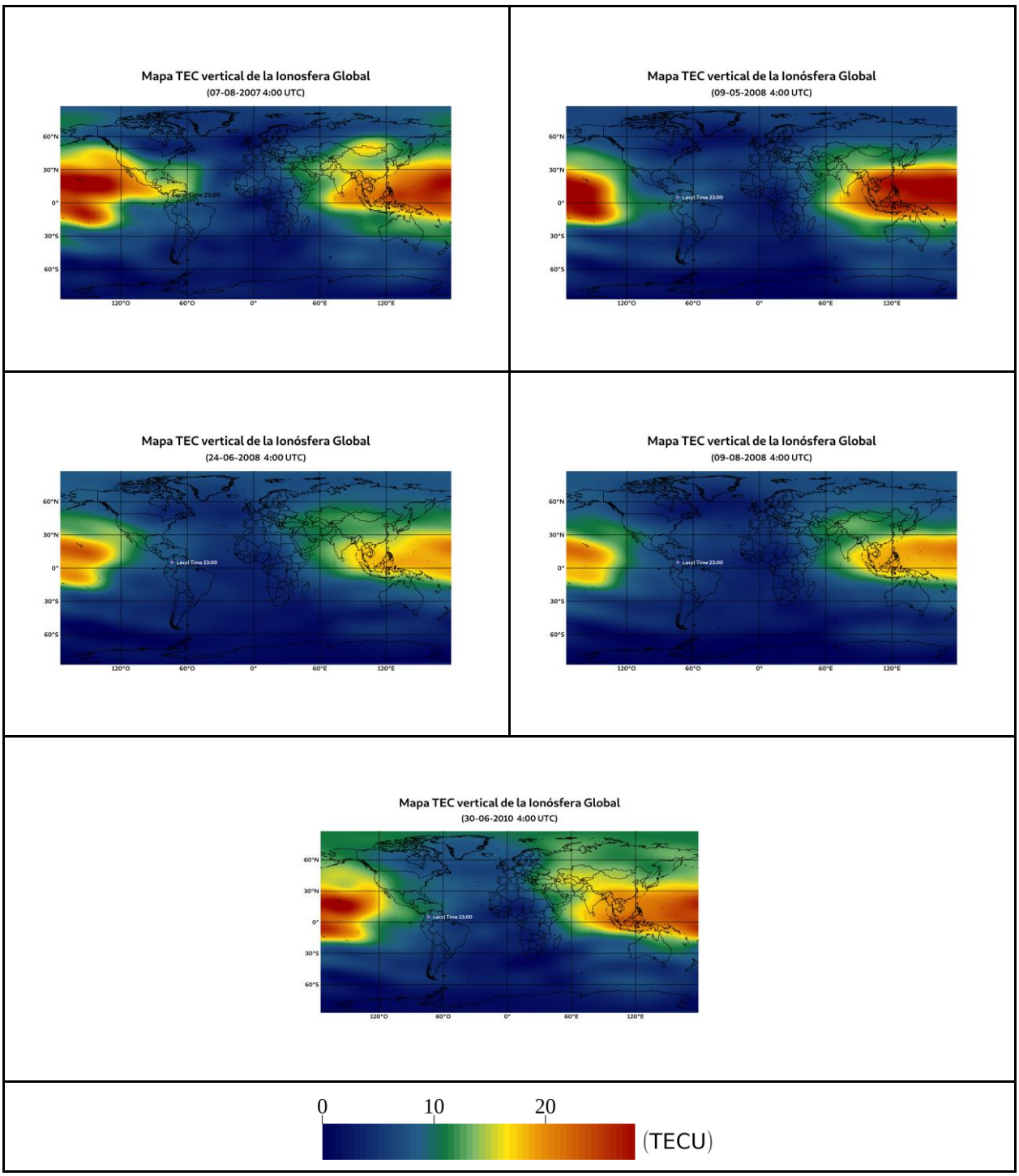



| DIA | 07-09-2008 | 26-07-2009 | 10-09-2009 | 29-10-2010 |
|---|---|---|---|---|
| TECU | 6.336239 | 4.476 | 4.716465 | 19.150604 |

En los días 07-09-2008, 26-07-2009 y 10-09-2009 la ionosfera tiene un comportamiento tranquilo en Colombia a las 11:00 pm hora Local con valores de 6.33, 4.476 y 4.7164 TECU respectivamente, mientras que entre longitud 90°E y 180°E; y entre 150°O y 180°O los valores son mayores. El día 29-10-2010 la ionosfera tiene un comportamiento diferente, los valores TEC

aumentaron en escala global y en Colombia en la zona de estudio el valor es de 19.15 TECU. Estos datos coinciden con las gráficas y el análisis realizado anteriormente en la sección 9.4.1. El comportamiento de la ionosfera para el 29 de octubre de 2010 no está relacionado a una tormenta geomagnética sino parece estar más relacionado a la actividad solar según el índice de flujo de ondas de longitud 10.7 cm.

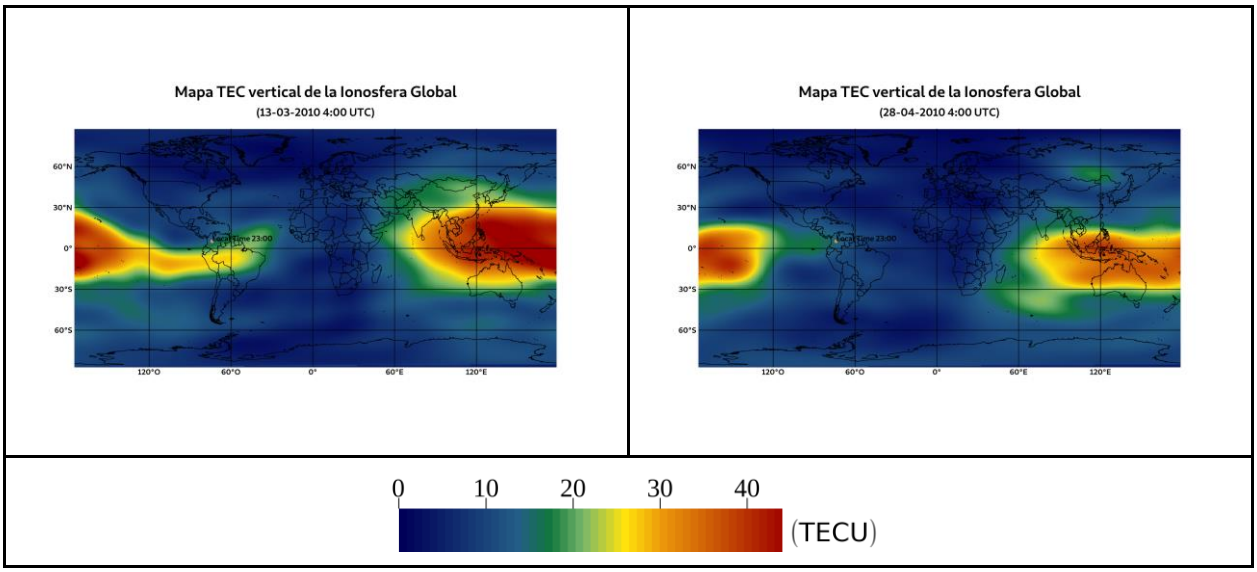
**Tabla 7. Mapas Globales ionosféricos Path 145 Modo FBD. Elaboración propia**




| DIA | 07-08-2007 | 09-05-2008 | 24-06-2008 | 09-08-2008 | 30-06-2010 |
|---|---|---|---|---|---|
| TEC | 13.75034 | 8.676 | 7.199057 | 5.781648 | 8.998113 |

El día 09-08-2008 la ionósfera tiene un comportamiento tranquilo en Colombia a las 11:00 pm hora Local con valor de 5.7816 TECU. En los días 09-05-2008, 24-06-2008 y 30-06-2010 los valores fueron de 8.676, 7.199 y 8.998 TECU respectivamente, valores un poco más altos con respecto al día 09-08-2008, por otro lado, en el día 07-08-2007 el valor fue de 13.75 TECU. Los mapas de los días 24-06-2008 y 09-08-2008 muestran una ionosfera más tranquila a escala global, a diferencia de los días 07-08-2007, 09-05-2008 y 30-06-2010 donde los valores TEC aumentaron. Con respecto al análisis realizado anteriormente en la sección 9.4.1 se esperaba que el día 09-05-2008 tuvieran un valor menor a 7 unidades, los demás días presentaron un comportamiento similar al esperado. La actividad de la ionosfera parece estar relacionado a la actividad solar según el índice de flujo de ondas de longitud 10.7 cm y no a la actividad geomagnética en estos casos.

**Tabla 8. Mapas Globales ionosféricos Path 144 Modo FBS. Elaboración propia**




| DIA | 13-03-2010 | 28-04-2010 |
|---|---|---|
| TECU | 14.042604 | 14.125409 |

Los dos días presentaron una ionosfera con valores altos de 14.04 y 14.12 TECU para 13-03-2010 y 28-04-2010 respectivamente. Con respecto al análisis de la sección 9.4.1 se esperaba que el día 13-03-2010 tuvieran un valor TEC menor a 10 unidades. Sin embargo, al igual que los días anteriores parece haber correlación con la actividad solar según el índice de flujo de ondas de longitud 10.7 cm.

### 9.5 Procesamiento

Formamos una secuencia de interferogramas entre los años 2007 y 2010 para los path 144 y 145 en modo FBD y FBS usando las imágenes ALOS 1 nivel SLC, mediante el software de procesamiento ISCE desarrollado por JPL, ejecutado en un contenedor Docker. Con el módulo de corrección ionosférica, el método split spectrum realizó la separación de la fase dispersiva y no dispersiva, luego mediante código python disponible en el repositorio GitHub, se realizó la corrección de los interferogramas, y en el software QGIS se realizaron los mapas TEC. Según el flujo de trabajo stripmap (Anexo C) el software descargo un SRTM DEM de https://urs.earthdata.nasa.gov/home para realizar la corrección geométrica, resampleo el interferograma final, donde no se especificó el número looks en rango y azimuth. Y finalmente el desenvolvimiento de la fase mediante snaphu. Usamos los pasos opcionales split spectrum, dispersive, rubbersheet y denseoffset. Y para reducir el ruido de la fase dispersiva resultante del método split spectrum se utilizó por defecto el filtro kernel gaussiano size 800, sigma 100, con 5 iteraciones, rotación 0 y umbral de coherencia 0.6.

La corrección de los interferogramas con afectaciones ionosféricas fueron corregidos mediante código python obtenido del repositorio github.

Los datos GPS globales fueron descargados y luego procesados e interpolados en el software QGIS.

# 10 RESULTADOS

## 10.1 Método Split-Spectrum

### 10.1.1 Análisis Path 144

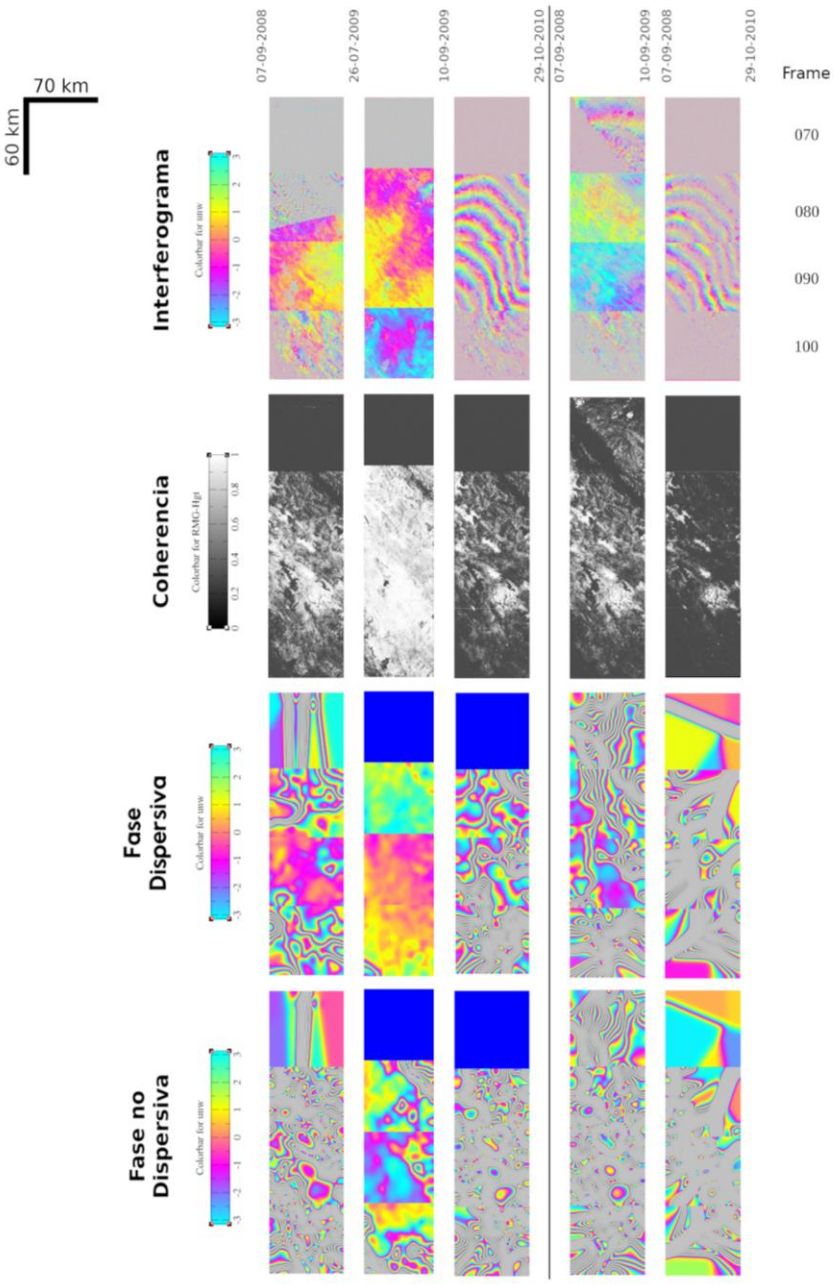



Figura 14. Resultados Path 144 Modo FBD.

Los días escogidos fueron las siguientes series de tiempo:

- 07-09-2008 26-07-2009
- 26-07-2009 10-09-2009
- 10-09-2009 29-10-2010

Y la siguiente:

- 07-09-2008 10-09-2009
- 07-09-2008 29-10-2010

Debido a una diferencia en el PRF de las imágenes, los frame 070 presentaron problemas en la mayoría de los interferogramas y no pudieron ser procesadas adecuadamente. Solamente el procesamiento fue exitoso en el interferograma 4, sin embargo, la mitad de la zona presenta baja coherencia.

La figura 14 contiene los resultados para el path 144. En la primera fila se encuentran los interferogramas originales. En los interferogramas 3 y 5 se obtuvo un patrón de alrededor de 8 franjas muy similares, considerando que tienen en común el intervalo entre el 10 de septiembre de 2009 y 29 de octubre de 2010, las franjas se deben a un evento que se presentó en este lapso de tiempo. En la sección 7 se mencionó que los interferogramas obtenidos están corregidos geométricamente (topografía y tierra plana) por lo tanto podemos descartar este origen. Las franjas homogéneas con un espaciado y tamaño similar, indican un gradiente constante y nos permite descartar que se deban a la actividad sísmica, a pesar de la alta actividad según la sección 9.3.

En la selección de los interferogramas esperábamos obtener patrones de comportamiento similar para aquellos que tuvieran en común el día con valores TEC más altos. Según el análisis realizado previamente, el día 29 de octubre de 2010 fue elegido como un día con un valor alto de

TEC, por lo tanto, podríamos esperar que las franjas se deban a la diferencia de valores TEC entre los días. Las 8 franjas muestran un desplazamiento de terreno de alrededor de 1 metro causadas por un cambio cerca de 4 unidades TEC de diferencia en aproximadamente 126 km en tierra.

Los demás interferogramas no presentan franjas ni anomalías que permitan identificar afectaciones debido a la ionosfera.

Las fases dispersas y no dispersivas no pudieron ser adecuadamente separadas en 4 de los 5 interferogramas debido a la baja coherencia, ya que la separación depende de la coherencia del interferograma original. En los interferogramas 3 y 5 esperábamos obtener una fase dispersiva con 8 franjas similares, que nos permitieran corregirlos debido a la afectación ionosférica, sin embargo, los mapas de coherencia indican valores bajos en la zona en general, en promedio la coherencia es de 0,30 y 0,28 respectivamente. Por otro lado, el interferograma 2 tiene buena coherencia y fase dispersiva coherente, en la ionosfera no se observan fuertes gradientes como es de esperarse debido a que los dos días tienen actividad ionosférica baja.

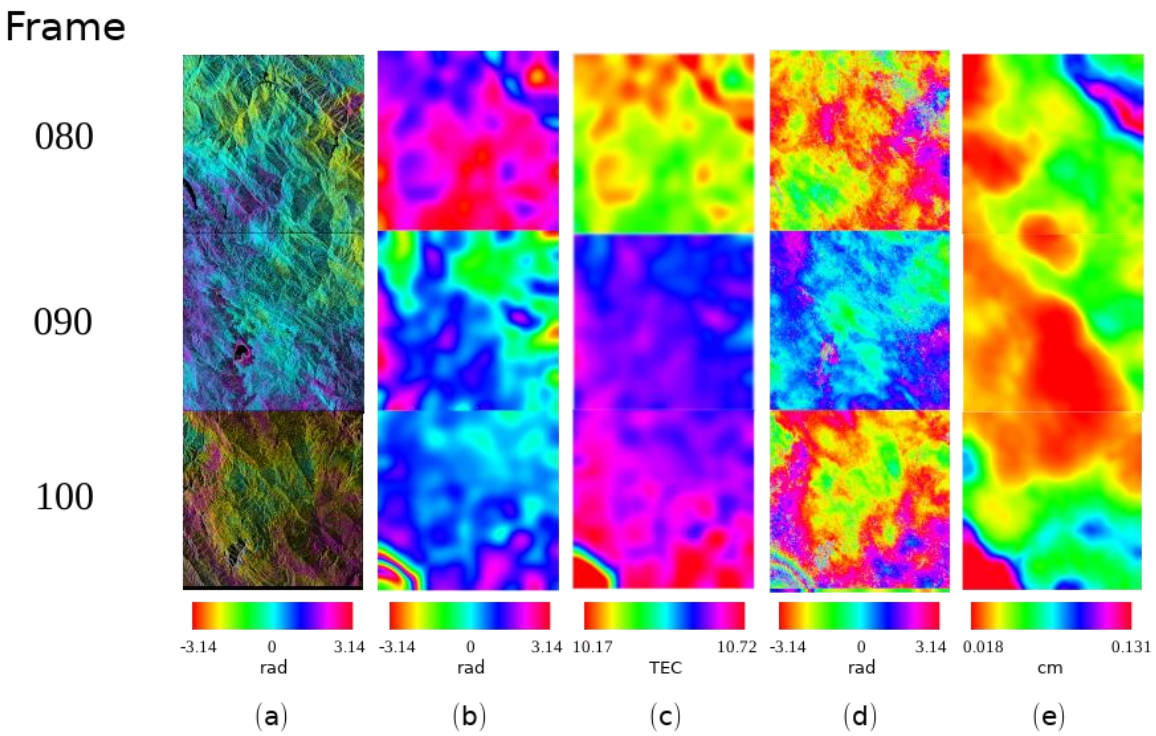



**Figura 15. Corrección del interferograma número 2. (a) Interferograma 2. (b) Fase ionosférica. (c) Mapa TEC ionosférico. (d) Interferograma compensado por ionósfera. (e) Exactitud esperada de la estimación ionosférica en cm.**

Ya que el interferograma número 2 tiene buena coherencia, se realizó la corrección ionosférica para observar la afectación y el resultado obtenido (Figura 15). Las imágenes obtenidas en python se encuentran en una escala de color diferente. En el interferograma (a) no se identifican fácilmente los efectos ionosféricos, pero aplicando el método split spectrum y como se ve en la fase ionosférica (b) y el cálculo STEC (c) el valor diferencial es de 0.55 TECU y por lo tanto no se observan fuertes gradientes ionosféricos. La imagen (d) muestra el interferograma (a) corregido por la fase ionosférica (b), y como se observa en los frame 100 y 090 la fase dispersiva no afecta significativamente el interferograma, en estos casos la ionosfera puede ser despreciada.

Sin embargo, el frame 080 corregido es muy diferente al interferograma original.

### 10.1.2 Análisis Path 145

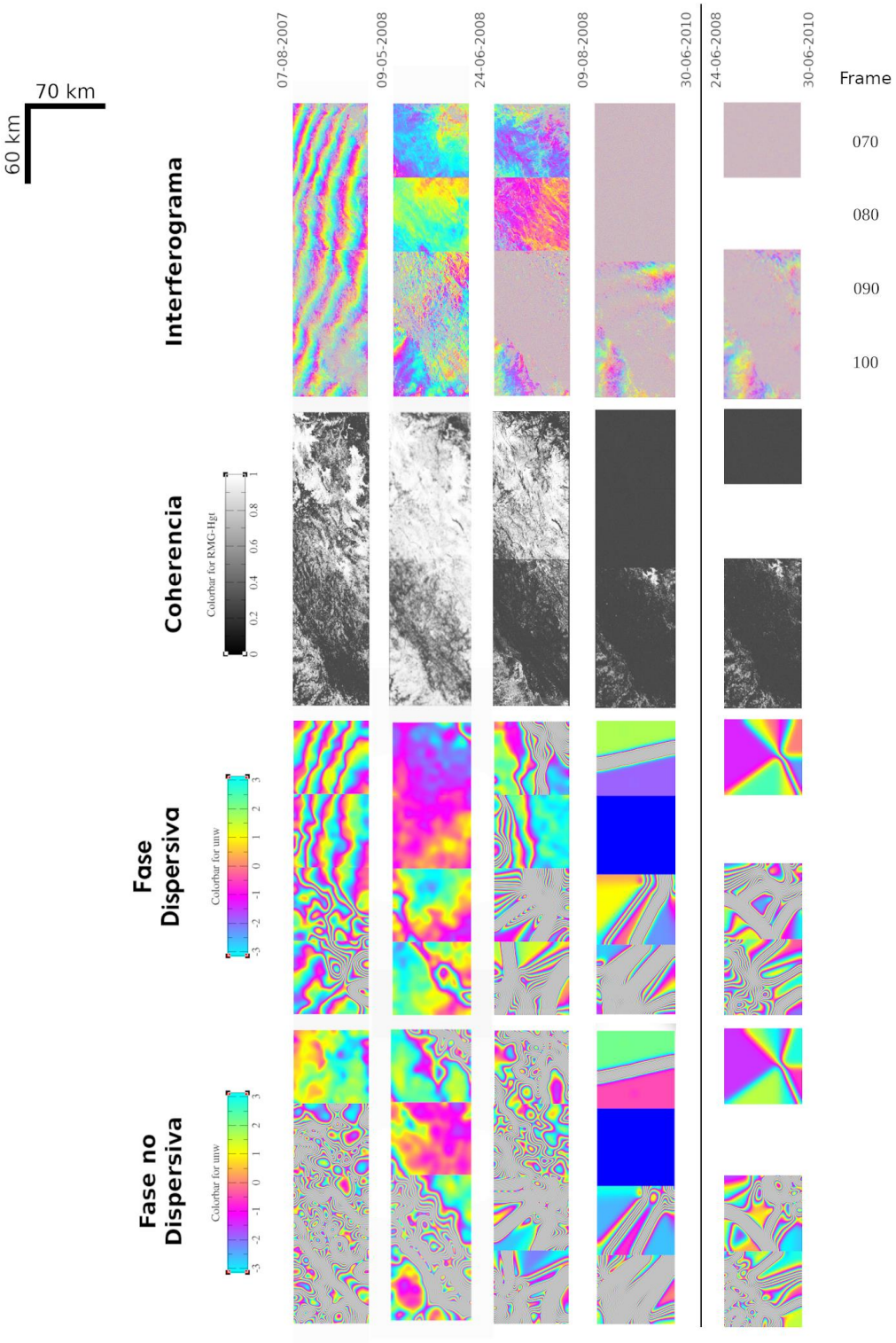



Figura 16. Resultados Path 145 Modo FBD

El día 7 de agosto de 2007 y 30 de junio de 2010 fueron determinados como días con valores TEC altos en la sección 9.3, los mapas globales ionosféricos y el índice F10.7 indican también un comportamiento atípico. En el interferograma 6 podemos observar 9 franjas, y en los interferogramas 9 y 10, a pesar de que los frame 070 y 080 no pudieron ser procesados, y de que los frame 090 y 100 presentan bastante baja coherencia en la zona media a lo largo de las montañas, se pueden ver 2 franjas.

En el interferograma 6 en los frame 070 y 100 se observan 6 y 5 franjas respectivamente en aproximadamente 80 km, Lo que indica un cambio de 2,83 y 2,36 unidades TEC. Es decir que en el sur el gradiente ionosférico es un poco más alto, tal vez debido a que se encuentra más cerca de la anomalía ecuatorial y ecuador magnético. Las nueve franjas totales que se observan en el interferograma 6 representan un cambio de 4,24 TEC en aproximadamente 230 km tierra. Mientras que las dos franjas de los interferogramas 9 y 10 representan un cambio de 1 TEC en aproximadamente 130 km.

En los interferograma 7 y 8 como era de esperarse no se obtuvieron franjas, no se evidencian afectaciones debido a la ionosfera.

Los interferogramas 9 y 10 tienen baja coherencia, mientras que los interferogramas 6, 7 y 8 tienen mayor coherencia en los frames 080 y 070 pero en los frame 090 100 presentan más baja coherencia.

Igualmente, que en el path 144 la separación entra la fase dispersiva y la fase no dispersiva depende de la coherencia de los interferogramas originales. En la fase dispersiva del interferograma 6, en los frame 070 y 080, se obtuvieron exactamente las mismas franjas que se obtuvieron en el interferograma original, confirmando que las franjas se deben a afectaciones ionosféricas. En los frame 100 y 090 se evidencian solo algunas franjas en la parte más coherente

pero donde la coherencia es baja no se realizó adecuadamente la división. La fase dispersiva y no dispersiva no presentan ninguna correlación entre sí, por lo que podemos decir que la división fue realizada correctamente en la mayor parte del interferograma.

En el interferograma 7 la fase dispersa tiene comportamiento homogéneo a comparación del interferograma 6, sin embargo, solo se separó adecuadamente las fases en los frames 070 y 080 donde la coherencia fue alta. En el interferograma 8 a pesar de tener coherencia alta en la mayor parte de zona, la fase dispersiva no es coherente. Finalmente, en los interferogramas 9 y 10 esperábamos obtener fases dispersivas pero la baja coherencia no permitió realizar la división.

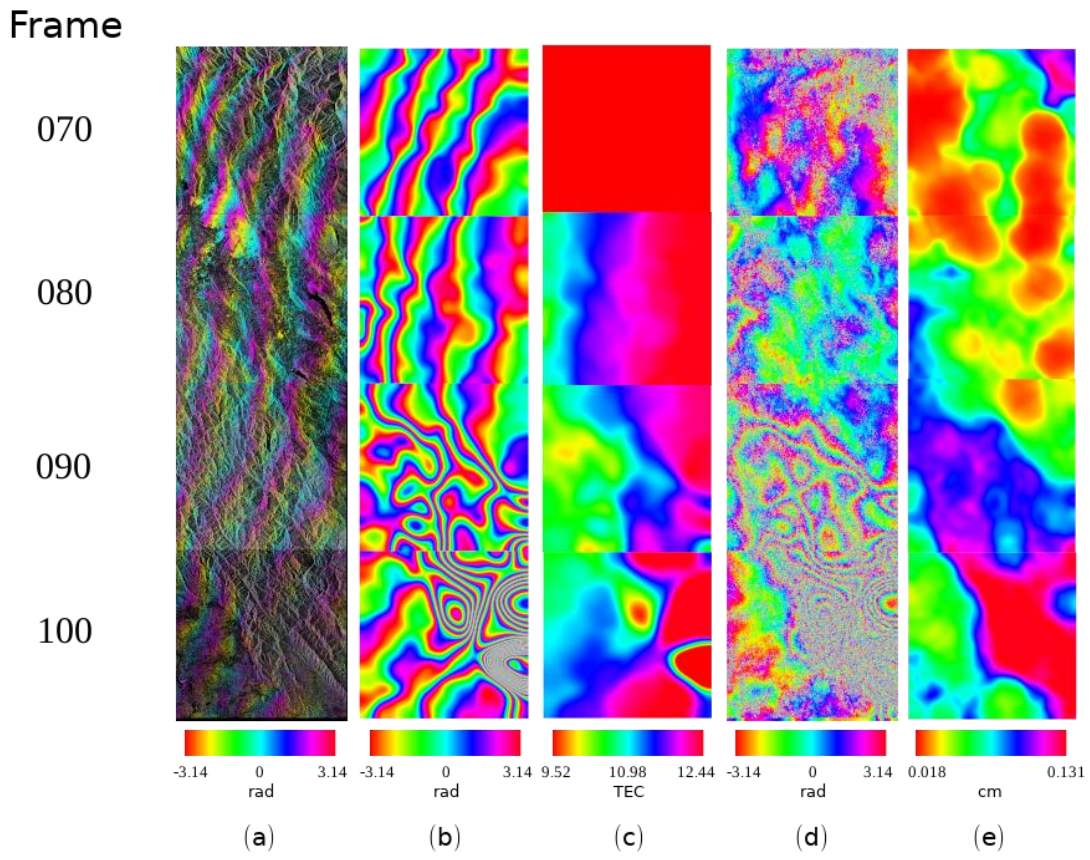



**Figura 17. Corrección del interferograma número 6. (a) Interferograma 6. (b) Fase ionosférica. (c) Mapa TEC ionosférico. (d) Interferograma compensado por ionósfera. (e) Exactitud esperada de la estimación ionosférica en cm.**

Se escogió el interferograma número 6 ya que claramente presenta problemas debido a la ionósfera. Como se muestra en la Figura 17 en el interferograma (a), se pueden evidenciar las 9 franjas debido a gradientes TEC a lo largo de los 4 frames, y en la imagen (b) la fase dispersa tiene franjas similares, pero con problemas debido a la baja coherencia en la mayor parte de los frame 100 y 090, que también se evidencia en el STEC calculado (c). El frame 080 que presenta buena coherencia tiene un valor TEC de 12.44 unidades a la derecha y un valor de aproximadamente 10.396 a la izquierda, una diferencia de 2.044 TEC en 70 km aproximadamente, explicando las 4 franjas en el interferograma. En el interferograma corregido (d) se puede ver cómo fue corregida la afectación ionosférica en los frame 070, 080 y solo una pequeña parte de los frame 090 y 100. Además, los frame 080 y 070 tienen desviación estándar más pequeña comparada al frame 090 y 100 que es más alta debido a la baja coherencia.

El cálculo TEC (c) del frame 070 obtuvo valores TEC bajos, por esa razón no salió en la escala de color anterior. Según la Figura 18, el frame 070 presenta valores menores a 2 unidades TEC, en la parte inferior derecha el valor es de 1.95 TECU y en la parte superior izquierda el valor es de -0.6 unidades TEC, una diferencia de 2.55 TECU en aproximadamente 92 km, evidenciándose en las 6 franjas. La falta de continuidad entre los valores de los frames 070 y 080 nos lleva a concluir que también se presentaron problemas de desenvolvimiento de fase.

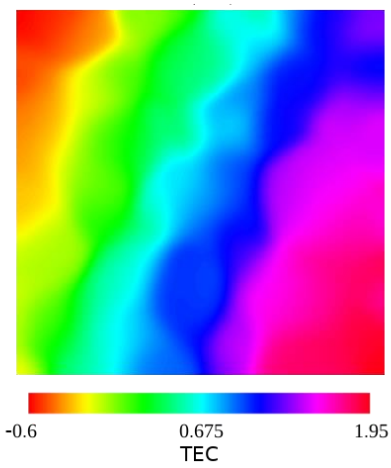



Figura 18. Mapa TEC calculado por ISCE del Frame 070 interferograma 6.

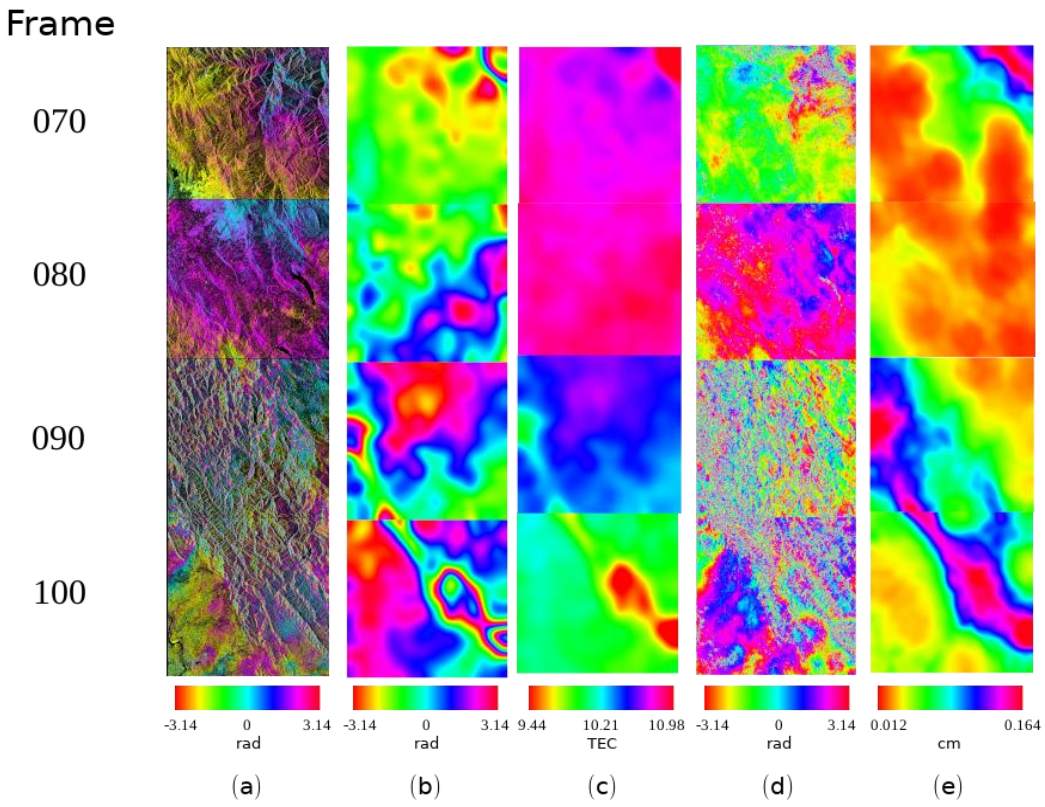



Figura 19. Corrección del interferograma número 7. (a) Interferograma 7. (b) Fase ionosférica. (c) Mapa TEC ionosférico. (d) Interferograma compensado por ionósfera. (e) Exactitud esperada de la estimación ionosférica en cm.

También el interferograma 7 tiene buena coherencia en los frame 070 y 080, y la fase ionosférica es coherente. En la Figura 19 en el interferograma (a) no se evidencian problemas ionosféricos, pero al calcular la fase ionosférica (b) y corregir el interferograma, se observa en la imagen (d) que el interferograma ha sido suavizado a pesar de que la variación TEC no es alta y la ionosfera tiene comportamiento homogéneo (c).

### 10.1.3 Path 144 modo FBS

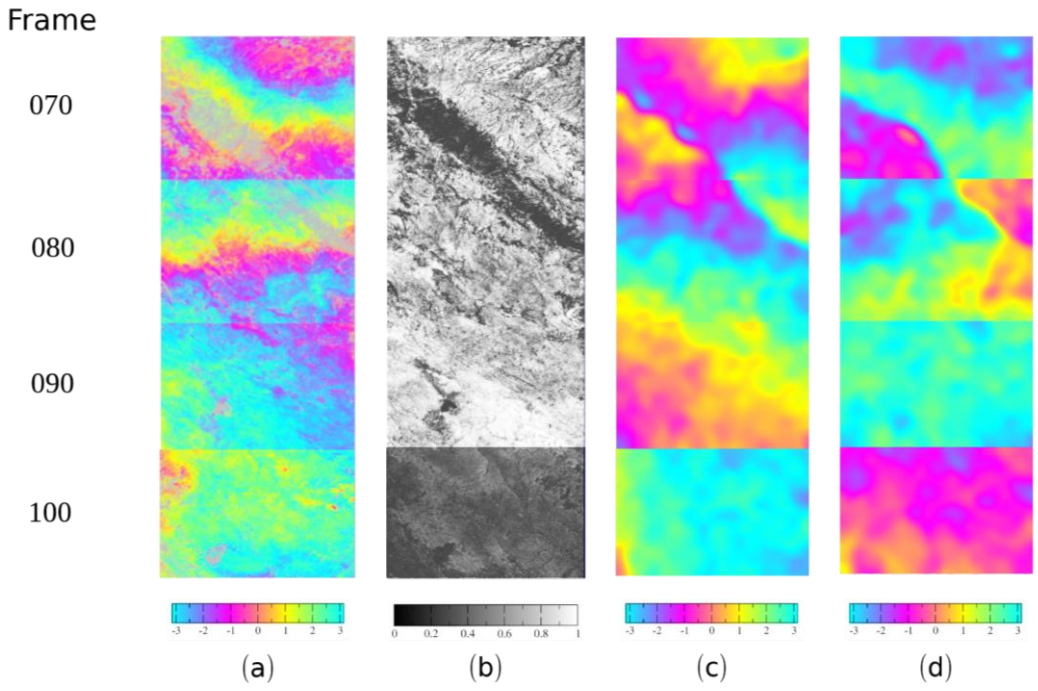



**Figura 20. Resultados Path 144 Modo FBS (a) Interferograma 11. (b) Mapa de coherencia. (c) Fase Dispersiva. (d) Fase no dispersiva.**

La imagen 20 muestra los resultados obtenidos con el modo FBS. En el interferograma (a): se observan 2 franjas en el frame 070 y una franja en el frame 080, que nos indican desplazamientos de 22 y 11 cm respectivamente en aproximadamente 60 km terreno. En general el interferograma tiene buena coherencia (b), solo se evidencia correlación entre las fases dispersiva (c) y no dispersiva (d) en el frame 070 y 080 debido a coherencia baja. El frame 100 tiene más baja

coherencia con respecto a los demás frames, sin embargo, aun así la fase dispersiva parece ser correctamente separada.

La fase dispersiva (c) tiene comportamiento suave comparado a la fase obtenida del interferograma 6, a pesar de que los mapas globales y los índices en la sección 9.4, indican que ambos días tienen valores TEC altos, incluso mayores a los del interferograma 6. Esto se da debido a que el TEC calculado por InSAR representa las unidades de densidad de electrones de un día relativo al otro. Por último observando la figura 20 (a) y 20 (c), las franjas del interferograma (a) parecen estar relacionados con la fase ionosférica.

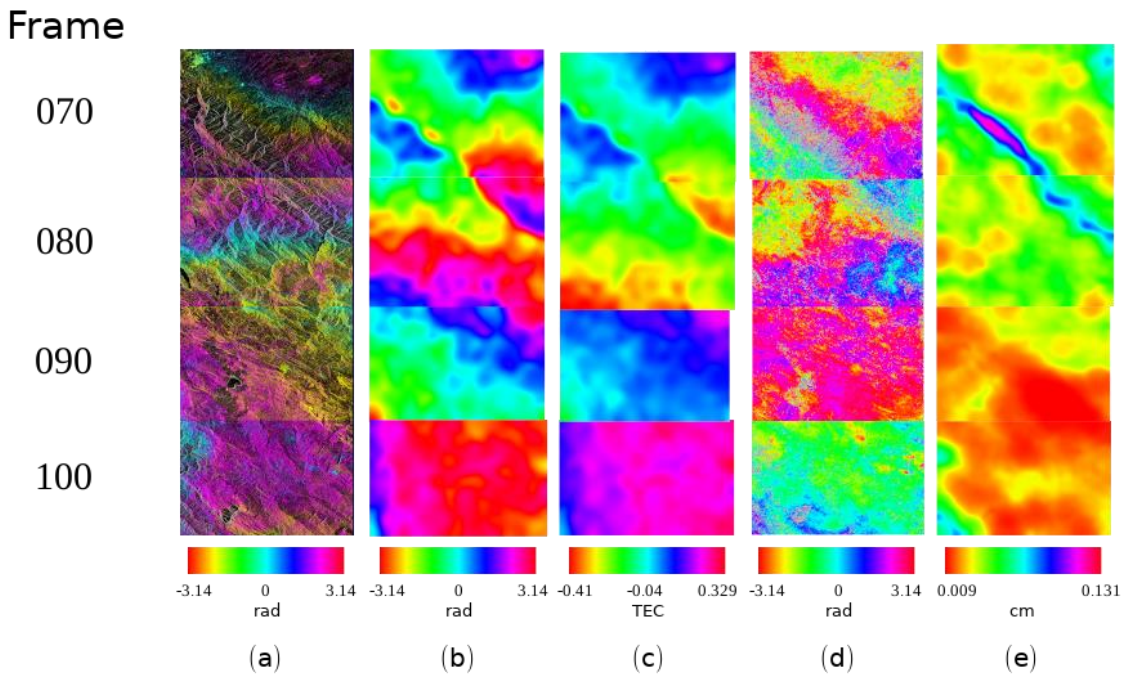



**Figura 21. Corrección del interferograma número 11. (a) Interferograma 11. (b) Fase ionosférica. (c) Mapa TEC ionosférico. (d) Interferograma compensado por ionósfera. (e) Exactitud esperada de la estimación ionosférica en cm.**

A pesar de que los dos días tienen valores altos TEC, no se evidencian fácilmente los efectos en el interferograma (a), debido a que la diferencia TEC entre los días es casi nula. Sin embargo, observando la fase dispersiva (b) y el interferograma, se observa la relación que tienen algunas

franjas. Según la fase ionosférica y el mapa TEC (c) la ionósfera no es homogénea, en los frame 080 y 090 se observa una franja debido a la diferencia TEC de alrededor de 0.8 Unidades.

La imagen (d) muestra el frame 090 y la mayor parte del frame 080 corregidos, solo fallando en la zona con baja coherencia. El frame 100 no muestra afectaciones ionosféricas, y el frame 070 a pesar de que la franja observada parece estar muy relacionada a la fase dispersiva no se realizó adecuadamente la corrección.

### 10.1.4 Discusión

Como se mostró en los resultados obtenidos, las imágenes de radar y su aplicación en interferometría reflejan los efectos ionosféricos que se presentaron en el momento de la toma de las imágenes. Los interferogramas 3, 5, 6, 9 y 10 reflejaron fuertes gradientes en varias franjas debido a la diferencia TEC y el estado no homogéneo que presentaron los mapas globales en los días escogidos. En el interferograma 11 con días con valores TEC altos, el mapa TEC indica diferenciales bajos como era de esperarse, pero aun así la fase dispersiva no es homogénea. A diferencia de los interferogramas 2 y 7 con días tranquilos donde se obtuvo que la fase dispersiva era homogénea.

Sin embargo, la baja coherencia y errores en desenvolvimiento de fase limitaron la estimación adecuada de la fase dispersiva. Se puede corregir los errores de desenvolvimiento debido a la baja coherencia mediante el método utilizado por Gomba donde a pesar de la baja coherencia pudo calcular y corregir el interferograma y utilizar los diferentes filtros utilizados en (Gomba, Parizzi, De Zan, & Eineder, 2016).

## 10.2 Mapas GNSS

### 10.2.1 26-07-2009 Y 10-09-2009 (Correspondiente al interferograma 2)

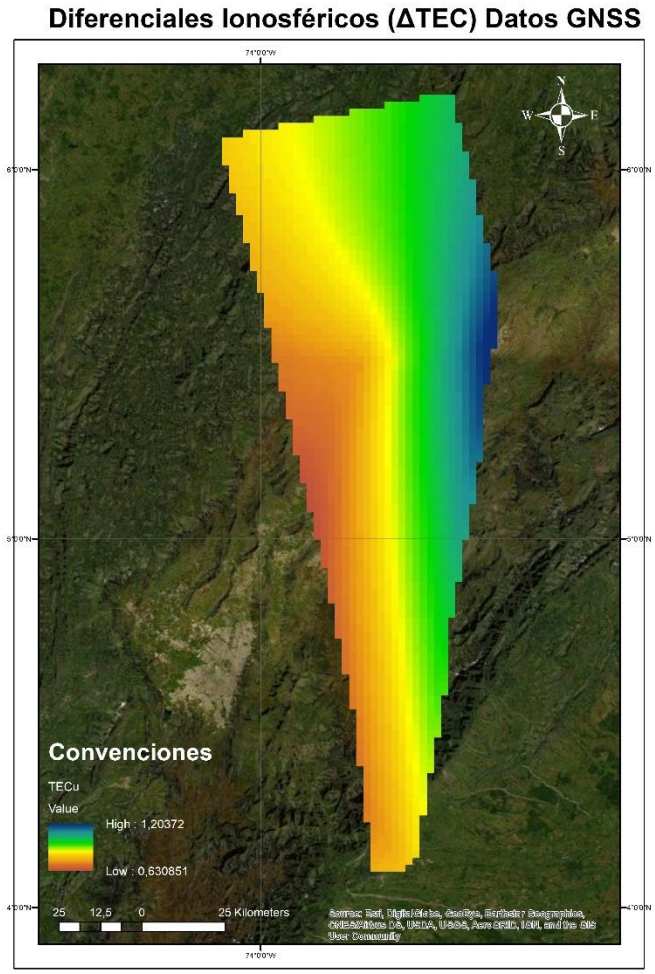



**Figura 22. Mapa Diferencial TEC GNSS obtenido para los días correspondientes al interferograma 2.**

En el anterior mapa 22 se puede ver representado el valor TECu calculado a partir del método GNSS en la cual se aprecia el valor más alto en 1,2 TECu (Azul) y el valor más bajo en 0,6 TECu (Rojo). El Path 144 no se encuentra en su totalidad completo debido a que no se obtuvo información de estaciones geodésica como ARCA (estación ubicada en Arauca) y YOPA (estación ubicada en Yopal) en ambos días, la cual es una de las estaciones importantes para poder obtener información completa de este path, el cual será correlacionado con el resultado que nos dio a partir

del método Spit Spectrum. Pero sin poder correlacionar la información que nos dio los Frames 070 y 080 porque no hay datos locales suficientes para desarrollar una correlación correcta como se expresó anteriormente.

### 10.2.2 07-08-2007 Y 09-05-2008 (Correspondiente al interferograma 6)

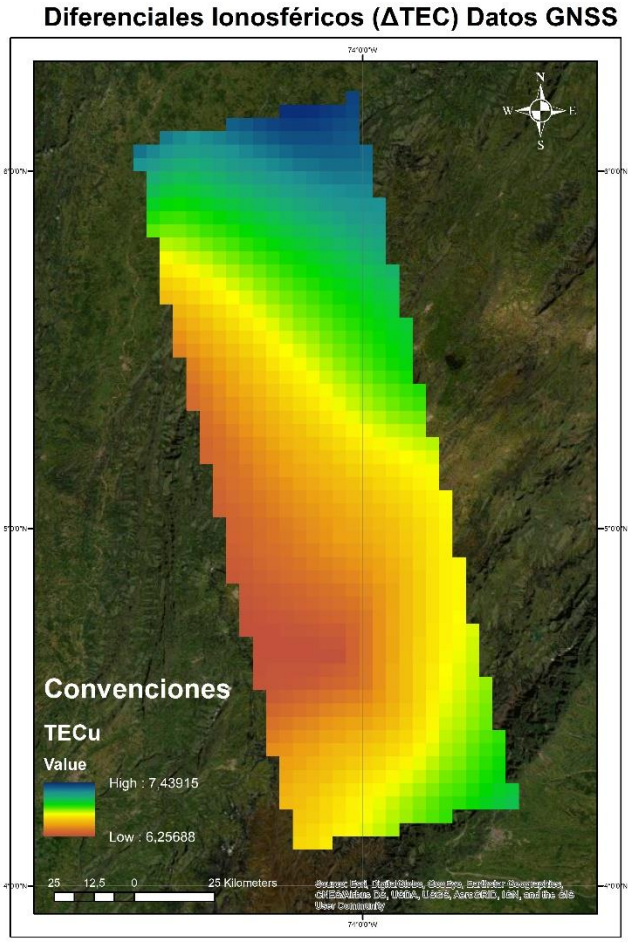



**Figura 23. Mapa Diferencial TEC GNSS obtenido para los días correspondientes al interferograma 6.**

En el anterior mapa (Figura 23) se puede ver representado el valor TECu calculado a partir del método GNSS en la cual se aprecia el valor más alto en 7,4 TECu (Azul) y el valor más bajo en

6,2 TECu(Rojo). Donde se evidencia el Path 145 completo que será correlacionado con el resultado que nos dio a partir del método Spit Spectrum.

### 10.2.3 09-05-2008 Y 24-06-2008 (Correspondiente al interferograma 7)

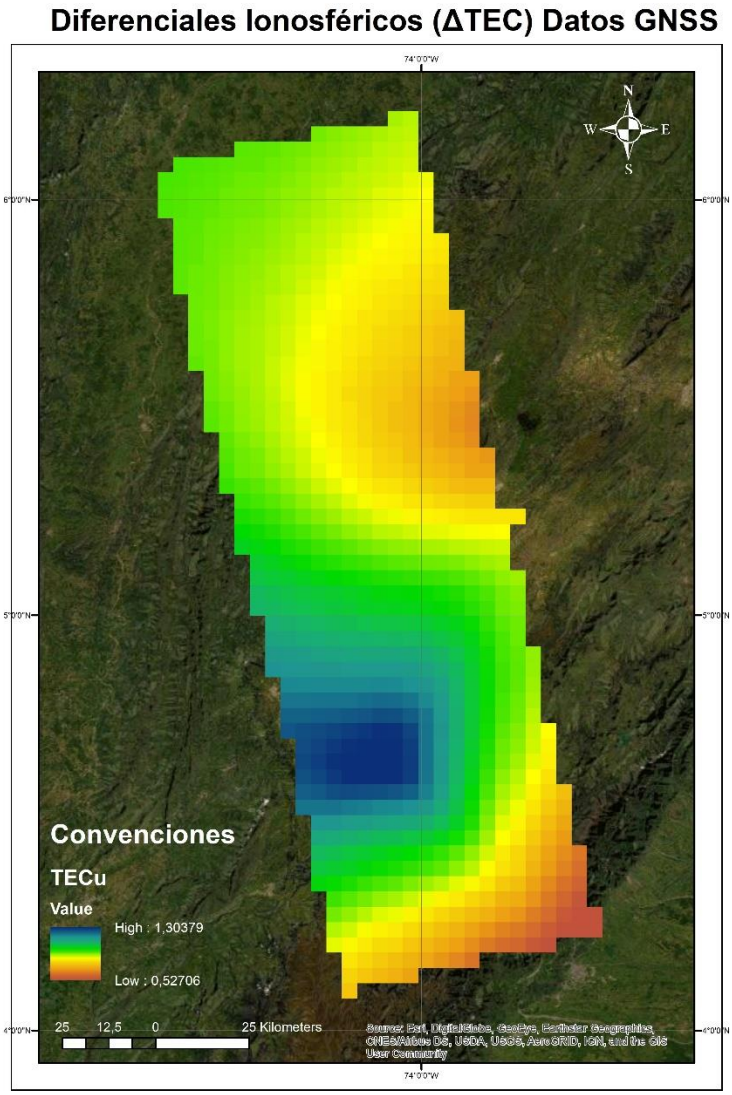



**Figura 24. Mapa Diferencial TEC GNSS obtenido para los días correspondientes al interferograma 7.**

En el anterior mapa (Figura 24) se puede ver representado el valor TECu calculado a partir del método GNSS en la cual se aprecia el valor más alto en 1,3 TECu (Azul) y el valor más bajo en

0,5 TECu (Rojo). Donde se evidencia el Path 145 completo que será correlacionado con el resultado que nos dio a partir del método Split Spectrum.

### 10.2.4 13-03-2010 Y 28-04-2010 (Correspondiente al interferograma 11)

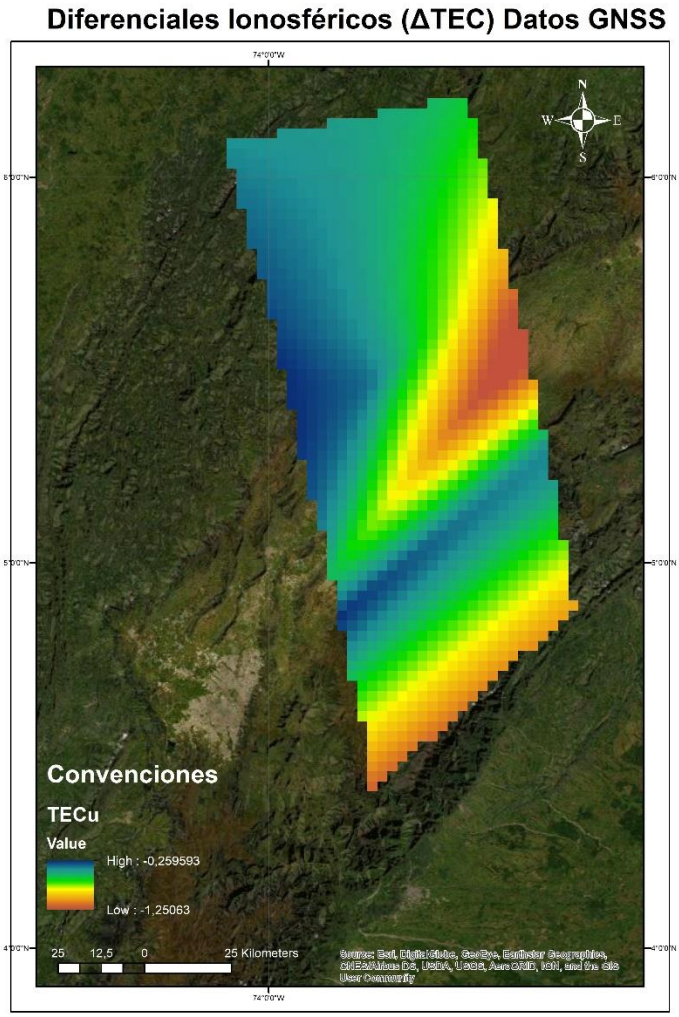



Figura 25. Mapa Diferencial TEC GNSS obtenido para los días correspondientes al interferograma 11

En el anterior mapa (Figura 25) se puede ver representado el valor TECu calculado a partir del método GNSS en la cual se aprecia el valor más alto en -0,2 TECu (Azul) y el valor más bajo en -1,2 TECu (Rojo). El Path 144 no se encuentra completo debido a que no se obtuvo información de estaciones geodésicas como VIVI (estación ubicada en Villavicencio) en el día 28-04-2010 y

YOPA (estación ubicada en Yopal) en ambos días, la cual son unas de las estaciones importantes para poder obtener información completa de este path, el cual será correlacionado con el resultado que nos dio a partir del método Spit Spectrum. Pero sin poder correlacionar la información del Frame 070 porque no hay datos locales suficientes para desarrollar una correlación correcta como se expresó anteriormente.

## 10.3 Correlaciones

### 10.3.1 Interferograma # 2

#### *10.3.1.1 Frame 070*

No hay datos locales suficientes para desarrollar una correlación correcta

#### *10.3.1.2 Frame 080*

No hay datos locales suficientes para desarrollar una correlación correcta

#### *10.3.1.3 Frame 090*

```
Call:
lm(formula = TEC_GNSS ~ TEC_RADAR, data = C14405090)

Residual standard error: 0.1397 on 797 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.1769, Adjusted R-squared:  0.1758
```

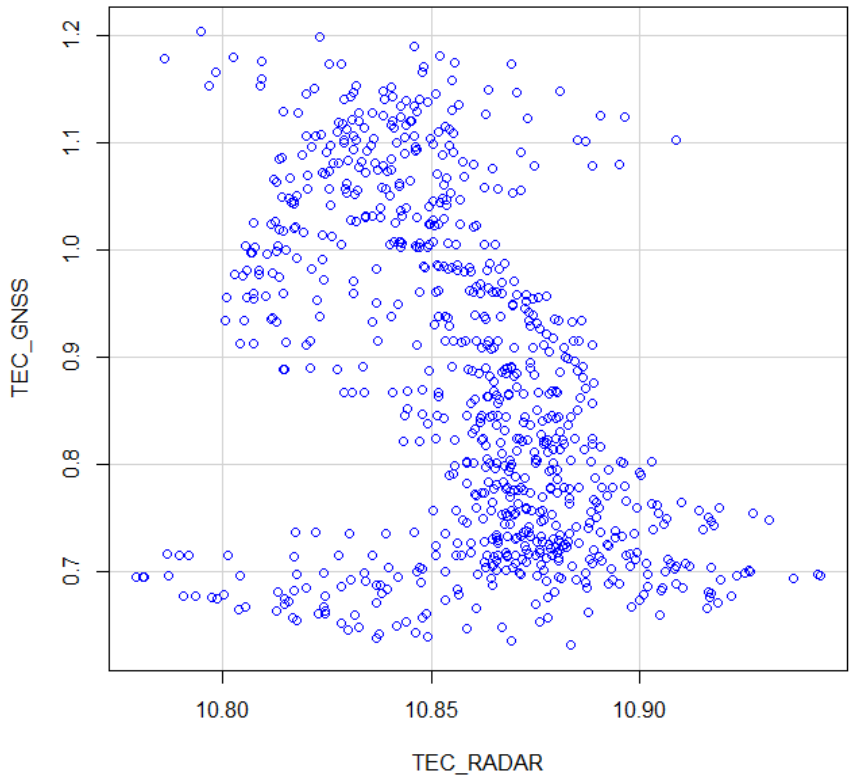



Figura 26. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 2, frame 090

**Análisis:** podemos observar en la gráfica una correlación baja positiva en la cual el 17% de los datos TEC se relacionan entre sí, es decir el 17% de los TEC_RADAR son acordes con los datos TEC_GNSS. Incluso por la forma de la gráfica se podría interpretar que hay alguna probabilidad que exista una correlación compleja.

#### *10.3.1.4 Frame 100*

```
Call:
lm(formula = GRID_CODE ~ RASTERVALU, data = C14405100)
Residual standard error: 0.07269 on 886 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.288, Adjusted R-squared:  0.2872
```

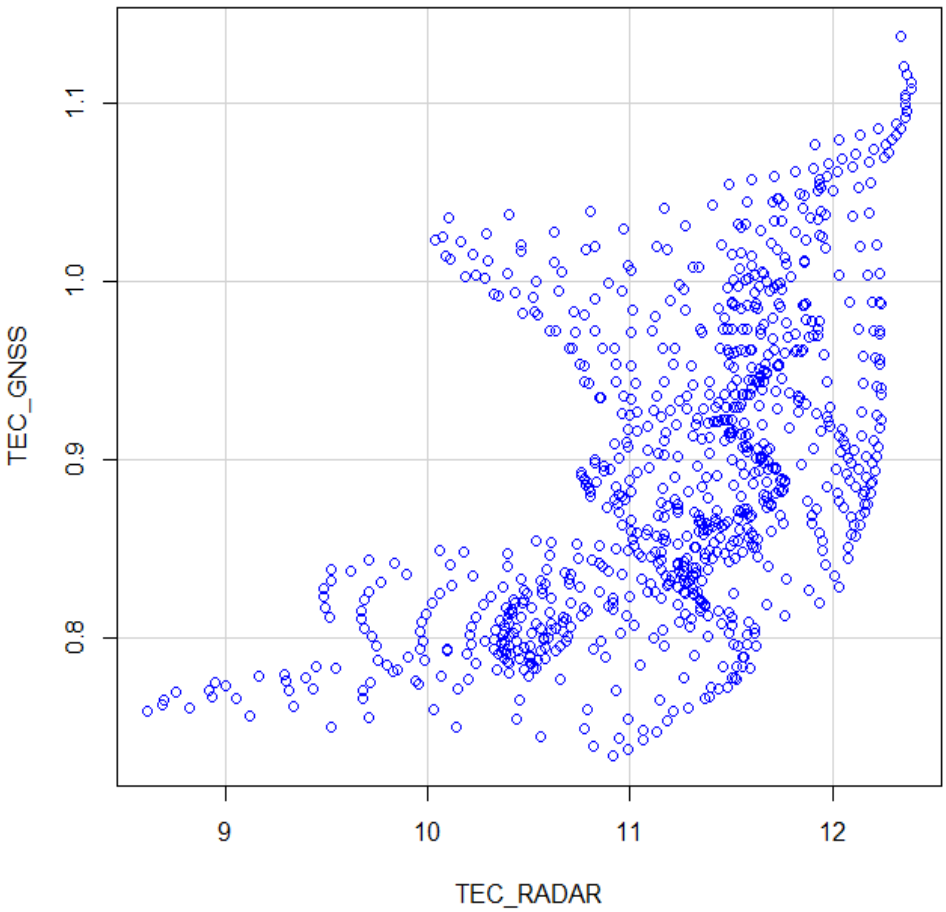



Figura 27. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 2, frame 100

**Análisis:** podemos observar en la gráfica una correlación baja positiva en el cual el 28% de los datos TEC se relacionan entre sí, es decir el 28% de los TEC_RADAR son acordes con los datos TEC_GNSS.

La correlación presentada es baja teniendo en cuenta que los interferogramas obtenidos presentan buena coherencia, analizaremos este caso al final con los demás resultados.

### 10.3.2 Interferograma # 6

#### *10.3.2.1 Frame 070*

```
Call:
lm(formula = GRID_CODE ~ RASTERVALU, data = c450570)
Residual standard error: 0.1717 on 232 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.1499, Adjusted R-squared:  0.1463
```

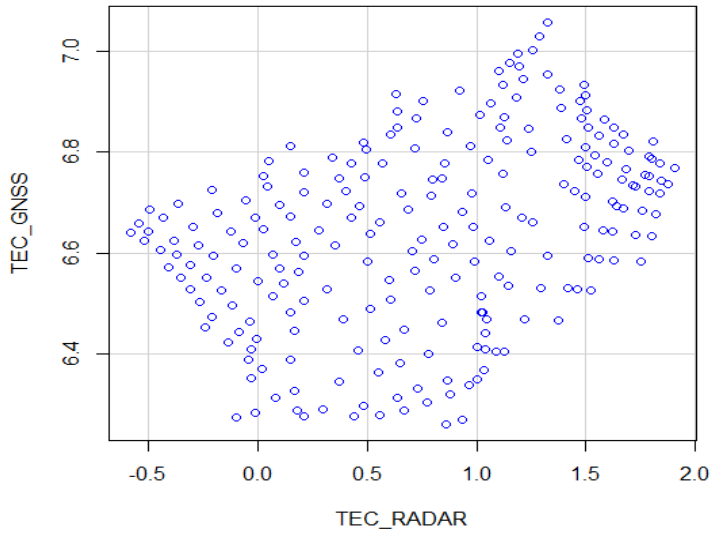



Figura 28. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 6, frame 070.

**Análisis:** podemos observar una correlación positiva en la cual el 14% de los datos TEC Radar se relacionan con los datos TEC GNSS.

### *10.3.2.2 Frame 080*

```
Call:
lm(formula = GRID_CODE ~ RASTERVALU, data = C1450508)

Residual standard error: 0.05875 on 230 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8341, Adjusted R-squared:  0.8334
```

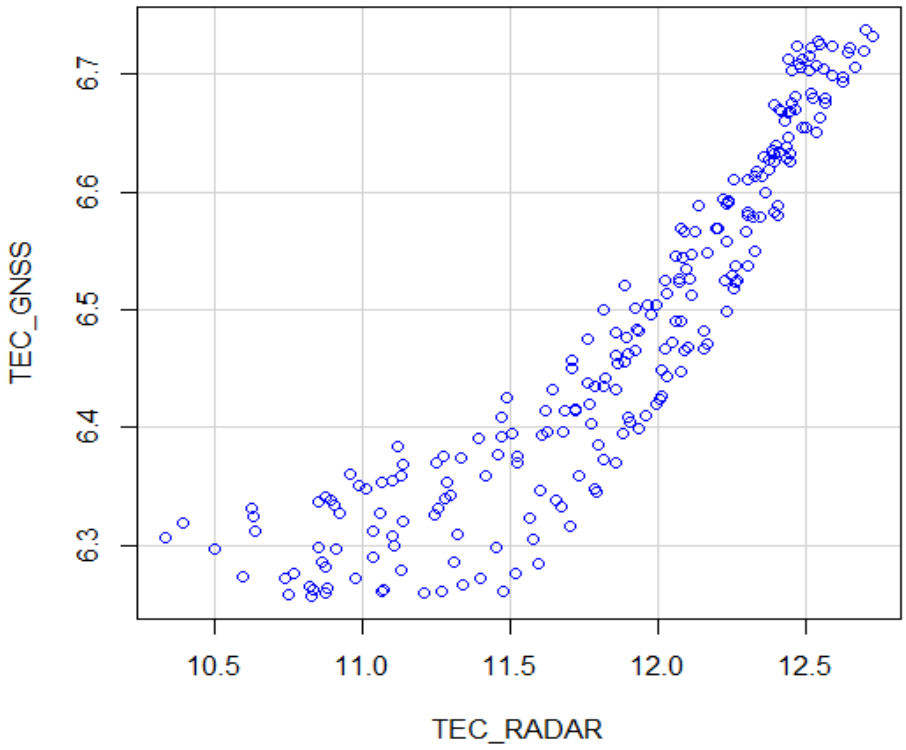



**Figura 29. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 6, frame 080.**

**Análisis:** observamos una correlación alta positiva, donde podemos apreciar en la gráfica que los datos tienen buena correspondencia entre ellos, la cual explica que el 83% de TEC GNSS tiene relación con el TEC RADAR.

#### *10.3.2.3 Frame 090*

```
Call:
lm(formula = GRID_CODE ~ RASTERVALU, data = C14505090)

Residual standard error: 0.1207 on 226 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5833, Adjusted R-squared:  0.5815
```

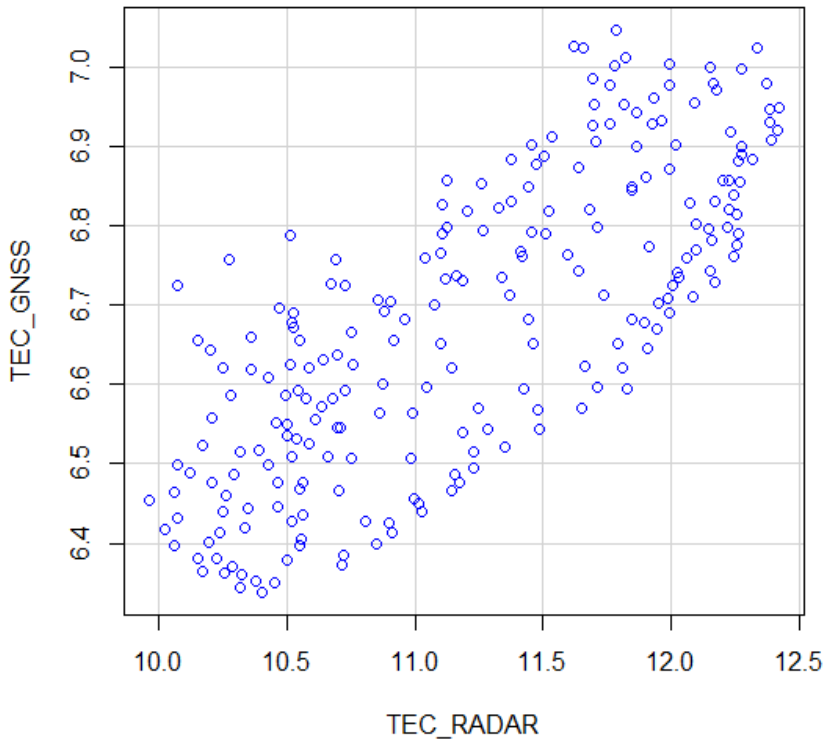



**Figura 30. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 6, frame 090.**

**Análisis:** podemos observar en la gráfica, una correlación media positiva, en la cual el 58% de los datos TEC se relacionan entre sí, es decir el 58% de los TEC_RADAR son acordes con los datos TEC_GNSS.

#### *10.3.2.4 Frame 100*

```
Call:
lm(formula = GRID_CODE ~ RASTERVALU, data = C14505100)

Coefficients:
             Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  6.61352    0.13120  50.407  < 2e-16 ***
RASTERVALU   0.04014    0.01143   3.512 0.000532 ***
Residual standard error: 0.2049 on 238 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.04927, Adjusted R-squared:  0.04528
```

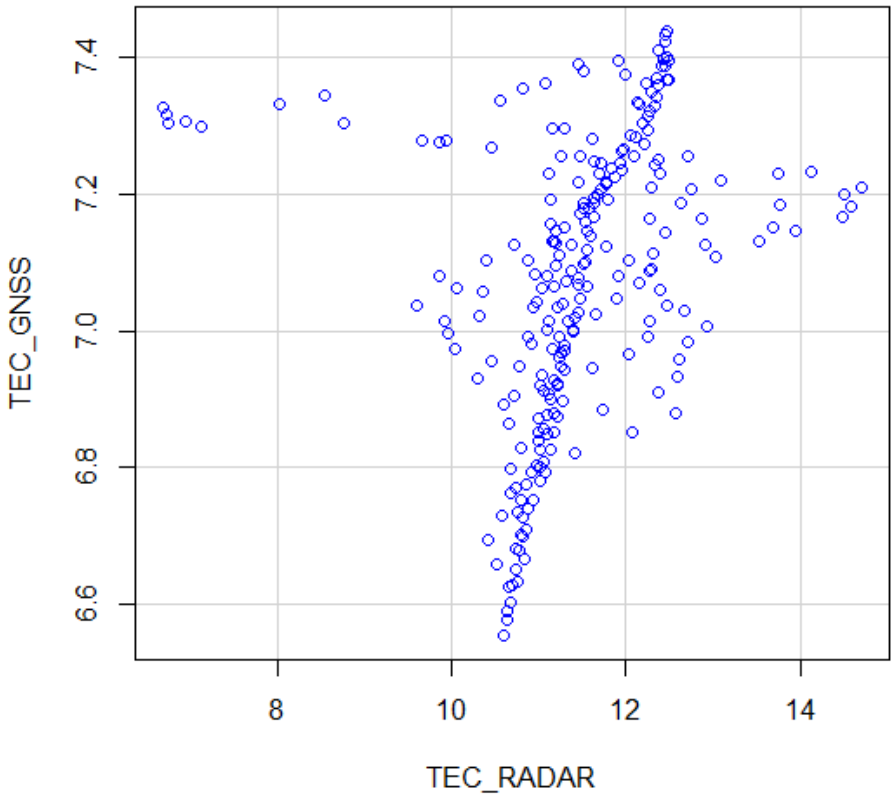



**Figura 31. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 6, frame 100.**

**Análisis:** podemos observar en la gráfica una correlación demasiado baja como lo muestra la imagen, en la cual los datos se comportan paralelos al eje y, mostrando que la gran mayoría de datos no se relacionan entre sí. En este caso la correlación es del 4%.

La pendiente de la gráfica según los resultados obtenidos es de 0.04, mientras que la de las anteriores gráficas es de más o menos 0.20, es decir que esta gráfica se aproxima mucho más a una línea horizontal. Los datos atípicos presentes en la gráfica se deben a los datos no reales obtenidos por el ruido de la coherencia baja en la zona. Se podría realizar la correlación sin los datos atípicos y esperar un resultado similar de pendiente a 0.20, sin embargo, gran parte de la zona presenta ruido, entonces no es necesario realizar la correlación.

Podemos explicar la correlación baja de los frames 100 (R-5%) y 070 (R-14%); y la correlación media del frame 090 (58 %), debido a la baja coherencia que se presentó en los frame 100 y 090, y afectó la división de la fase dispersiva como se ve en la figura 16, y aunque en el frame 070 el software cálculo adecuadamente la fase ionosférica como se analizó anteriormente, los valores TEC RADAR calculados por ISCE fueron bajos [ Entre -0.5 y 2.0 unidades TEC], mientras que los valores de los demás frames son más altos [ Entre 10 y 12 unidades]. La baja correlación del frame 070 obtenido de ISCE con el TEC GNSS, la diferencia entre los valores TEC Radar de los diferentes frames y al análisis realizado en la sección 10.1.2, nos evidencia problemas de desenvolvimiento de fase en el frame 070.

Aunque en los cuatro gráficos de dispersión se evidencian tendencias positivas, los estadísticos R no aseguran que los datos TEC Radar y GNSS presenten correlación en tres de los 4 frames, solamente el frame 080 presentó correlación positiva y tendencia marcada (R-83%) ya que en esta zona la coherencia fue alta, y por lo tanto los valores obtenidos son más reales.

Hay que tener en cuenta que la correlación se realizó entre el TEC vertical GNSS y el TEC inclinado de Radar.

### 10.3.3 Interferograma # 7

#### *10.3.3.1 Frame 070*

```
Call:
lm(formula = GRID_CODE ~ RASTERVALU, data = C14504070)

Residual standard error: 0.1718 on 237 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.002229, Adjusted R-squared:  -0.001981
```

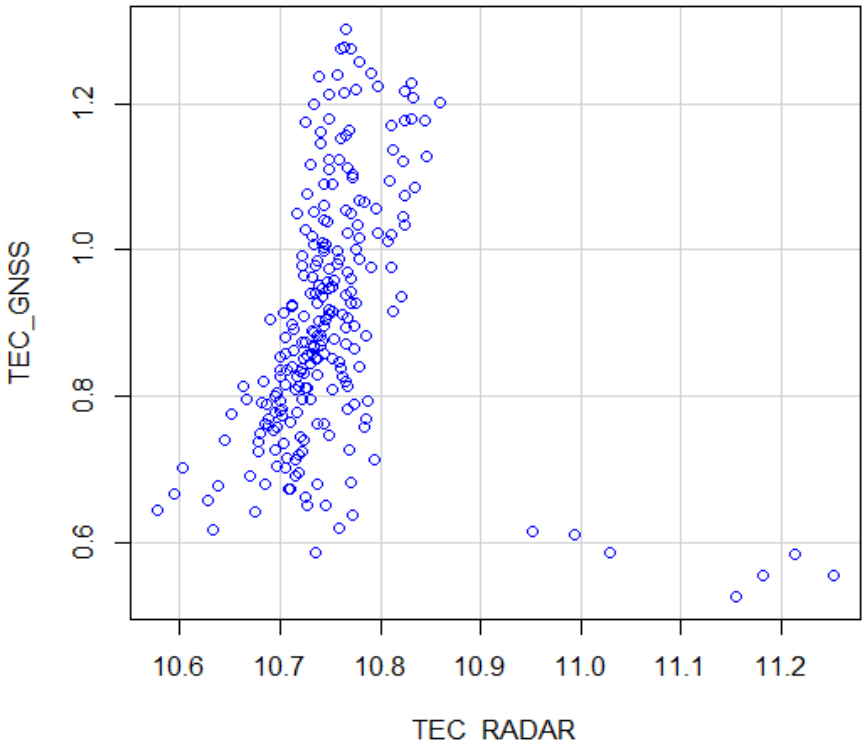



Figura 32. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 7, frame 070

**Análisis:** podemos observar en la gráfica una correlación demasiado baja y significativa como lo muestra la imagen, en la cual los datos se comportan paralelos al eje y, mostrando que la gran mayoría de datos no se relacionan entre sí. En este caso la correlación es del 4%.

### *10.3.3.2 Frame 080*

```
Call:
lm(formula = GRID_CODE ~ RASTERVALU, data = C14504080)

Coefficients:
             Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  16.5541     1.4442   11.46   <2e-16 ***
RASTERVALU   -1.4307     0.1333  -10.73   <2e-16 ***
Residual standard error: 0.08967 on 239 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.3252, Adjusted R-squared:  0.3224
```

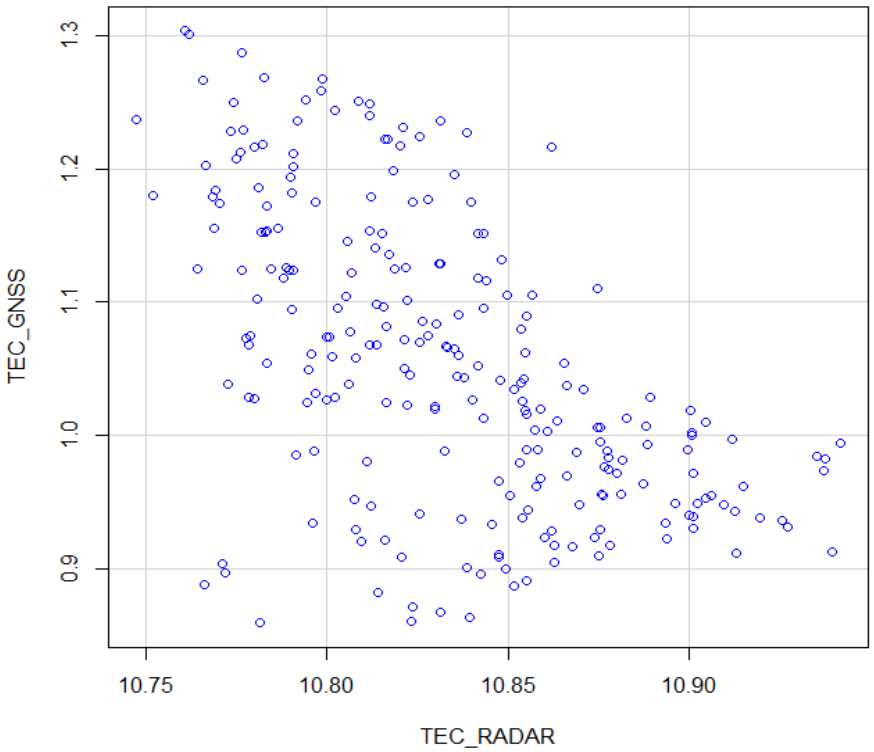



**Figura 33. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 7, frame 080**

**Análisis:** podemos observar en la gráfica una correlación baja positiva, aunque la gráfica no muestra tendencia positiva o negativa, pero numéricamente lo podemos saber, en la cual el 32% de los datos TEC se relacionan entre sí, es decir el 32% de los TEC_RADAR son acordes con los datos TEC_GNSS.

### *10.3.3.3 Frame 090*

```
Call:
lm(formula = GRID_CODE ~ RASTERVALU, data = C14504090)
Residual standard error: 0.07537 on 234 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.004594, Adjusted R-squared:  0.0003404
F-statistic:  1.08 on 1 and 234 DF,  p-value: 0.2998
```

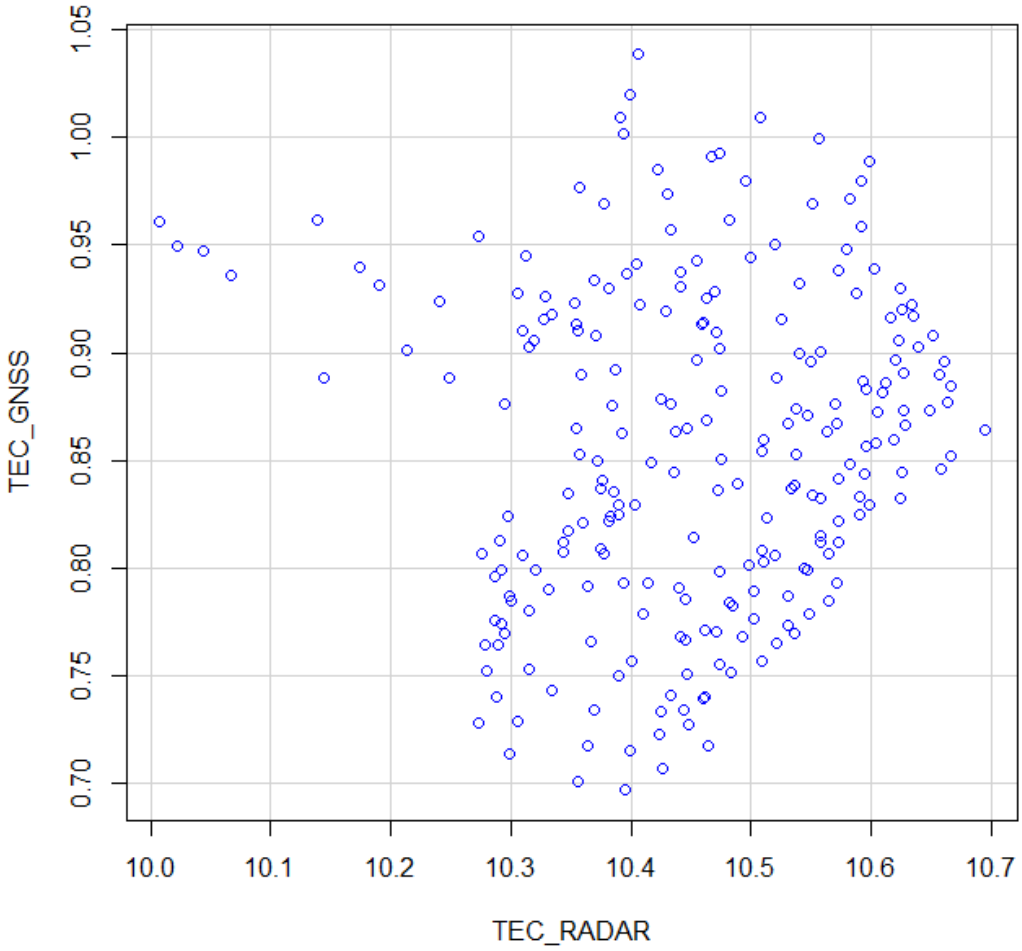



Figura 34. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 7, frame 090

**Análisis:** podemos observar en la gráfica una correlación demasiado baja y significativa como lo muestra la imagen, en la cual los datos se comportan de forma muy dispersa, mostrando que la gran mayoría de datos no se relacionan entre sí. En este caso la correlación es del 0,4%.

#### *10.3.3.4 Frame 100*

```
Call:
lm(formula = GRID_CODE ~ RASTERVALU, data = C14504100)
Residual standard error: 0.03649 on 242 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.1116, Adjusted R-squared:  0.1079
```

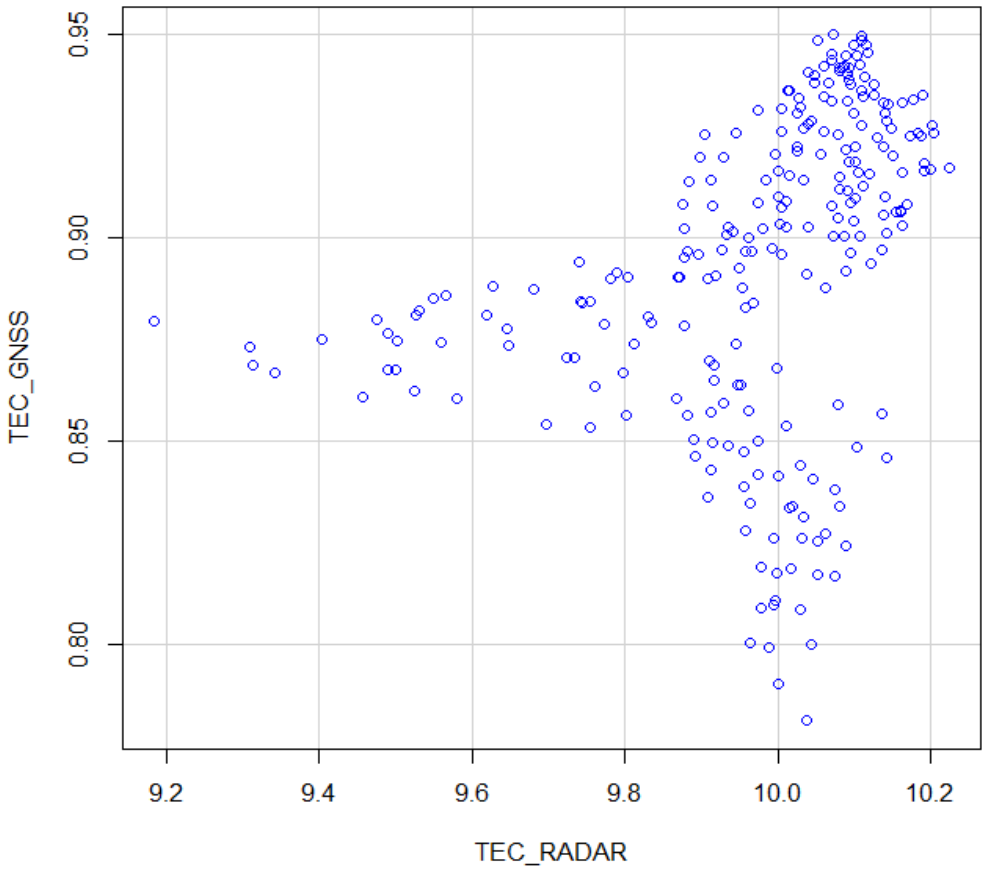



Figura 35. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 7, frame 100

**Análisis:** podemos observar en la gráfica una correlación baja positiva en la cual el 10% de los datos TEC se relacionan entre sí, es decir el 10% de los TEC_RADAR son acordes con los datos TEC_GNSS.

La coherencia baja de los frame 100 y 090 induce al software ISCE tomar valores falsos de unidades TEC, que se evidencia en las gráficas de dispersión sin tendencia y en los estadísticos R bajos. Sin embargo, la correlación baja de los frame 080 y 070 obtenida no es la esperada, ya que

en esta zona la coherencia es muy buena, incluso mejor que la obtenida en el frame 080 del interferograma 6 y en la cual se obtuvo buena correlación con los datos GNSS. Por ejemplo, en el frame 080 del interferograma 7 (R-30% y pendiente<0) indica que a mayor valor TEC Radar, el valor de TEC GNSS disminuirá, mientras que esperamos que si el valor TEC Radar aumenta el valor TEC GNSS también aumente. La explicación de este comportamiento no esperado se podrá analizar teniendo en cuenta la actividad ionosférica del día y la configuración par día de los interferogramas. Lo analizaremos al final teniendo en cuenta todos los resultados.

### 10.3.4 Interferograma 11

#### *10.3.4.1 Frame 070*

No hay datos locales suficientes para desarrollar una correlación correcta

#### *10.3.4.2 Frame 080*

```
Call:
lm(formula = GRID_CODE ~ RASTERVALU, data = C144FBS080)
Residual standard error: 0.1555 on 408 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.2724, Adjusted R-squared:  0.2706
```

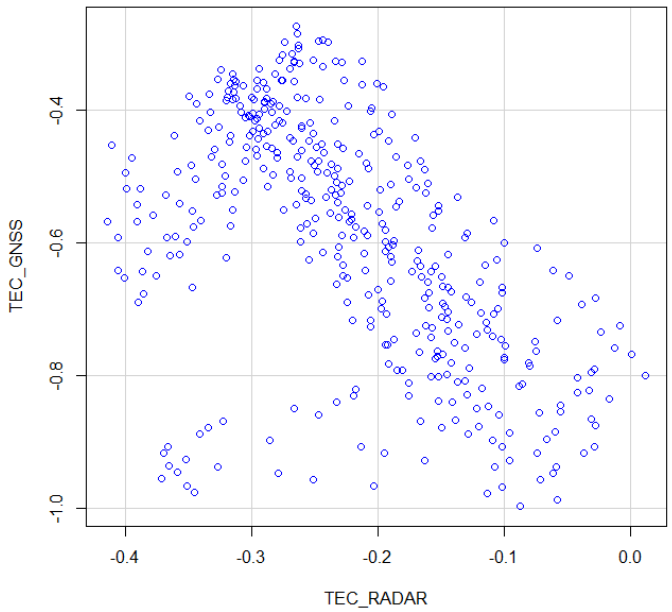



Figura 36. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 11, frame 080

**Análisis:** podemos observar en la gráfica correlación baja positiva, aunque la gráfica no muestra tendencia positiva o negativa, pero numéricamente lo podemos saber, en la cual el 27% de los datos TEC se relacionan entre sí, es decir el 27% de los TEC_RADAR son acordes con los datos TEC_GNSS.

#### *10.3.4.3 Frame 090*

```
Call:
lm(formula = GRID_CODE ~ RASTERVALU, data = C144FBS090)
Residual standard error: 0.2404 on 483 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.1702, Adjusted R-squared:  0.1685
```

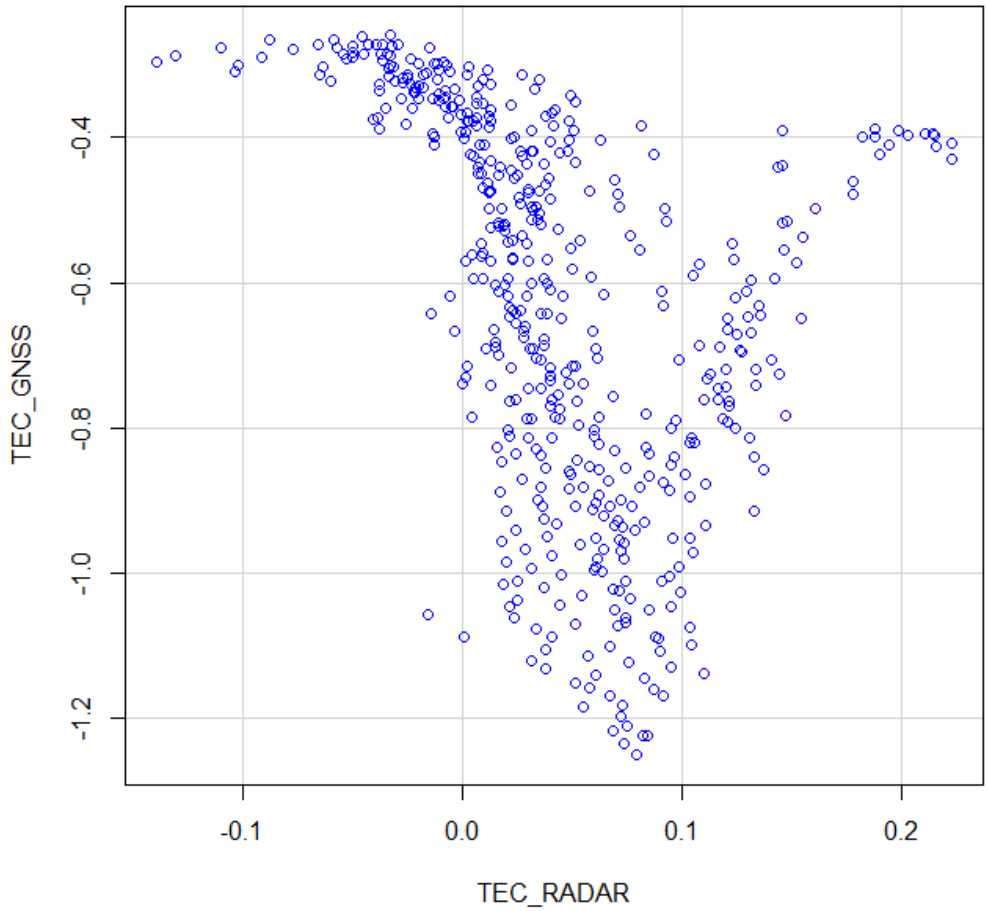



Figura 37. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 11, frame 090

**Análisis:** podemos observar en la gráfica una correlación baja positiva en la cual el 16% de los datos TEC se relacionan entre sí, es decir el 16% de los TEC_RADAR son acordes con los datos TEC_GNSS.

#### *10.3.4.4 Frame 100*

```
Call:
lm(formula = GRID_CODE ~ RASTERVALU, data = C144BFS100)
Residual standard error: 0.1092 on 481 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.3193, Adjusted R-squared:  0.3179
```

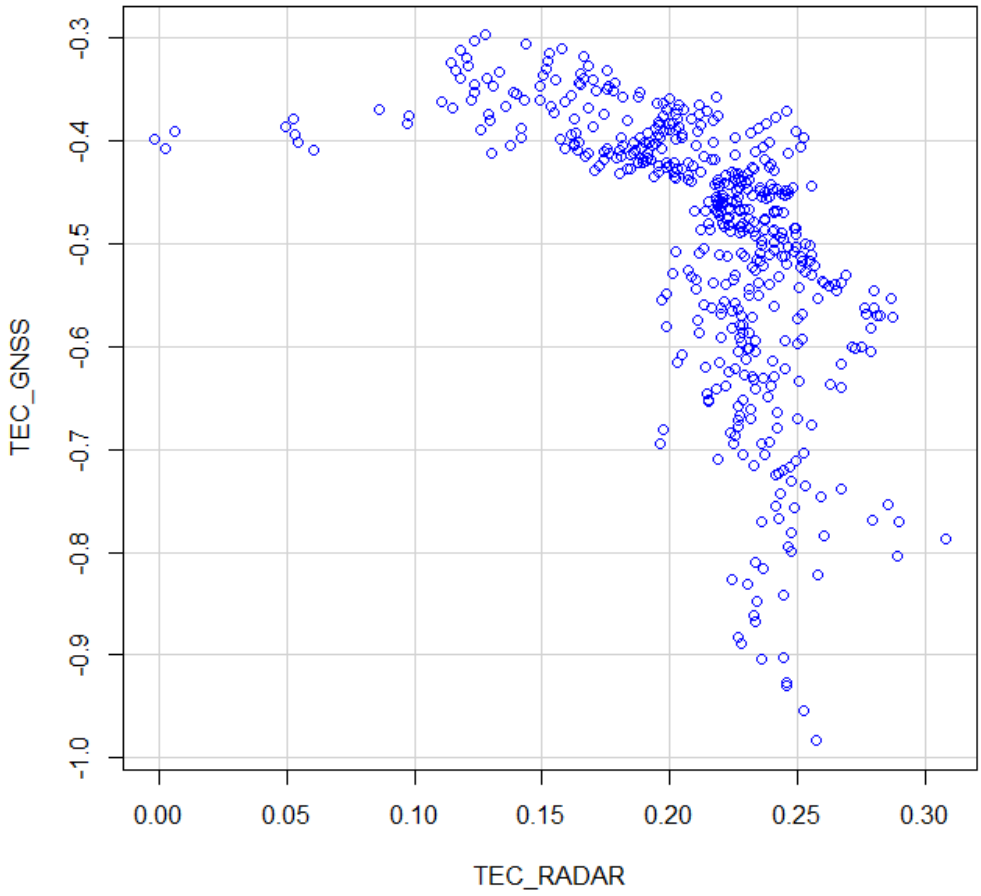



**Figura 38. Correlación Mapa GNSS y Mapa Radar TEC. Interferograma 11, frame 100**

**Análisis:** podemos observar en la gráfica una correlación media positiva en la cual el 31% de los datos TEC se relacionan entre sí, es decir el 31% de los TEC_RADAR son acordes con los datos TEC_GNSS.

Al igual que en el interferograma 7, teniendo en cuenta la coherencia alta de la zona en general y el ancho de banda más amplio del modo FBS, se esperaba obtener correlación alta. A continuación, se analizará al final el resultado teniendo en cuenta la actividad ionosférica del día y la configuración par día de los interferogramas.

### 10.3.5 Discusión

Para analizar porque los resultados obtenidos en los interferogramas 2, 7 y 11 no son lo que esperábamos, debemos tener en cuenta la actividad ionosférica de los pares días de los interferogramas según el análisis de la sección 9.4. El par-día del interferograma 6 (07-08-2007 y 09-05-2008) presenta la mayor correlación entre los datos TEC Radar y TEC GNSS en el frame 080, el día 07 de agosto fue un día relativamente tranquilo, mientras que el día 09 de mayo la actividad ionosférica fue alta, en el interferograma se observa claramente los efectos ionosféricos, y a pesar de que la división de la fase dispersiva fue adecuada en los frame 080 y 070, el desenvolvimiento en 070 no fue realizada adecuadamente.

En el par del interferograma 7 correspondientes a (09-05-2008 y 24-06-2008) la actividad ionosférica es media cada día y en el par del interferograma 2 (26-07-2009 y 10-09-2009) la actividad ionosférica es baja ambos días. Es decir los valores TEC en cada día son similares y por lo tanto se obtiene un valor TEC relativo cercano a 0. Finalmente, las gráficas de dispersión y la estadística R no indican una correlación entre los Datos Radar y Datos GNSS.

En la gráfica del interferograma 11 correspondiente al path FBS (13-03-2010 y 28-04-2010) la correlación es baja, sin embargo, ambos días tienen actividad ionosférica alta y muy similar, es decir que el TEC relativo es muy cercano a 0.

Los valores TEC relativos obtenidos mediante GNSS evidencian la actividad ionosférica que se presentaron en los días, en el interferograma 6 el TEC relativo calculado por GNSS está en un rango de 6 a 7 unidades, y en el interferograma 11 los TEC relativos GNSS y Radar son cercanos a 0, en ambos interferogramas se obtuvieron resultados esperados según la actividad ionosférica de los días. Por otro lado, los TEC GNSS relativos para los interferogramas 2 y 7 son muy cercanos a ceros, pero los datos TEC Radar son cercanos a 10 es decir se obtuvieron valores erróneos.

Cuando los valores TEC son similares entre los días, el TEC relativo es cercano a 0 o nulo, es decir que la señal que pasa a través de la ionósfera en este día presenta la misma afectación una con respecto a la otra, por tanto, al hacer el interferograma se cancelan las afectaciones, como se muestra en el interferograma en modo FBS. Los valores TEC de la ionosférica cercanos a 0 son despreciables (11.8 cm de desplazamiento por 0.47 unidades TEC de gradiente = 1 franja sobre el interferograma). La fase dispersiva calculada en estos casos por el software ISCE no se deben a la actividad ionosférica, ya que es despreciable y no es tan sensible para detectar variaciones menores a 0.47 unidades TEC, y por esta razón el interferograma en modo FBS, el retraso de señal se cancela y el software hay no tiene la sensibilidad para detectar las variaciones menores a 0.47 unidades TEC que se puedan presentar. Además, la ionósfera no es la única fuente dispersiva y en estos casos cuando la fase ionosférica es despreciable, los valores TEC calculados por ISCE se pueden confundir con otras fuentes dispersivas.

# 11 CONCLUSIONES

-A pesar de que el satélite ALOS/PALSAR toma las imágenes sobre Colombia a las 3-4 UT, 10-11 de la noche hora local, donde la ionosfera tiene un valor menor, se encontraron interferogramas afectados ionosféricamente en noches con valores de densidades altos, por lo tanto, es importante investigar la corrección ionosférica.

-Estimar la fase ionosférica en la zona de estudio represento un problema debido a la baja coherencia que se presentó en la mayoría de los interferogramas, debido a la vegetación sobre las zonas montañosa. Por lo tanto, se espera que aplicar el método a la misma zona de estudio con imágenes satelitales de banda C, los problemas de cálculo de interferogramas y de división de las fases sean mayores.

-En los pocos interferogramas que presentaron buena coherencia, se evidenciaron claramente las afectaciones ionosféricas cuando la diferencia TEC de un día con respecto al otro era mayor, por lo contrario, cuando los días presentaron comportamientos similares no se presentaron afectaciones evidentes.

-Aunque la ventaja de estudiar la ionosfera mediante imágenes de radar es obtener mejor detalle y resolución espacial con respecto a los métodos convencionales que necesitan interpolación de datos, aun se debe trabajar en filtros y suavizados que permitan reducir el ruido y realizar correcciones a la estimación de la fase dispersiva inducidas por la coherencia baja.

-Las desventajas de calcular mapas TEC mediante imágenes de radar son la resolución temporal, ya que no se dispone de imágenes en diferentes momentos y a cualquier hora. Y teniendo en cuenta que en las plataformas de descarga de datos ALOS se encuentran poca cantidad de imágenes en formatos similares para su correcto procesamiento. Sin embargo, el desarrollo de

diferentes plataformas satelitales permitirá en un futuro estudiar la ionosfera con sistemas satelitales diferentes y en varias bandas.

-Entre mayor sea la diferencia TEC entre los dos días del interferograma, el método Split-spectrum dividirá la fase mejor, sin embargo, cuando la diferencia TEC es cercana a cero, el método no puede calcular la fase ionosférica, sino que calcula otras fuentes dispersivas. Ya que el satélite ALOS-PALSAR calcula valores TEC con una sensibilidad de 0.47 unidades TEC, por esta razón cuando los TEC relativos son cercanos a 0, la ionósfera no puede ser calculado con buen nivel de detalle.

-Realizar la interpolación de los mapas TEC mediante estaciones GNSS requieren un análisis más riguroso de los datos disponibles, para escoger el modelo de interpolación que más se ajuste a los datos con el fin de mejorar la estimación.

- La correlación realizada y los análisis de los índices magnéticos e ionosféricos nos muestran que en los interferogramas se puede obtener información del comportamiento de la ionosfera relativa de los días, sin embargo, los resultados obtenidos no nos aseguran que el método pueda calcular con exactitud y precisión los valores TEC, ya que esto todavía se tiene que seguir evaluando y mejorando, así como evaluar los interferogramas corregidos por ionosfera.

-Si no se tienen las condiciones adecuadas como explicamos anteriormente, y estamos en un sector que no cuenta con estaciones geodésicas para llevar dichos estudios ionosféricos, o sitios de difícil acceso, podemos aplicar el método Split Spectrum teniendo una aproximación acerca del estado de la ionósfera.

# 12 DISCUSIÓN

-En el presente proyecto se procesaron los interferogramas con las configuraciones y filtros por defecto, se sugiere aplicar diferentes métodos y configuraciones al interferograma 6 que presento buenos resultados en este trabajo con el fin de mejorar las estimaciones.

-Aunque el Modo FBS del satélite ALOS PALSAR presenta un amplio ancho de banda, y por lo tanto proporciona una mejor estimación de la ionósfera, en este proyecto no se pudo analizar adecuadamente este método, ya que fueron combinados días con actividad ionosférica similar. Se sugiere estudiar estas imágenes en combinación con días en actividad tranquila.

-Se sugiere realizar la corrección por baja coherencia aplicada por (Gomba, Estimation and Compensation of Ionospheric Propagation, 2016), es su trabajo de grado, para mejorar la estimación ionosférica.

-Se sugiere desarrollar este tipo de estudios con banda C y X, para desarrollar la estimación con diferentes bandas de satélite. Para mejorar los resultados se debe asegurar alta coherencia en sitios de estudios como desierto, o donde la señal recibida por el radar no tenga problemas con la vegetación.

-Se sugiere en los próximos estudios sobre el método Split Spectrum hacer la exclusión de datos atípicos para observar si el método funciona de mejor manera, En nuestro proyecto no se pudo sacar una conclusión acerca de los datos atípicos, ya que no se tiene una gran muestra de estudio (8 pares días), además que en el estudio experimental que hicimos (anexo D) se observó que no era necesario excluir los datos atípicos ya que la mejora del método no era significativa.

-Se sugiere seguir realizar estudios en banda L, en áreas donde la coherencia puede ser aún mayor (sitios de poca vegetación) para observar una mejor sensibilidad del método y ver cómo estos afectan a los resultados.

# ANEXOS

## A. ALOS PALSAR

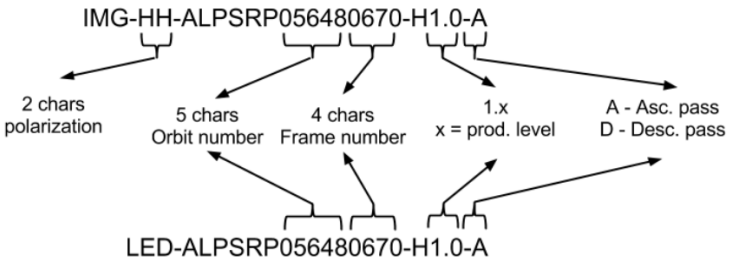



Figura 39. Convención de nombres de archivos estandarizados ALOS PALSAR.

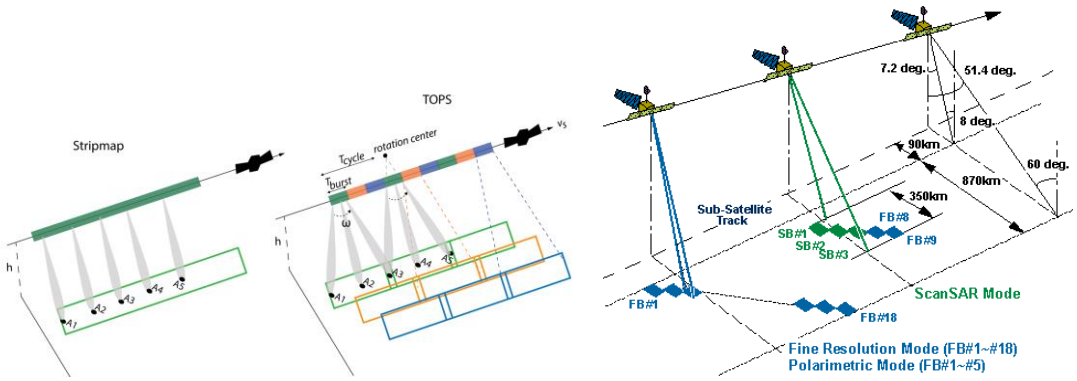



Figura 40. Geometría de modos ALOS PALSAR (GITHUB)

Tabla 9. Parámetros del satélite ALOS-2. Tomado de GOMBA

| Parámetros | L-Band |
|---|---|
| Frecuencia portadora | 1.27 GHz |
| FM rate | -565 Hz/s |
| Velocidad del satélite | 7650 m/s |
| Altura del satélite | 630 km |
| Ángulo de incidencia (rango cercano) | 37° |
| Ángulo de incidencia (rango lejano) | 41° |

**PALSAR Characteristic**

| Mode | Fine | | ScanSAR | Polarimetric (Experimental mode)*1 |
|---|---|---|---|---|
| Center Frequency | 1270 MHz(L-band) | | | |
| Chirp Bandwidth | 28MHz | 14MHz | 14MHz,28MHz | 14MHz |
| Polarization | HH or VV | HH+HV or VV+VH | HH or VV | HH+HV+VH+VV |
| Incident angle | 8 to 60deg. | 8 to 60deg. | 18 to 43deg. | 8 to 30deg. |
| Range Resolution | 7 to 44m | 14 to 88m | 100m (multi look) | 24 to 89m |
| Observation Swath | 40 to 70km | 40 to 70km | 250 to 350km | 20 to 65km |
| Bit Length | 5 bits | 5 bits | 5 bits | 3 or 5bits |
| Data rate | 240Mbps | 240Mbps | 120Mbps,240Mbps | 240Mbps |
| NE sigma zero *2 | < -23dB (Swath Width 70km)<br>< -25dB (Swath Width 60km) | | < -25dB | < -29dB |
| S/A *2,*3 | > 16dB (Swath Width 70km)<br>> 21dB (Swath Width 60km) | | > 21dB | > 19dB |
| Radiometric accuracy | scene: 1dB / orbit: 1.5 dB | | | |

Figura 41. Características Alos PALSAR

## B. ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS

Disturbios geomagnéticos pueden ser monitoreados por observatorios magnéticos en tierra grabando los tres componentes el campo magnético. El índice kp es obtenido como una media del nivel de disturbio en los dos componentes horizontales del campo, observado en 13 estaciones subaurorales (Postdam). El índice k es un índice cuasi-logarítmico medido en intervalos de 3 horas. El índice es expresado en una escala de tercios (28 valores).

**NOAA Space Weather Scales**

| Category | | Effect | Physical measure | Average Frequency (1 cycle = 11 years) |
|---|---|---|---|---|
| Scale | Descriptor | Duration of event will influence severity of effects | | |
| **Geomagnetic Storms** | | | Kp values* determined every 3 hours | Number of storm events when Kp level was met; (number of storm days) |
| G 5 | Extreme | Power systems: widespread voltage control problems and protective system problems can occur, some grid systems may experience complete collapse or blackouts. Transformers may experience damage. Spacecraft operations: may experience extensive surface charging, problems with orientation, uplink/downlink and tracking satellites. Other systems: pipeline currents can reach hundreds of amps, HF (high frequency) radio propagation may be impossible in many areas for one to two days, satellite navigation may be degraded for days, low-frequency radio navigation can be out for hours, and aurora has been seen as low as Florida and southern Texas (typically 40° geomagnetic lat.).** | Kp=9 | 4 per cycle (4 days per cycle) |
| G 4 | Severe | Power systems: possible widespread voltage control problems and some protective systems will mistakenly trip out key assets from the grid. Spacecraft operations: may experience surface charging and tracking problems, corrections may be needed for orientation problems. Other systems: induced pipeline currents affect preventive measures, HF radio propagation sporadic, satellite navigation degraded for hours, low-frequency radio navigation disrupted, and aurora has been seen as low as Alabama and northern California (typically 45° geomagnetic lat.).** | Kp=8 | 100 per cycle (60 days per cycle) |
| G 3 | Strong | Power systems: voltage corrections may be required, false alarms triggered on some protection devices. Spacecraft operations: surface charging may occur on satellite components, drag may increase on low-Earth-orbit satellites, and corrections may be needed for orientation problems. Other systems: intermittent satellite navigation and low-frequency radio navigation problems may occur, HF radio may be intermittent, and aurora has been seen as low as Illinois and Oregon (typically 50° geomagnetic lat.).** | Kp=7 | 200 per cycle (130 days per cycle) |
| G 2 | Moderate | Power systems: high-latitude power systems may experience voltage alarms, long-duration storms may cause transformer damage. Spacecraft operations: corrective actions to orientation may be required by ground control; possible changes in drag affect orbit predictions. Other systems: HF radio propagation can fade at higher latitudes, and aurora has been seen as low as New York and Idaho (typically 55° geomagnetic lat.).** | Kp=6 | 600 per cycle (360 days per cycle) |
| G 1 | Minor | Power systems: weak power grid fluctuations can occur. Spacecraft operations: minor impact on satellite operations possible. Other systems: migratory animals are affected at this and higher levels; aurora is commonly visible at high latitudes (northern Michigan and Maine).** | Kp=5 | 1700 per cycle (900 days per cycle) |

**Figura 42. Escalas de tormentas Geomágneticas. (NOAA)**

Para obtener una escala lineal ap , la siguiente tabla presenta la relación con Kp

| Kp | 0o | 0+ | 1- | 1o | 1+ | 2- | 2o | 2+ | 3- | 3o | 3+ | 4- | 4o | 4+ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ap | 0 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 9 | 12 | 15 | 18 | 22 | 27 | 32 |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| Kp | 5- | 5o | 5+ | 6- | 6o | 6+ | 7- | 7o | 7+ | 8- | 8o | 8+ | 9- | 9o |
| ap | 39 | 58 | 56 | 67 | 80 | 94 | 111 | 132 | 154 | 179 | 207 | 236 | 300 | 400 |

El índice Ap es obtenido promediando los 8 valores ap del día.

El índice Cp es estimado para saber el nivel de actividad geomagnética del día sumando los 8 valores. donde 0 (quieto) y 2.5 (Perturbado)

| sum *ap* | *Cp* | sum *ap* | *Cp* | sum *ap* | *Cp* |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 ... 22 | 0.0 | 121 ... 139 | 0.9 | 562 ... 729 | 1.8 |
| 23 ... 34 | 0.1 | 140 ... 164 | 1.0 | 730 ... 1119 | 1.9 |
| 35 ... 44 | 0.2 | 165 ... 190 | 1.1 | 1120 ... 1399 | 2.0 |
| 45 ... 55 | 0.3 | 191 ... 228 | 1.2 | 1400 ... 1699 | 2.1 |
| 56 ... 66 | 0.4 | 229 ... 273 | 1.3 | 1700 ... 1999 | 2.2 |
| 67 ... 78 | 0.5 | 274 ... 320 | 1.4 | 2000 ... 2399 | 2.3 |
| 79 ... 90 | 0.6 | 321 ... 379 | 1.5 | 2400 ... 3199 | 2.4 |
| 91 ... 104 | 0.7 | 380 ... 453 | 1.6 | 3200 | 2.5 |
| 105 ... 120 | 0.8 | 454 ... 561 | 1.7 | | |

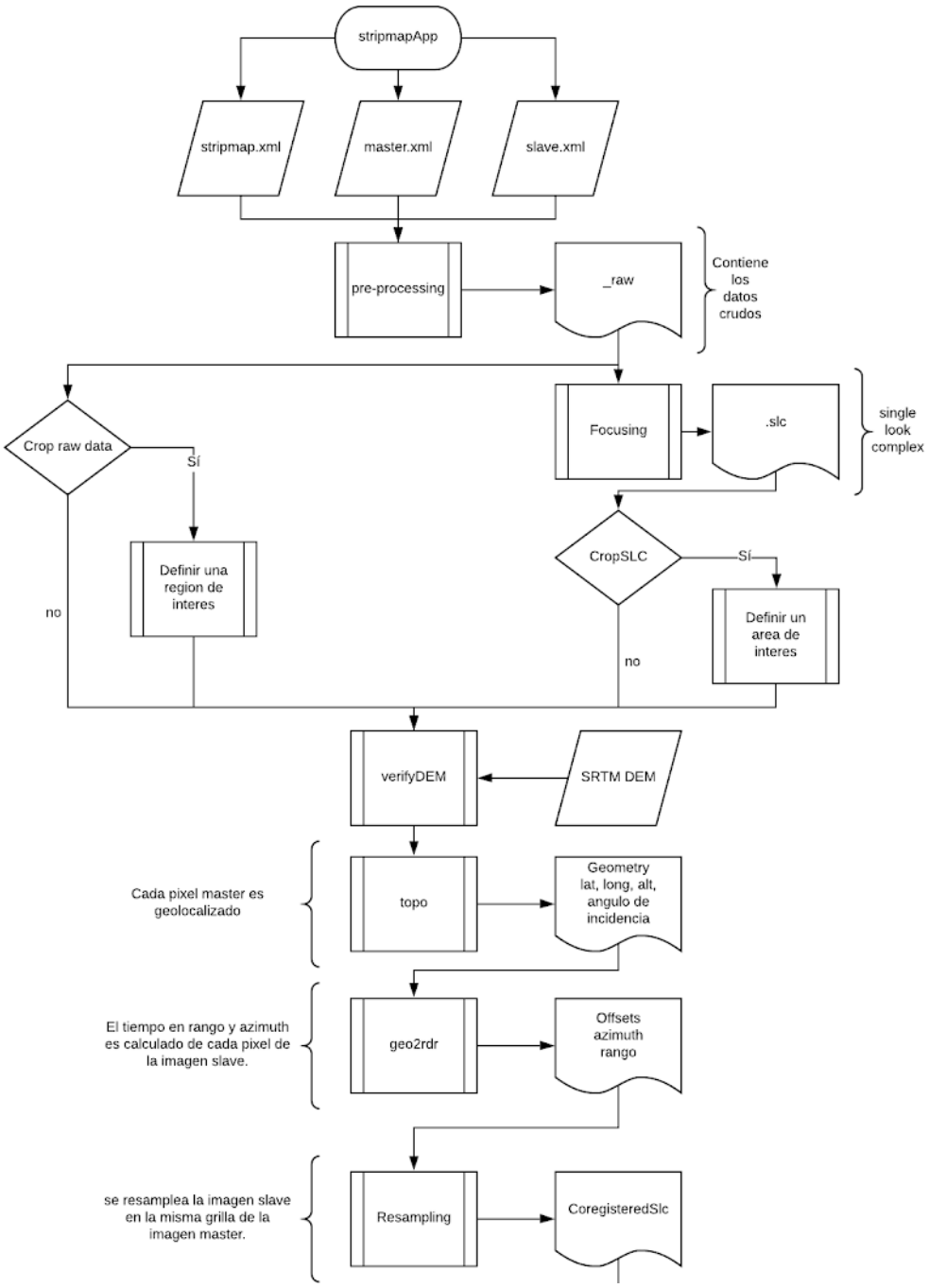
**Figura 43. Relación de Conversión índice Cp (Postdam).**

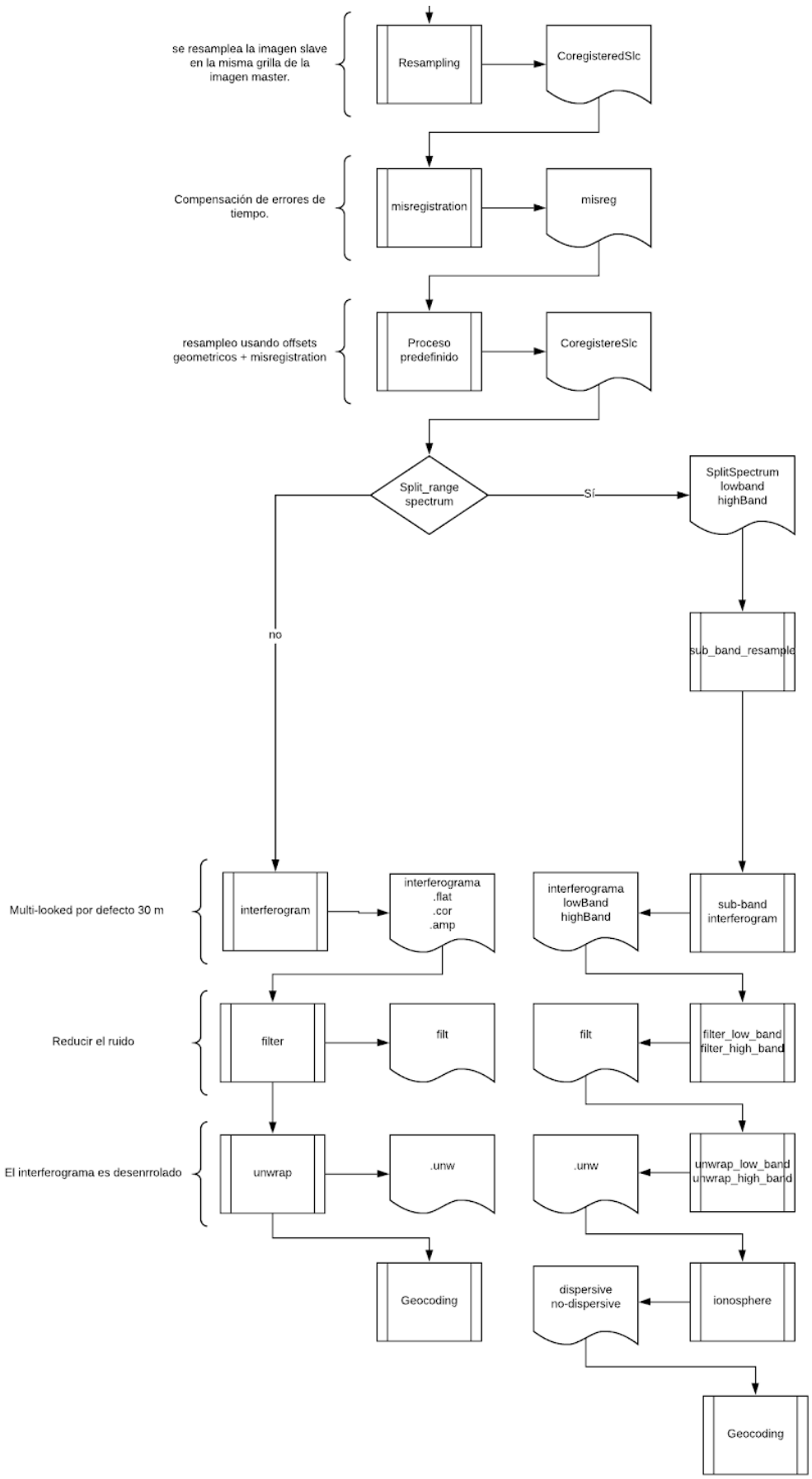
| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *Cp* | 0.0-0.1 | 0.2-0.3 | 0.4-0.5 | 0.6-0.7 | 0.8-0.9 |
| *C9* | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| *Cp* | 1.0-1.1 | 1.2-1.4 | 1.5-1.8 | 1.9 | 2.0-2.5 |
| *C9* | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |

**Figura 44. Relación de conversión índice C9 (Potsdam).**

El índice F10.7- medida del nivel de ruido generado por el sol a una longitud de 10.7 cm.

## C. FLUJO DE TRABAJO STRIPMAP.PY




se resamplea la imagen slave en la misma grilla de la imagen master.
Resampling
CoregisteredSlc
Compensación de errores de tiempo.
misregistration
misreg
resampleo usando offsets geometricos + misregistration
Proceso predefinido
CoregistereSlc
Split_range spectrum
SI
SplitSpectrum lowband highBand
no
sub_band_resample
Multi-looked por defecto 30 m
interferogram
interferograma .flat .cor .amp
interferograma lowBand highBand
sub-band interferogram
Reducir el ruido
filter
filt
filt
filter_low_band filter_high_band
El interferograma es desenrrolado
unwrap
.unw
.unw
unwrap_low_band unwrap_high_band
Geocoding
dispersive no-dispersive
ionosphere
Geocoding

## D. BITACORA PROCESAMIENTO GNSS

Para este procesamiento de datos GNSS primero se tuvo en cuenta los datos ionosféricos que se obtuvieron a partir del método Split-Spectrum. Ya obteniendo el resultado de los datos ionosféricos a partir del método de radar anteriormente nombrado, se procedió a enviar una solicitud formal al IGAC al siguiente correo magnaeco@igac.gov.co , donde se obtuvo los datos respectivos de la red magna eco acordes a nuestro proyecto de grado.

Luego de obtener los datos rinex, se procesaron en el software GPS_TEC desarrollado por Dr. Gopi Krishna Seemala en el cual se obtuvo el VTEC promedio de cada estación para los días de nuestro estudio.

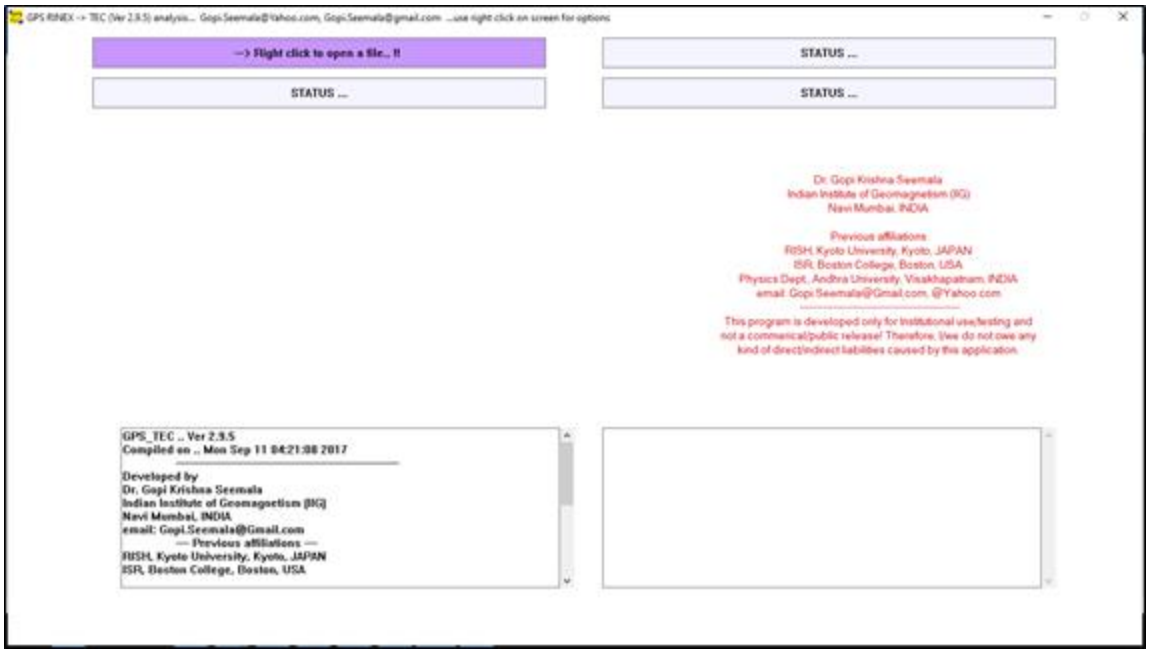



Figura 45. Interfaz GPS_TEC

En nuestro proyecto se recogió datos de 28 estaciones en total de la red Magna Eco que visualizaremos en el siguiente mapa:

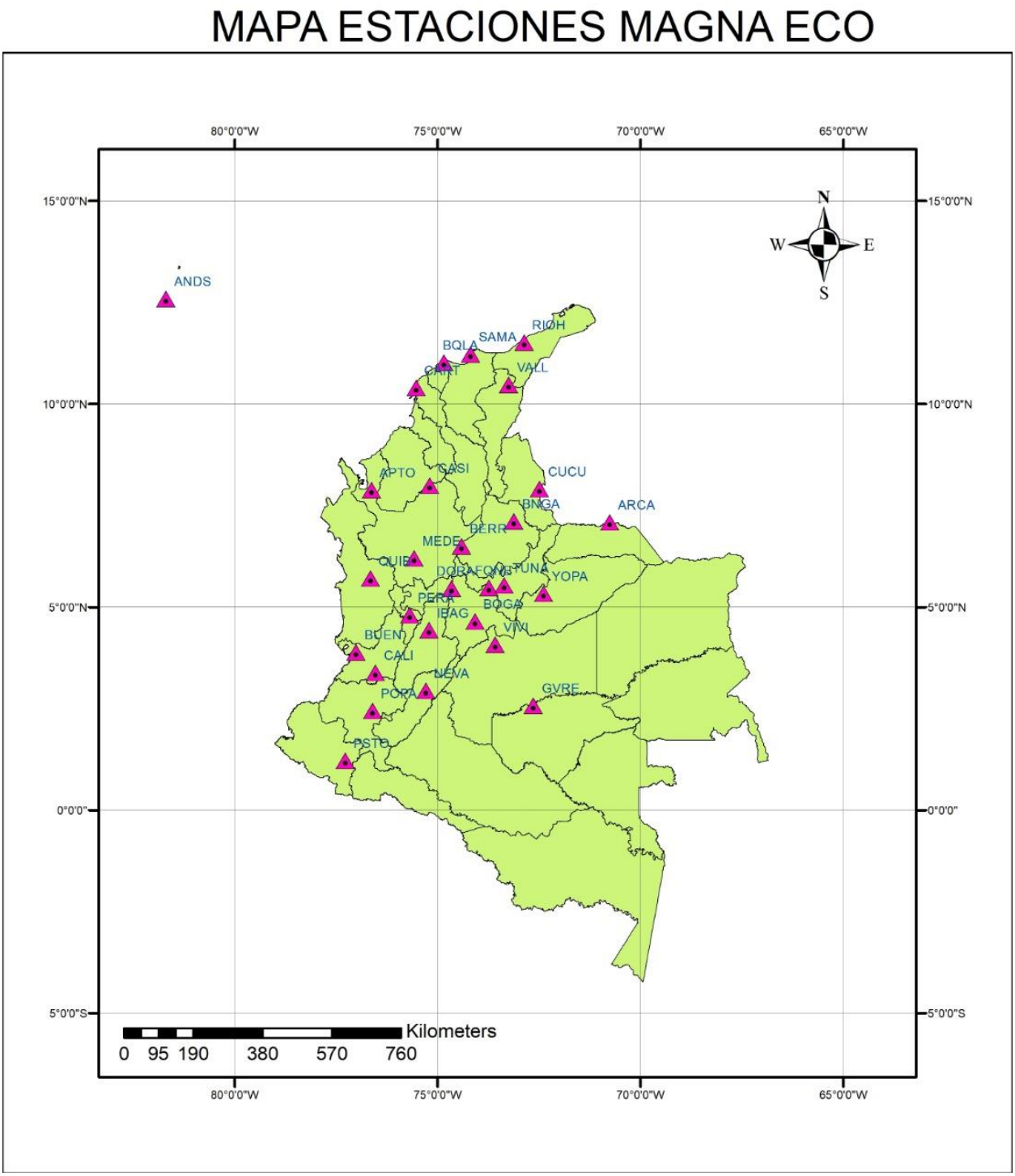



**Figura 46. Red de estaciones MAGNA ECO**

Las estaciones geodésicas que identificamos en el mapa son :(BOGA, TUNA, VIVI, YOPA, ANDS, BERR, BUEN, CALI, CUCU, DORA, NEVA, RIOH, SAMA, VALL, APTO, BQLA, CART, GUAV, IBAG, PERA, CASI, PSTO, POPA, FQNE, ARCA, MEDE, QUIB, BNGA)

Las estaciones que nos arrojaron datos GNSS para las fechas en la cual hicimos el estudio fueron las siguientes:

- **07-08-2007 Y 05-09-2008**

**Día 1:** 07-08-2007

**Estaciones utilizadas:** BOGA, TUNA, VIVI, YOPA, ANDS, BERR, BUEN, CALI, CUCU, DORA, NEVA, POPA, RIOH, SAMA Y VALL**.**

**Total:**15

**Día 2:** 05-09-2008

**Estaciones utilizadas:** BOGA, FQNE, TUNA, VIVI, YOPA, APTO, BUEN, CART, CUCU, GUAV, IBAG NEVA, PERA, PSTO, RIOH, SAMA Y VALL**.**

**Total:**17

**Total de estaciones utilizadas en ambos días:**19

- **09-05-2008 Y 24-06-2008**

**Día 1:** 09-05-2008

**Estaciones utilizadas:** BOGA, FQNE, TUNA, VIVI, YOPA, APTO, BUEN, CART, CUCU, GUAV, IBAG NEVA, PERA, PSTO, RIOH, SAMA Y VALL**.**

**Total:** 17

**Día 2:** 24-06-2008

**Estaciones utilizadas:** BOGA, TUNA, VIVI, ANDS, APTO, BERR, BQLA, BUEN, CALI, CART CUCU, GUAV, NEVA, PERA, POPA, PSTO, QUIB, SAMA, VALL.

**Total:** 19

**Total de estaciones utilizadas en ambos días:** 23

· **13-03-2010 Y 28-04-2010**

**Día 1:** 13-03-2010

**Estaciones utilizadas:** BOGA, DORA, FQNE VIVI, ARCA, BUEN, CUCU, MEDE, PERA, PSTO, SAMA.

**Total:** 12

**Día 2:** 28-04-2010

**Estaciones utilizadas:** BOGA, FQNE, TUNA, ARCA, BNGA, BUEN, CALI, CASI, CUCU, MEDE, PSTO, SAMA.

**Total:** 13

**Total, de estaciones utilizadas en ambos días:** 17

· **26-07-2009 Y 10-09-2009**

**Día 1:** 26-07-2009

**Estaciones utilizadas:** BOGA, TUNA, VIVI, APTO, BERR, CALI, NEIVA, PERA, POPA, PSTO, SAMA, VALL.

**Total:** 12

**Día 2:** 10-09-2009

**Estaciones utilizadas: BOGA, FQNE, TUNA, VIVI, APTO, BUEN, CASI, CUCU, PERA, PSTO, POPA, VALL.**

**Total:** 12

**Total, de estaciones utilizadas en ambos días:** 16

- Interpolación:

Luego de tener la información de los diferenciales ionosféricos (ΔTEC) de cada estación en un mismo día se procedió hacer una interpolación por el método de vecino más cercano de estos puntos para cada fecha, estos procedimientos se realizaron en el software Arcgis. A continuación, se mostrará la interpolación que se desarrolló de los días 26-07-2009 y 10 09-2009.

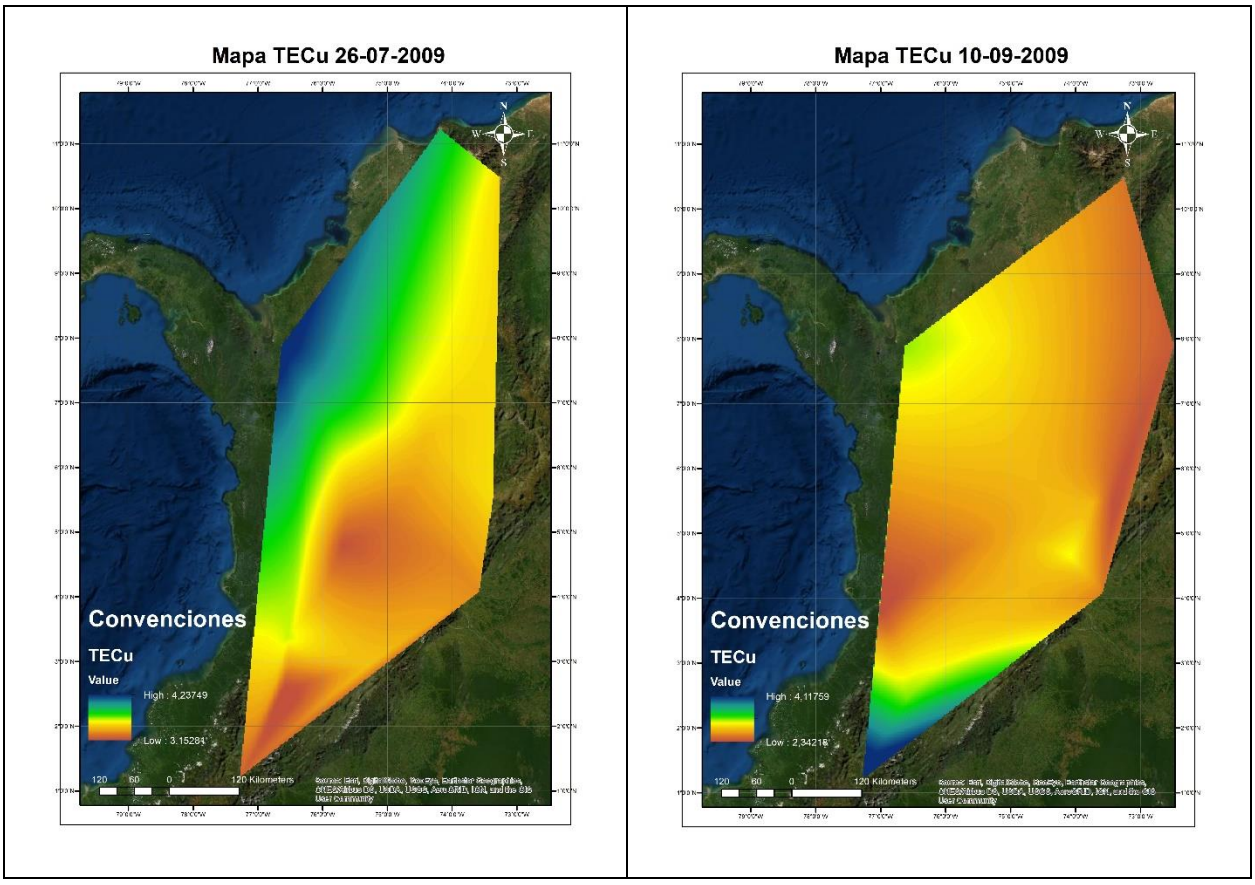



Figura 47. Mapas TEC.

- Diferenciales ionosféricos Locales con datos GNSS

Después se procede a restar la información de un día con respecto al otro, siendo el día más actual el que se le resta al día más antiguo, obteniendo así nuestro diferencial ionosférico (ΔTEC) de esos días a gran escala.

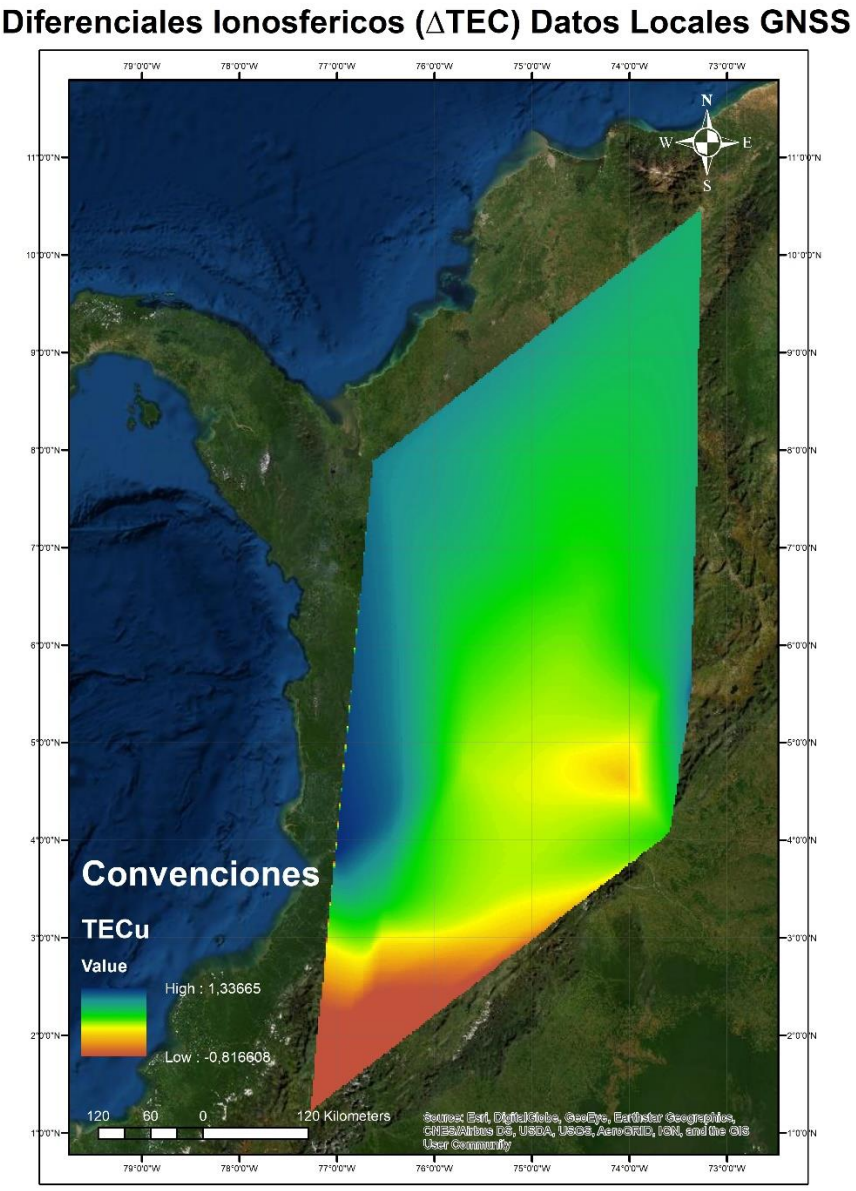



**Figura 48. Mapa diferencias TEC entre el 26 de julio de 2010 y el 10 de septiembre de 2009**

Entonces al tener el Diferencial ionosférico (ΔTEC) se procede hacer un recorte de la misma zona donde obtuvimos los diferenciales ionosféricos (ΔTEC) del método Split spectrum para poder hacer la comparación de ambos métodos.

Ya obteniendo la misma zona a comparar lo que se procede hacer es una extracción de los puntos del método Split Spectrum a la capa de los Puntos hallados con el método GNSS ya que la capa de obtenida por el método de radar es más densa que la capa obtenida por el método geodésico, así tendremos la misma cantidad de puntos para hacer una correlación directa entre ambos métodos con sus valores numéricos.

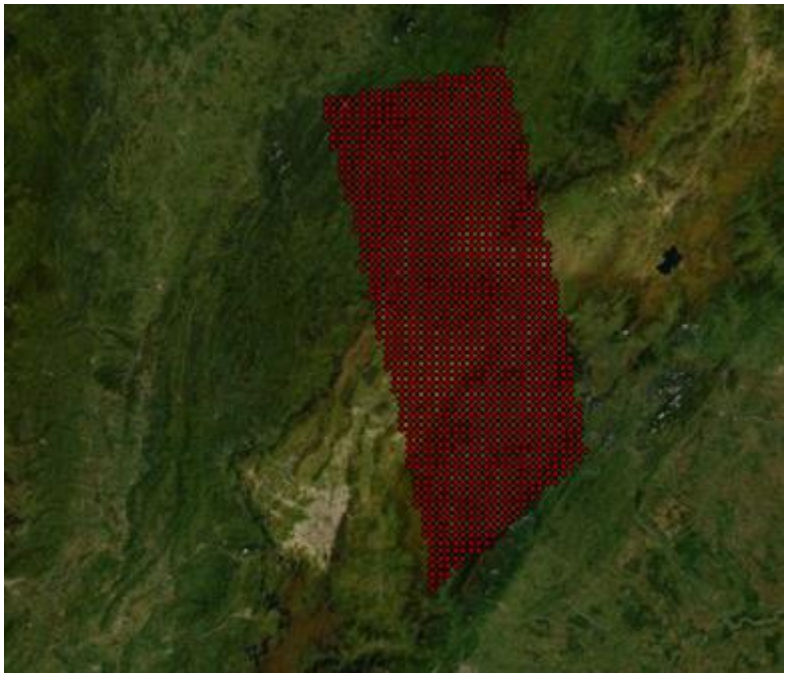


**Figura 49. Puntos de extracción del mapa GNSS TEC y mapa RADAR TEC para la correlacion (Fechas:13-03-2010 Y 28-04-2010)**

Luego se procede hacer la correlación de los datos ΔTEC en el software “R” con nuestra tabla de datos que se obtuvo.

| POINTID | TEC_GNSS | TEC_RADAR |
|---|---|---|
| 464 | 6,56926346 | 12,0747623 |
| 465 | 6,59382772 | 12,2222309 |
| 466 | 6,61788988 | 12,3324642 |
| 467 | 6,64002848 | 12,3991613 |
| 468 | 6,660501 | 12,4286175 |
| 469 | 6,68025875 | 12,5247717 |
| 470 | 6,69950819 | 12,5885944 |
| 471 | 6,71852255 | 12,6443844 |
| 472 | 6,73767805 | 12,7039957 |
| 476 | 6,42496109 | 11,4862585 |
| 477 | 6,45052242 | 11,7057552 |
| 478 | 6,47551775 | 11,7637577 |
| 479 | 6,49981213 | 11,8115301 |
| 480 | 6,52131224 | 11,8862848 |
| 481 | 6,54541349 | 12,0588188 |
| 482 | 6,56935167 | 12,1947479 |

**Figura 50. Ejemplo de Datos de muestra**

En cual procedemos a desarrollar las correlaciones y analizar las gráficas de las misma entre estos dos métodos practicados en este proyecto.

**FECHA: 13-03-2010 Y 28-04-2010**

- **144-FBS-080**

```
Residual standard error: 0.1555 on 408 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.2724, Adjusted R-squared:  0.2706
```

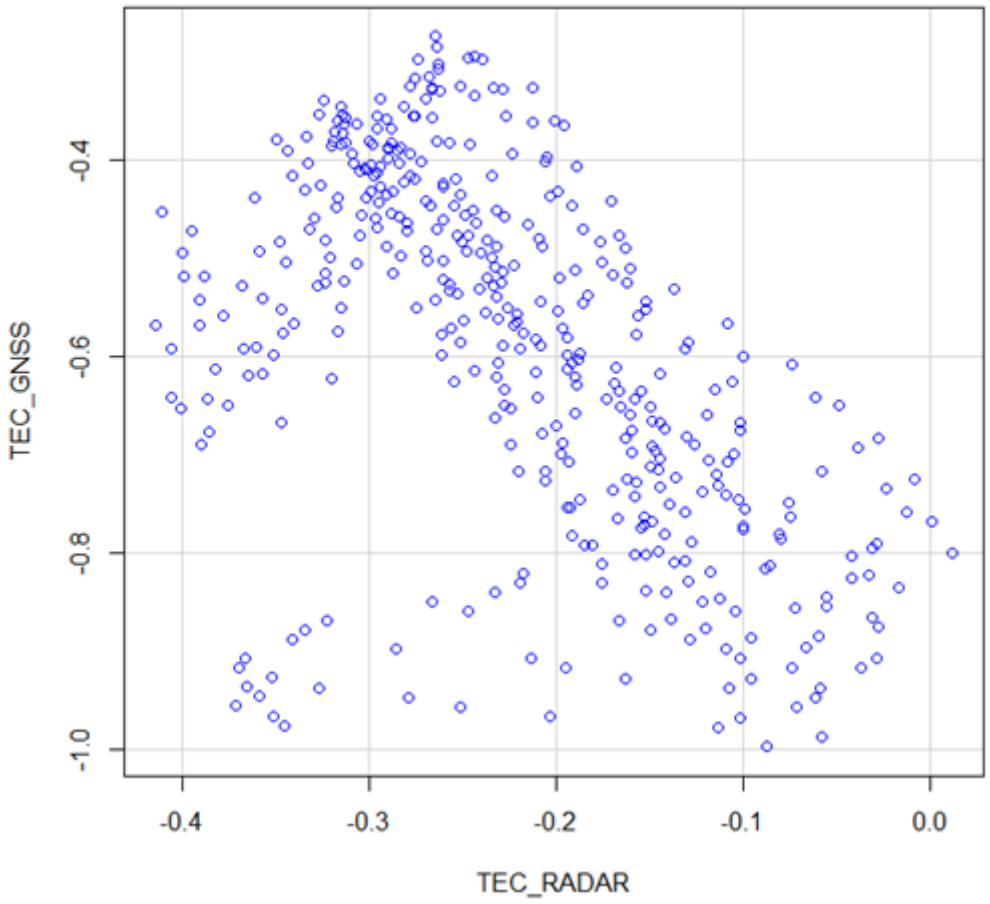



Figura 51. Ejemplo de correlación.

Este es el tipo de resultados que se obtiene luego de realizar la correlación directa entre ambos métodos. Así se realizó el proceso para obtener los diferenciales ionosféricos (ΔTEC) de tres pares de fechas más y poder desarrollar así la respectiva comparación del método por GNSS y el método Split-Spectrum.

## Correlaciones sin datos Atípicos

### Interferograma 6: 07-08-2007 Y 05-09-2008

- Frame 070

```
Call:
lm(formula = GRID_CODE ~ RASTERVALU, data = c450570)
```

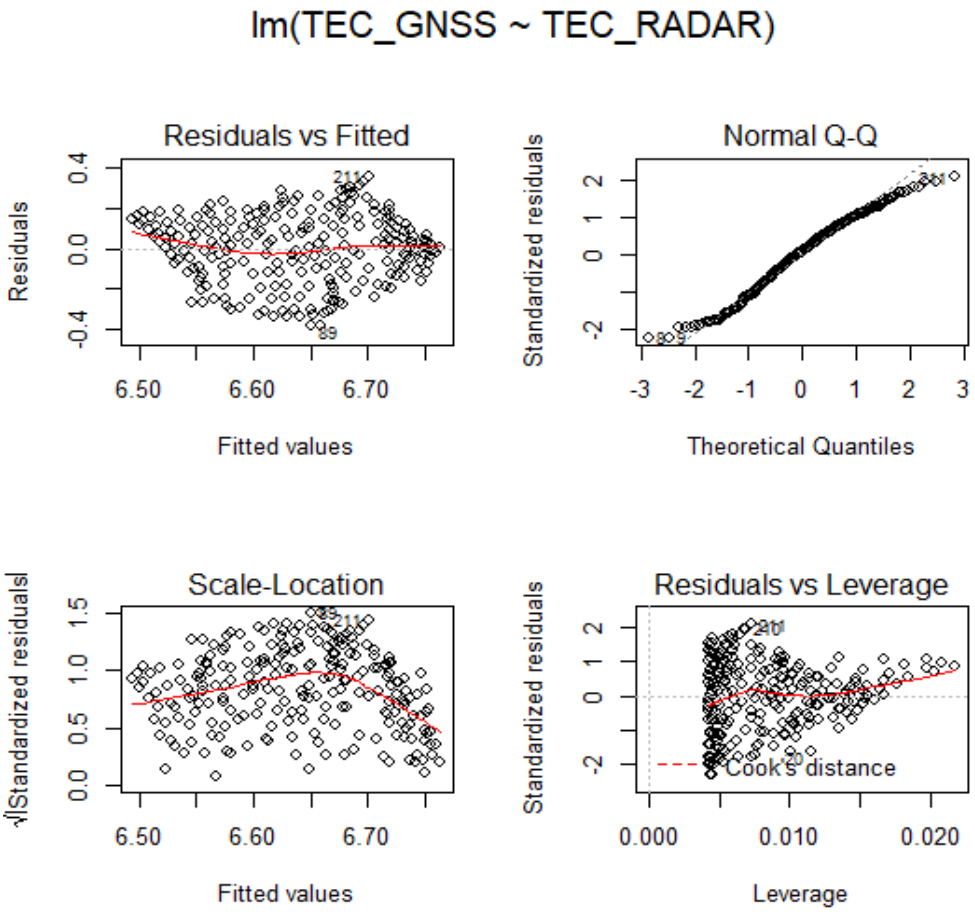



Figura 52. Gráfica de residuales interferograma 6, frame 070.

En el gráfico de Residuals vs Fitted podemos observar que la mayoría de los residuales se encuentran entre -0.4 y 0.4, también podemos visualizar un residual muy alto, y dos residual muy bajos que podríamos afirmar que son atípicos, estos serían los datos (211, 9,8). En el gráfico Normal Q-Q se puede analizar que la gran mayoría de los datos se encuentran cerca de una distribución normal a excepción de los datos (211,9 ,8) que están alejados de esta.

Para el grafico Scale –Location se puede analizar que la mayoría de los residuales estandarizados elevados a un medio se encuentran entre valores de 0 a 1.5, además observamos algunos datos extremos (211, 9,8). Cuando observamos el grafico Residual vs Leverage una aglomeración de residuos estandarizados se encuentran muy cerca al valor cero, con esto podemos afirmar que existen 3 datos atípicos de la agrupación de los residuos y alejados de este valor, estos valores son (211, 210,20).

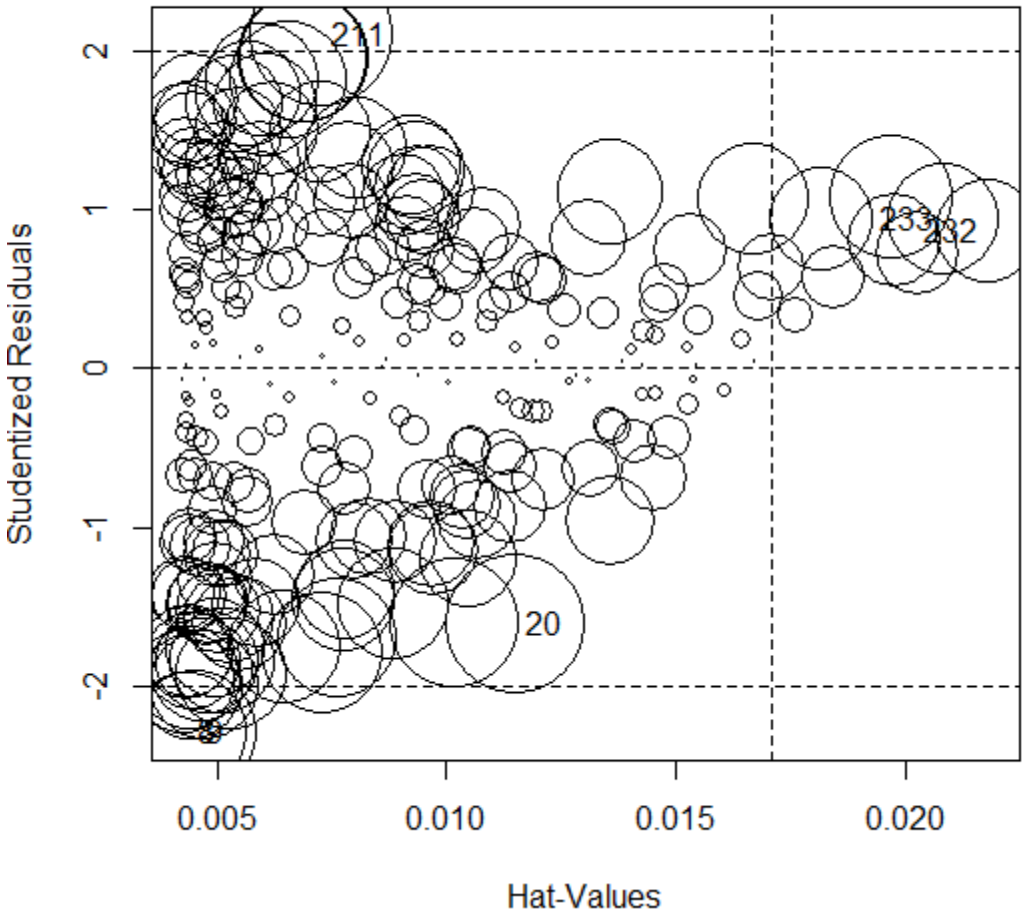



Figura 53. Gráfico Hat Values

El anterior grafico nos arroja valores fuera del rango (-2,2) para los residuales estandarizados, los cuales son atípicos dentro de los residuales, y valores con hat-values demasiado altos que también podemos afirmar que son atípicos. Estos datos seria (233, 232, 211, 8,9)

Para finalizar, procedemos aplicar el test de Bonferroni el cual indica que valores en total son atípicos y estos se eliminaran de la muestra. Este test se realizó para muestra anterior.

```
No Studentized residuals with Bonferroni p < 0.05
Largest |rstudent|:
   rstudent unadjusted p-value Bonferroni p
8 -2.290741           0.02288           NA
```

El dato 8, será eliminando de nuestra muestra y nuevamente desarrollaremos la correlación para observar si existe una mejora significativa en nuestra correlación.

```
Residual standard error: 0.1701 on 231 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.1536, Adjusted R-squared:  0.1499
```

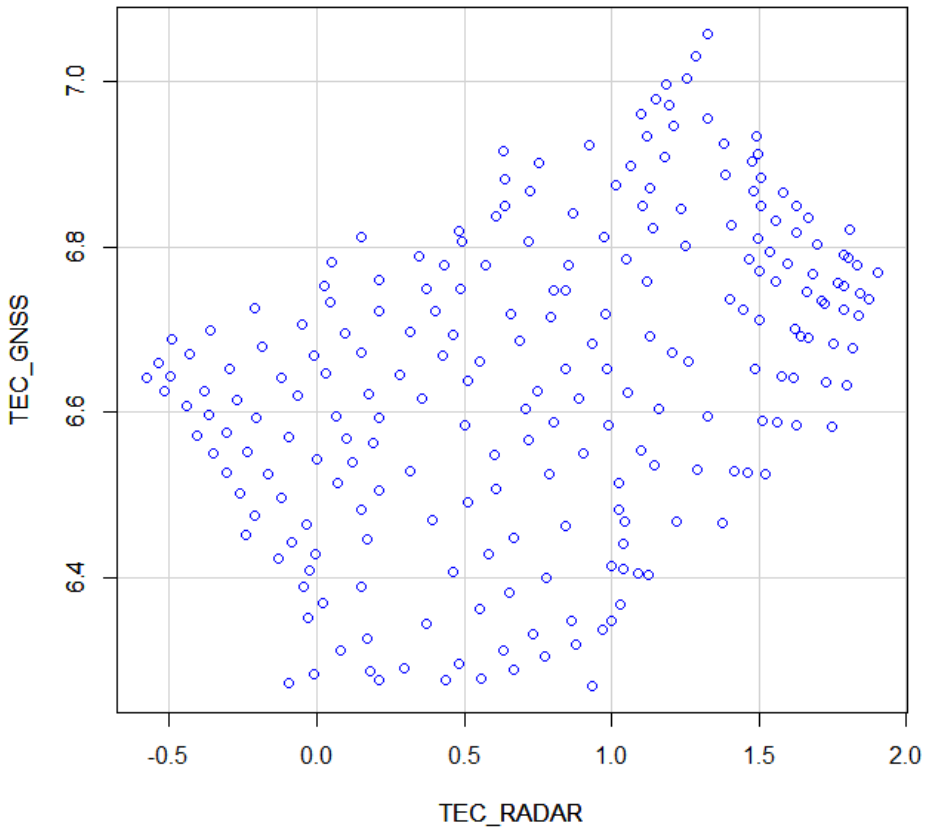



Figura 54. Correlación sin datos atípicos interferograma 6, frame 070.

**Análisis:** cómo podemos observar la mejora de la muestra con la extracción de los atípicos fue mínima ya que la muestra con atípicos muestra una correlación de 14.63% mientras que la muestra sin atípicos muestra una correlación del 15%. Para este caso no sería pertinente los datos atípicos, porque pueden ser representativos para la muestra además que cuando se quitan no muestran una mejora significativa.

- Frame 080

```
Call:
lm(formula = GRID_CODE ~ RASTERVALU, data = C1450508)
```

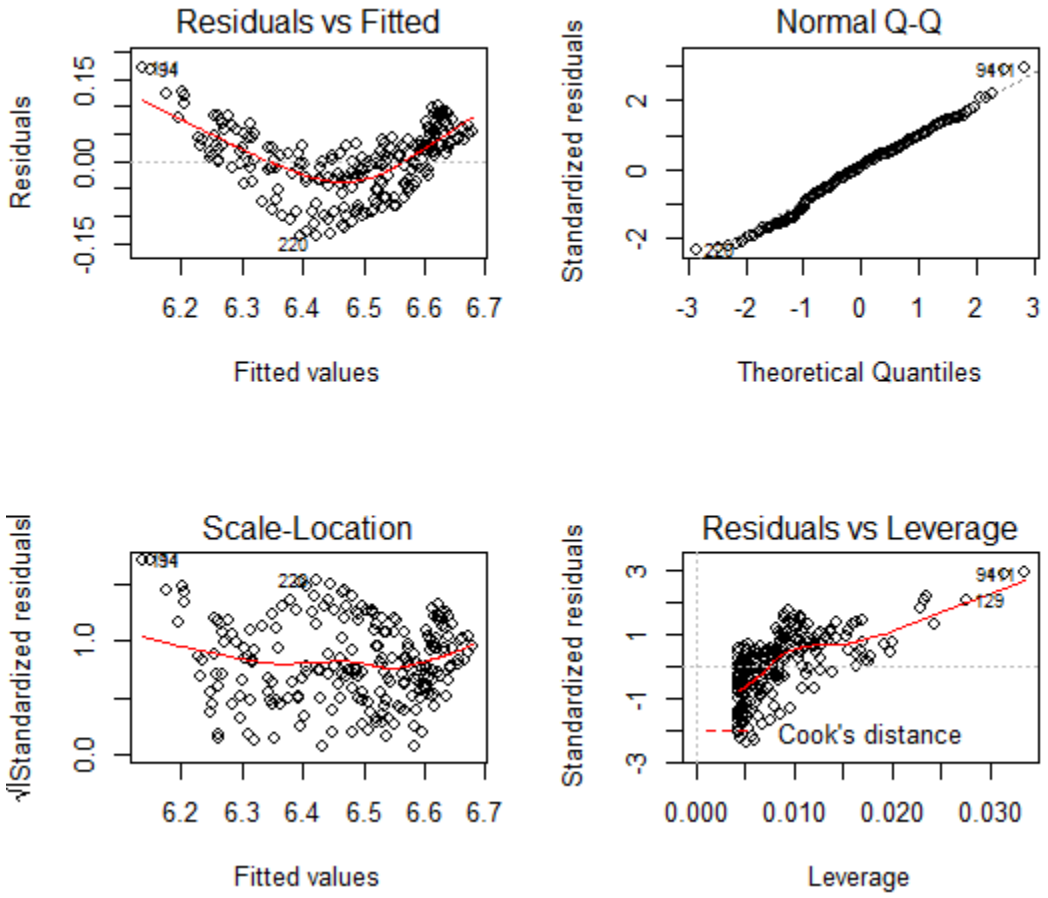



Figura 55. Gráfica de residuales interferograma 6, frame 080.

En el gráfico de Residuals vs Fitted podemos observar que la mayoría de los residuales se encuentran entre -0.15 y 0.15, también podemos visualizar dos residuales muy altos, y un residual muy bajo que podríamos afirmar que son atípicos, estos serían los siguientes datos (220, 111,94). En el grafico Normal Q-Q se puede analizar que la gran mayoría de los datos se encuentran cerca de una distribución normal a excepción de los datos (220, 111,94) que están alejados de esta.

Para el grafico Scale –Location se puede analizar que la mayoría de los residuales estandarizados elevados a un medio se encuentran entre valores de 0 a 1.5, además observamos

algunos datos extremos (220, 111,94). Cuando observamos el grafico Residual vs Leverage una aglomeración de residuos estandarizados se encuentran muy cerca al valor cero, con esto podemos afirmar que existen 3 datos atípicos de la agrupación de los residuos y alejados de este valor, estos valores son (129, 111,94).

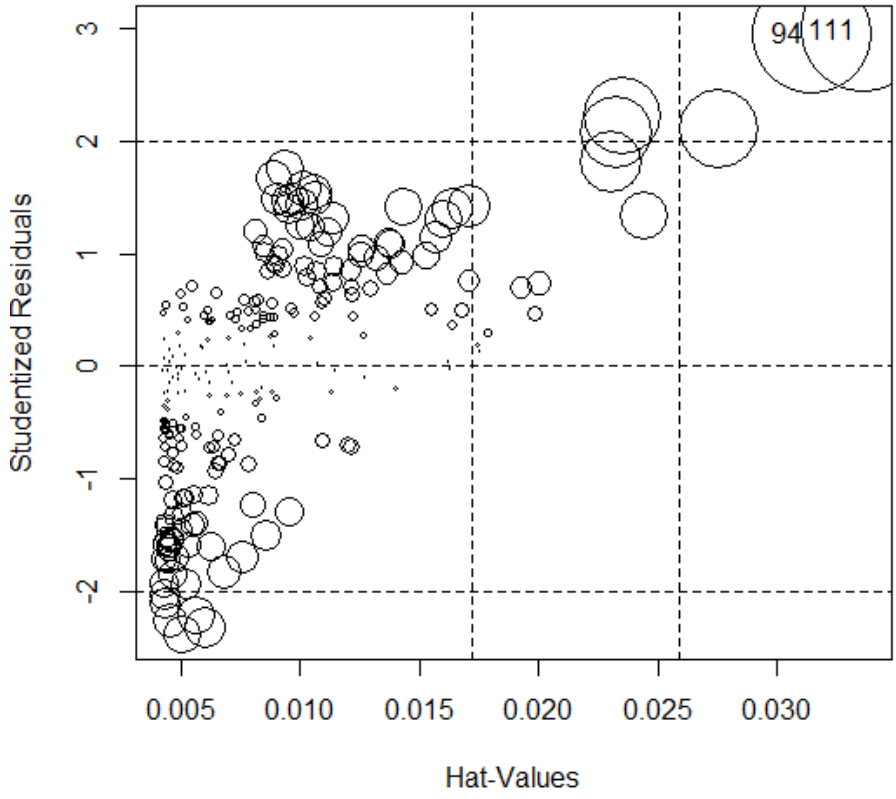



**Figura 56. Gráfica Hat-Values**

El anterior grafico nos arroja valores fuera del rango (-2,2) para los residuales estandarizados, los cuales son atípicos dentro de los residuales, y valores con hat-values demasiado altos que también podemos afirmar que son atípicos. Estos datos seria (111,94)

Para finalizar, procedemos aplicar el test de Bonferroni el cual indica que valores en total son atípicos y estos se eliminaran de la muestra. Este test se realizó para muestra anterior.

```
No Studentized residuals with Bonferroni p < 0.05
Largest |rstudent|:
    rstudent unadjusted p-value Bonferroni p
111 2.988822          0.0031059      0.72058
```

El dato (111), será eliminando de nuestra muestra y nuevamente desarrollaremos la correlación para observar si existe una mejora significativa en nuestra correlación.

```
Residual standard error: 0.05776 on 229 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8394, Adjusted R-squared:  0.8387
F-statistic:  1197 on 1 and 229 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

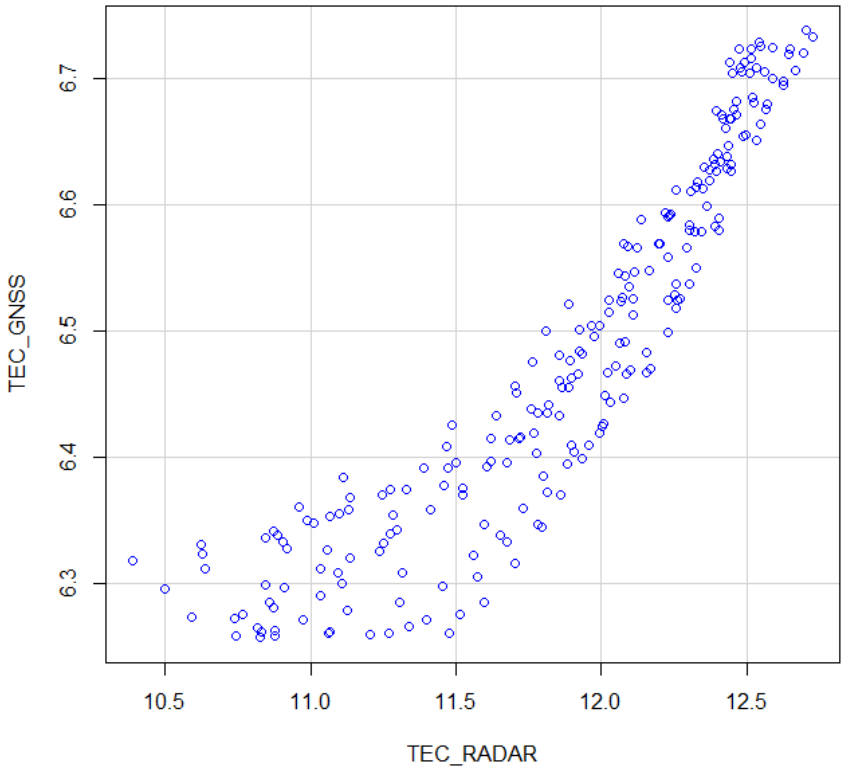



Figura 57. Correlación sin datos atípicos interferograma 6, frame 080

**Análisis:** cómo podemos observar la mejora de la muestra con la extracción de los atípicos fue mínima ya que la muestra con atípicos muestra una correlación de 83,34% mientras que la muestra sin atípicos muestra una correlación del 83,87%. Para este caso no serían pertinentes los datos

atípicos, porque pueden ser representativos para la muestra además que cuando se quitan no muestran una mejora significativa.

Frame 090

```
Call:
lm(formula = GRID_CODE ~ RASTERVALU, data = C14505090)
```

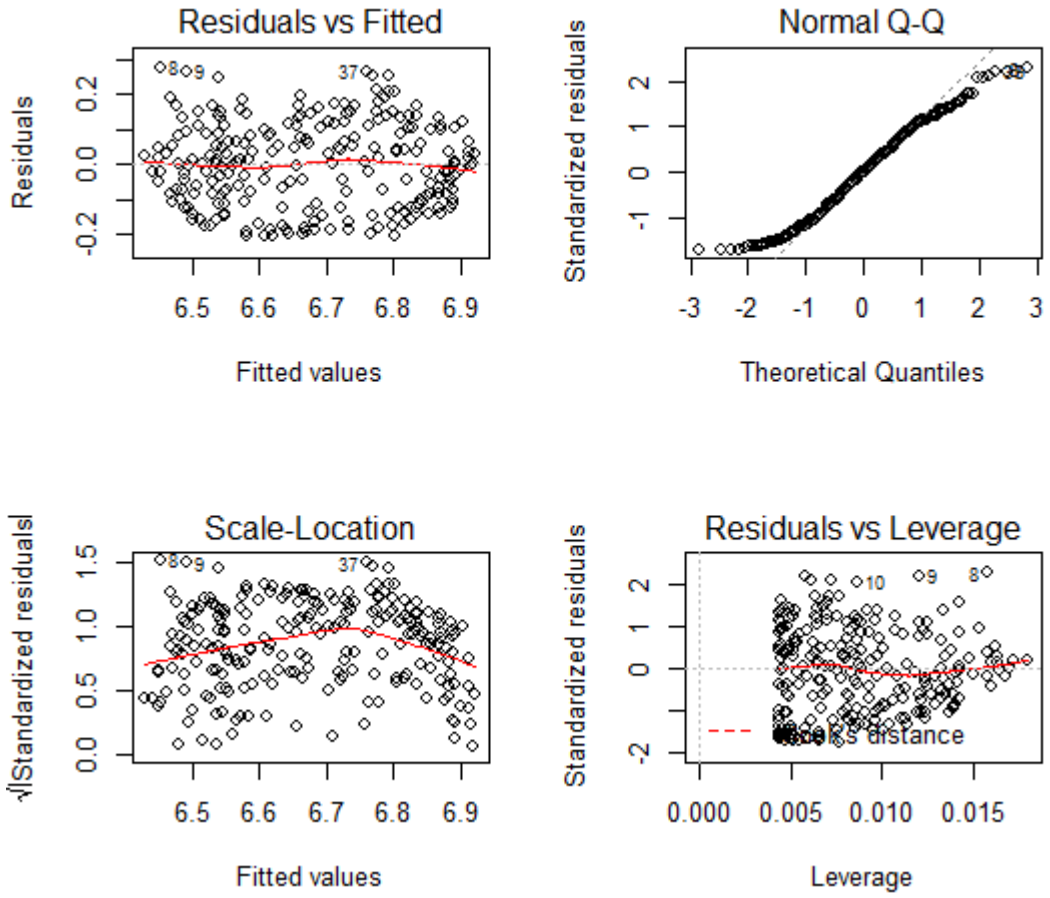



**Figura 58. Gráfica de residuales interferograma 6, frame 090.**

En el gráfico de Residuals vs Fitted podemos observar que la mayoría de los residuales se encuentran entre -0.2 y 0.2, también podemos visualizar tres residuales muy altos que podríamos afirmar que son atípicos, estos serían los siguientes datos (37,9,8). En el grafico Normal Q-Q se puede analizar que la gran mayoría de los datos se encuentran cerca de una distribución normal a excepción de los datos (37,9) que están alejados de esta.

Para el grafico Scale –Location se puede analizar que la mayoría de los residuales estandarizados elevados a un medio se encuentran entre valores de 0 a 1.5, además observamos algunos datos extremos (37,9,8). Cuando observamos el grafico Residual vs Leverage una aglomeración de residuos estandarizados se encuentran muy cerca al valor cero, con esto podemos afirmar que existen 3 datos atípicos de la agrupación de los residuos y alejados de este valor, estos valores son (10,9,8)

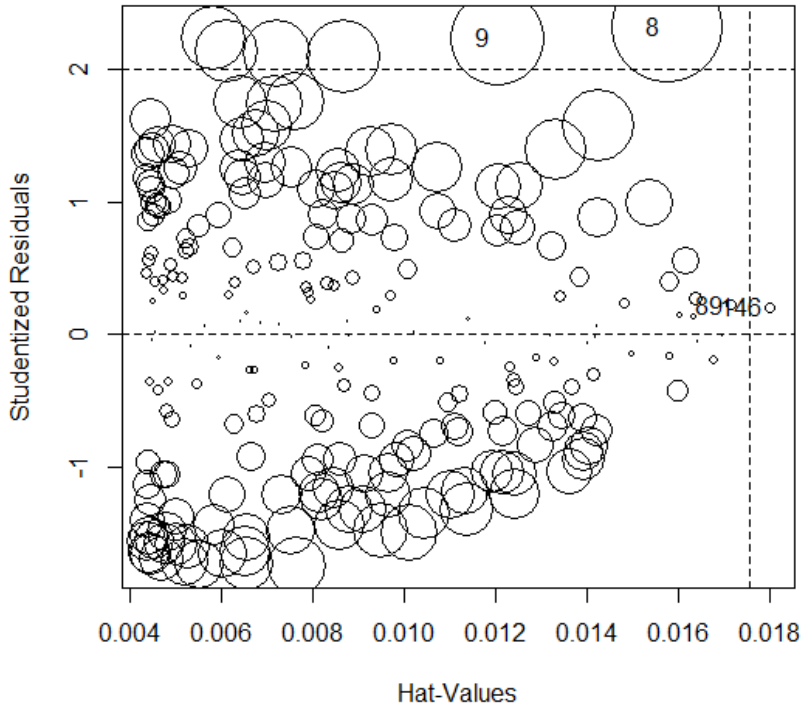



**Figura 59. Gráfica Hat-Values**

El anterior grafico nos arroja valores fuera del rango (-2,2) para los residuales estandarizados, los cuales son atípicos dentro de los residuales, y valores con hat-values demasiado altos que también podemos afirmar que son atípicos. Estos datos serian (146,89,9,8)

Para finalizar, procedemos aplicar el test de Bonferroni el cual indica que valores en total son atípicos y estos se eliminaran de la muestra. Este test se realizó para muestra anterior.

```
No Studentized residuals with Bonferroni p < 0.05
Largest |rstudent|:
  rstudent unadjusted p-value Bonferroni p
8 2.312762           0.021639           NA
```

El dato (8), será eliminando de nuestra muestra y nuevamente desarrollaremos la correlación para observar si existe una mejora significativa en nuestra correlación.

```
Residual standard error: 0.1196 on 225 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5929, Adjusted R-squared:  0.5911
```

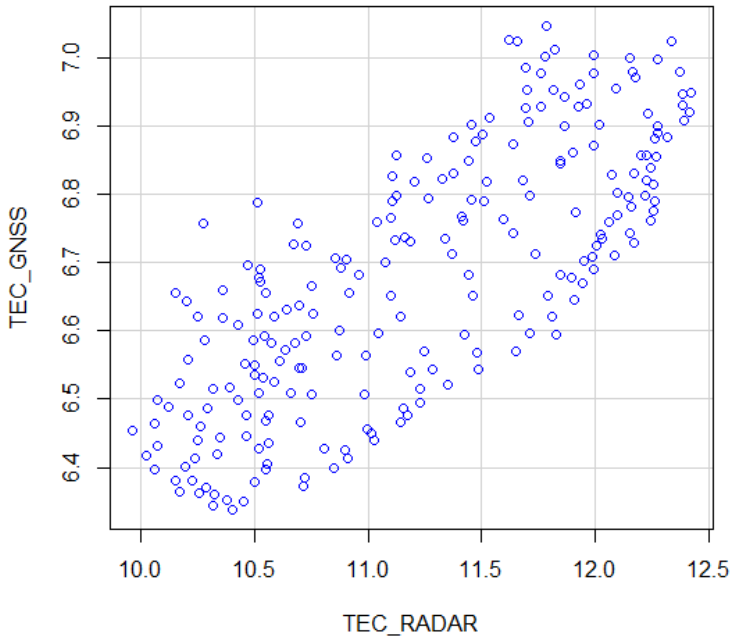



**Figura 60. Correlación sin datos atípicos interferograma 6, frame 090.**

**Análisis:** como podemos observar la mejora de la muestra con la extracción de los atípicos fue mínima ya que la muestra con atípicos muestra una correlación de 58,15%

mientras que la muestra sin atípicos muestra una correlación del 59,11%. Para este caso no sería pertinente los datos atípicos, porque pueden ser representativos para la muestra además que cuando se quitan no muestran una mejora significativa.

Como podemos visualizar en este path , la extracción de los datos atípicos no ha reflejado una mejora en la correlación entre los métodos , así que para nuestro proyecto preferimos dejar la muestra de datos recolectados  sin extraerlos los datos atípicos ,ya que son pocos y en este caso no aporta excluirlos para que mejore significativamente la correlación entre los datos obtenidos por medio del método Split Spectrum y el método GNSS.

Frame 100

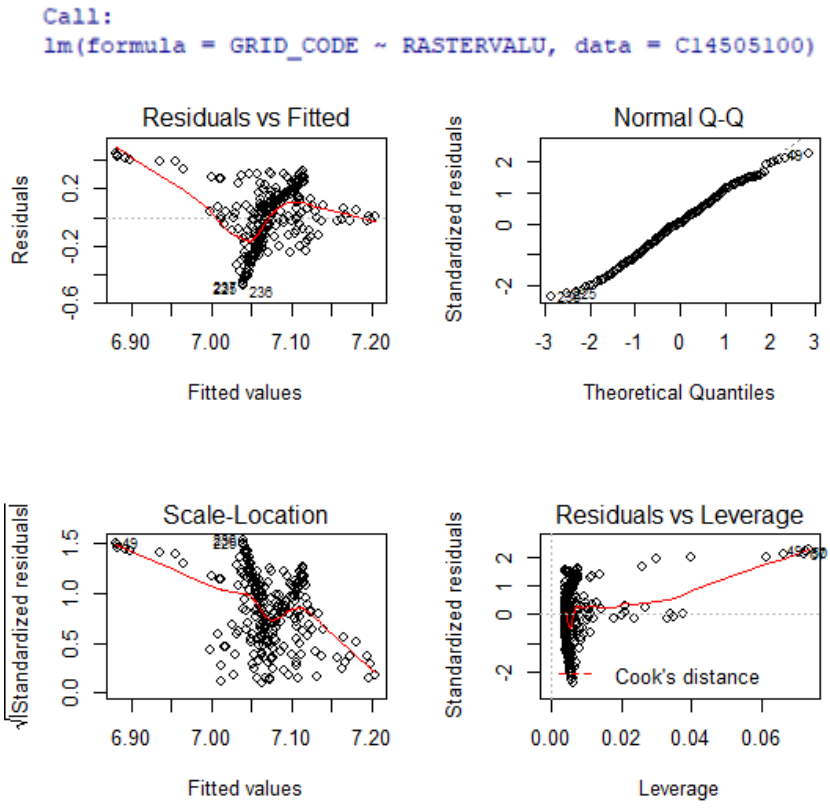



Figura 61. Gráfica de residuales interferograma 6, frame 100.

En el gráfico de Residuals vs Fitted podemos observar que la mayoría de los residuales se encuentran entre -0.6 y 0.2, también podemos visualizar dos residuales muy bajos que podríamos

afirmar que son atípicos, estos serían los siguientes datos (236, 225,49). En el grafico Normal Q-Q se puede analizar que la gran mayoría de los datos se encuentran cerca de una distribución normal a excepción de los datos (236, 225,49) que están alejados de esta.

Para el grafico Scale –Location se puede analizar que la mayoría de los residuales estandarizados elevados a un medio se encuentran entre valores de 0 a 1.5, además observamos algunos datos extremos (236, 225,49). Cuando observamos el grafico Residual vs Leverage una aglomeración de residuos estandarizados se encuentran muy cerca al valor cero, con esto podemos afirmar que existen 3 datos atípicos de la agrupación de los residuos y alejados de este valor, estos valores son (236, 225, 50,49)

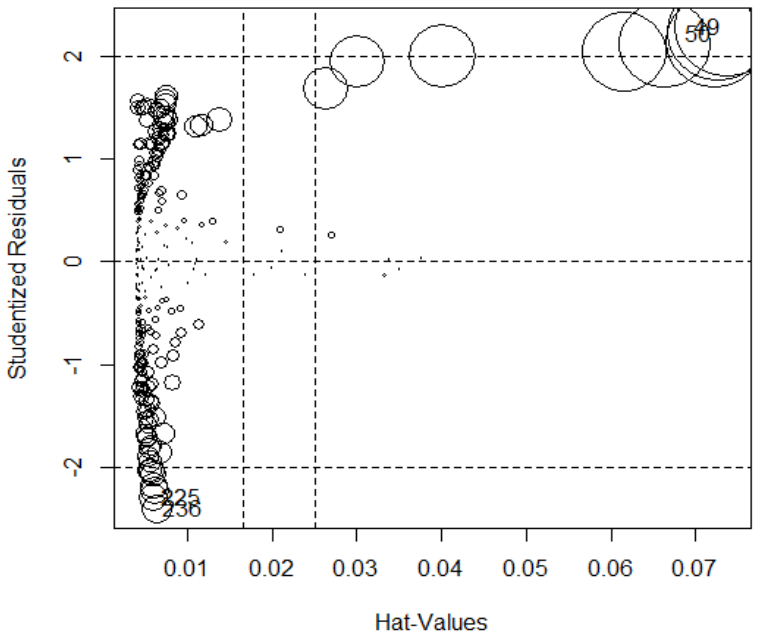



**Figura 62. Gráfica Hat-Values**

El anterior grafico nos arroja valores fuera del rango (-2,2) para los residuales estandarizados, los cuales son atípicos dentro de los residuales, y valores con hat-values demasiado altos que también podemos afirmar que son atípicos. Estos datos serian (236, 225, 50,49). Para finalizar,

procedemos aplicar el test de Bonferroni el cual indica que valores en total son atípicos y estos se eliminaran de la muestra. Este test se realizó para muestra anterior.

```
No Studentized residuals with Bonferroni p < 0.05
Largest |rstudent|:
    rstudent unadjusted p-value Bonferroni p
236 -2.39784           0.017267           NA
```

El dato (236), será eliminando de nuestra muestra y nuevamente desarrollaremos la correlación para observar si existe una mejora significativa en nuestra correlación.

```
Residual standard error: 0.2049 on 238 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.04927, Adjusted R-squared:  0.04528
F-statistic: 12.33 on 1 and 238 DF,  p-value: 0.0005318
```

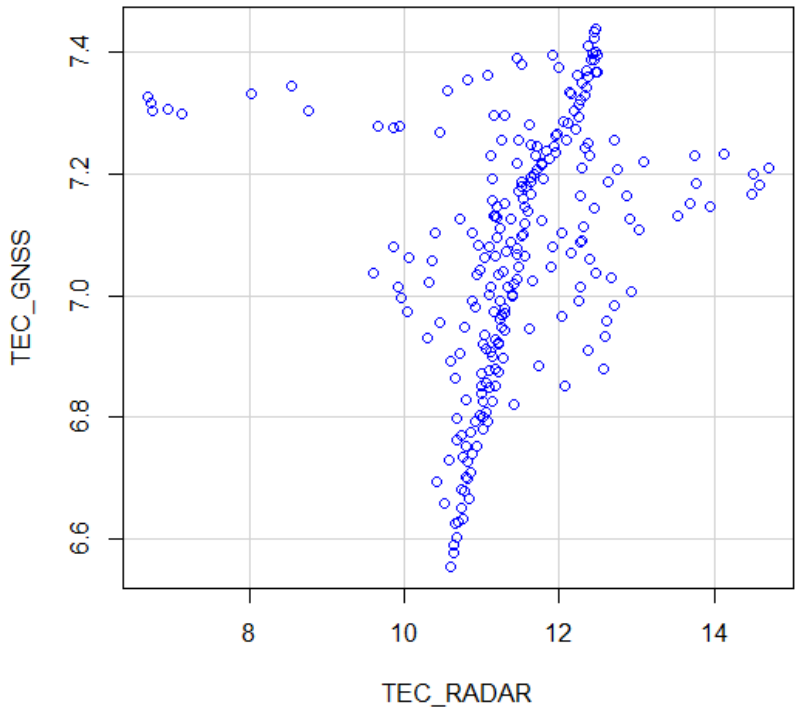



**Figura 63. Correlación sin datos atípicos interferograma 6, frame 100.**

**Análisis:** Como podemos observar no hay mejora de la muestra con la extracción de los datos atípicos ya se mantiene la correlación en 4,52%

# 13 BIBLIOGRAFÍA

A. Rosen , P., Hensley, S., & Chen, C. (2011). Measurement and Mitigation of the Ionosphere in L-band interferometric SAR Data. *Jet Propulsion Laboratory*.

Berné Valero, J. L., Garrido Villén, N., & Anquela Julián, A. B. (2013). *GPS. FUNDAMENTOS Y APLICACIONES EN GEODESIA Y TOPOGRAFíA.* Valencia: Editorial Universitat Politécnica de Valencia.

Chen, A. (2015). Reducing ionospheric Effects InSAR Data Using Accurate Coregistration. *IEEE*, 60-70.

Conte, J. F. (2015). *Perfeccionamiento del Modelo Ionosferico (LPIM).* La Plata,Argentina: Tesis de Doctorado en Astronomia.Universidad de La Plata.

E.Sardon, A. y. (1993). *Estimacion del contenido total de electrones de la inosfera usando datos del sistema posicionamiento global.* Madrid: Complutense.

Fattahi, H., Simons, M., & Agram, P. (2017). InSAR Time-Series Estimation of the Ionospheric Phase Delay: An Extension of the Split Range-Spectrum Technique. *IEEE*.

Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., & Rocca, F. (2007). *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation.* Toulouse, France: European Space Agency (ESA).

Furuya, M., Suzuki, T., Maeda, J., & Heki, k. (2017). Midlatitude sporadic-E episodes viewed by L-Band spllit-spectrum InSAR. *Earth, Planets and Space*.

Gomba, G. (2016). *Estimation and Compensation of Ionospheric Propagation.* Múnchen: TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN.

Gomba, G., Parizzi, A., De Zan, F., & Eineder, M. (2016). Toward Operational Compensation of Ionospheric Effects in SAR Interferograms: The Splet-Spectrum Method. *IEEE*, 1446-1461.

Hasni, K., Chen, J., & Zhuo, L. (2016). A refined Split-Spectrum Algorithm for correcting ionospheric Effects on Interferograms of Spaceborne D-InSAT at Longer Wavelengh. *IEEE*, 6855-6858.

IGAC. (s.f.). *igac*. Recuperado el 30 de 04 de 2020, de igac: https://www.igac.gov.co/es/contenido/areas-estrategicas/red-magna-eco

Kouba, J. (2009). A guide to using International GNSS Service (IGS) products. *ResearchGate*.

Liang, C., Agram, P., Simons, M., & Fielding, E. (s.f.). Ionospheric Corrections of InSAR Time Series Analysis od C-band Sentinel-1 TOPS Data.

Lira, J. (2002). *SISTEMA RADAR DE IMAGENES*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

M. Dow, J., E. Neilan, R., & Rizos, C. (2009). The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *SpringerLink*.

manju, G., Thampi, S., & Veettil, S. V. (2011). Toward predition of L band scintilations in the equatorial ionization anomaly region. *ResearchGate*.

Meyer, F., Bamler, R., Jakowski, N., & Fritz, T. (2006). The potential od Low-Frequency SAR Systems for Mapping Ionospheric TEC Distributions. *IEEE*, 560-564.

Musico, E., Cesaroni, C., Spogli, L., Merryman Boncori, J. P., De Franceschi, G., & Seu, R. (2018). The total Electron Content From InSAR and GNSS: A Midlatitude Study. *IEEE*, 1725-1733.

Oliveira Moraes, A., Muella, M., R. de Paula, E., B.A. de Oliveira, C., P. Terra, W., J. Perrella, W., y otros. (2018). Statistical evaluation of GLONASS amplitude scintillation over low latitudes in the Brazilian territory. *Advances in Space Research*, 1776-1789.

Oliveira Moraes, A., T.A.H Muella, M., Paula, E. R., de Oliveira, C. B., Terra, W., Perrella, W., y otros. (2018). Stastical evaluation of GLONASS amplitude scintillation over low latitudes in the Brazilian territory. *ScienceDirect*, págs. 1776-1789.

Pi, X., Meyer, F. J., Chotoo, K., Freeman, A., Caton, R. G., & Bridgwood, A. (s.f.). Impact of Ionospheric Scintillation on Spaceborne SAR Observations Studied Using GNSS. *Geophysical Institute, Jet Propulsion Laboratory*.

Postdam. (s.f.). Recuperado el 2020 de 04 de 30, de https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/

Rios, V. H. (2014). UNA REVISION DE LA POLARIMETRIA Y LOS EFECTOS IONOSFERICOS SOBRE LOS SISTEMAS DE SAR, INSAR Y PALSAR: REQUERIMIENTOSY METODOS DE CORRECION. *GEOACTA*, 18.

Rosen, P., Lavalle, M., Pi, X., Buckley, S., Szeliga, W., Zebker, H., y otros. (2011). TECHNIQUES AND TOOLS FOR ESTIMATING IONOSPHERIC EFFECTS IN INTERFEROMETRIC. *Jet Propulsion Laboratory*.

Skolnik, M. (1981). *Introduction to Radar Systems (Second Edition).* Singapore: McGraw-Hill Book Co.

Spaceweather. (s.f.). *Spaceweather*. Recuperado el 30 de 03 de 2020, de Spaceweather: https://www.spaceweatherlive.com/es/actividad-solar/ciclo-solar

Villegas Vega, H. (2008). *Introducción a la percepcion remota y sus aplicaciones geologicas (Guia para asistentes).* Bogotá: INGEOMINAS.

Y.C.Yeh, C. (1972). *Theory of ionosferic waves.* ELSEVIER.