

Universidad de Valencia

Facultad de Física

Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica



Comparación de las Temperaturas de Brillo en Banda L Proporcionadas por SMOS y Aquarius sobre Distintas Zonas de La Tierra

Tesis Doctoral

Doctorado en Teledetección

M^a Amparo Benlloch Casaban

Mayo 2017

Dirigida por: Prof. Ernesto López-Baeza

Prof. Enrique A. Navarro



Comparación de las Temperaturas de Brillo en Banda L Proporcionadas por SMOS y Aquarius sobre Distintas Zonas de la Tierra

M^a Amparo Benlloch Casaban

Tesis Doctoral – Doctorado en Teledetección

Directores: Dr. Ernesto López-Baeza

Dr. Enrique A. Navarro Camba

Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica

Facultad de Física. Universidad de Valencia

Ernesto López Baeza, Profesor Titular de Física Aplicada del Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica de la Facultat de Física de la Universitat de València, y Enrique A. Navarro Camba, Catedrático de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Escuela de Ingeniería de la Universitat de València,

CERTIFICAN: Que la presente Memoria titulada *“Comparación de las Temperaturas de Brillo en Banda L Proporcionadas por SMOS y Aquarius sobre Distintas Zonas de La Tierra”*, ha sido realizada bajo nuestra dirección en el *Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica de esta Facultad*, por D. Amparo Benlloch Casaban, y constituye su Tesis Doctoral para optar al grado de Doctor en Teledetección.

Y para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente firmamos el presente certificado en Burjassot, a 30 de Mayo de 2016.



Fdo.: Ernesto López Baeza



Fdo.: Enrique A. Navarro Camba

A mis padres:

José Benlloch y Amparo Casaban

“La cima de la colina no sería la mitad de maravillosa si no existieran valles oscuros por atravesar”

Hellen Keller(1880-1968)

Out of the night that covers me,
Black as the pit from pole to pole,
I thank whatever gods may be
For my unconquerable soul.
In the fell clutch of circumstance
I have not winced nor cried aloud.
Under the bludgeonings of chance
My head is bloody, but unbowed.
Beyond this place of wrath and tears
Looms but the horror of the shade,
And yet the menace of the years
Finds and shall find me unafraid.
It matters not how strait the gate,
How charged with punishments the scroll,
I am the master of my fate:
I am the captain of my soul.

“Invictus” William Ernest Henley.(1875-1903)

AGRADECIMIENTOS:

- Al Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, y a su Director el Profesor José Antonio Martínez Lozano, en cuyo marco he podido realizar esta Tesis Doctoral. También al Máster en Teledetección que provocó en mí el querer profundizar en estos temas.
- Al profesor Dr. Ernesto López- Baeza, por creer en mí, por darme la oportunidad de hacer este trabajo y ayudarme en todo el proceso.
- Al profesor Dr. Enrique Navarro, por su inestimable ayuda. Sin sus directrices no lo habría conseguido.
- A Carolina Tenjo por su generosidad, por su incalculable ayuda y sus consejos durante todo el proceso. No tengo palabras para agradeceréte.
- A mis compañeros del Grupo de Climatología desde Satélites (Roberto, Niobe, Amparo, ...)
- Al Dr. David LeVine, Goddard Space Flight Center (GSFC), Aquarius Deputy Principal Investigator
- Al Dr. Simon Yueh, Aquarius Project Scientist (Enero 2012 - Septiembre 2013)
- Al profesor Dr. Francisco Montes por su ayuda generosa en estadística espacial
- Al Dr. Arnaud Mialon de CATDS por su amabilidad al responder todas mis dudas, por ayudarme a entender la malla EASE.
- Al Dr. Buenaventura Casanova, Jefe de la Unidad de Esclerosis Múltiple del Hospital La Fe, mi neurólogo, por ayudarme a luchar contra un dragón

INDICE

1. Introducción
2. Marco teórico
 - 2.1. Radiometría en microondas
 - 2.2. Principios físicos
 - 2.3. Microondas en teledetección
 - 2.4. Radiación recibida por la antena. Parámetros de Stokes
 - 2.5. Matriz de ganancia
3. Satélites Aquarius, SMOS y sensor MODIS. Datos
4. Planteamientos y objetivos
5. Zonas de estudio
 - 5.1. Amazonas
 - 5.2. España
 - 5.3. Fort Peck
 - 5.4. Marruecos
 - 5.5. Pacífico Sur
 - 5.6. Park Falls
 - 5.7. Sahara Sur-Chad
 - 5.8. Santa Rita
 - 5.9. Sky Oaks

6. Metodología

6.1. Métodos geofísicos

6.1.1. Método de áreas

6.1.2. Método de usos del suelo

6.1.3. Método del índice TVDI

6.2. Método físico

6.2.2. Método de la matriz de ganancia

7. Resultados

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Lista de figuras

Lista de acrónimos

Anexo

RESUMEN

En esta Tesis Doctoral se analizan datos procedentes de dos misiones espaciales de observación de la Tierra que han coincidido en el tiempo, SMOS (*Soil Moisture Ocean Salinity*), de la *European Space Agency* (ESA) y Aquarius, de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Estas misiones miden la temperatura de brillo de la Tierra en la banda L de microondas, entre otras variables geofísicas. Este trabajo se centra, fundamentalmente, en la comparación de este parámetro proporcionado por ambas misiones. Las diferentes resoluciones espaciales que proporcionan los sensores de ambos satélites hace difícil la comparación y esto ha motivado la aplicación de diferentes técnicas o métodos comparativos – puramente geométricos, geofísicos y más puramente físicos- y para ello se han evaluado los errores respectivos de cada procedimiento sobre nueve diferentes zonas continentales y marinas con diferente grado de homogeneidad o heterogeneidad. Los métodos empleados han sido: *método de las áreas*, en el que se hace una media ponderada de las temperaturas de brillo de los píxeles de SMOS que están dentro del *footprint* de Aquarius, *método de los usos de suelo*, donde los pesos de la ponderación se obtienen de los diferentes usos del suelo dentro de los *footprints* de ambos instrumentos, *método del TVDI* (*Temperature Vegetation Dryness Index*), donde se considera el diferente grado de sequedad/humedad de la superficie y finalmente el *método de la matriz de ganancia* que, para ponderar, tiene en cuenta el diagrama de antena de los sensores. Se han tenido también en cuenta, lógicamente, otras diferencias importantes que existen entre ambos sensores, como por ejemplo, que SMOS consiste en un radiómetro interferométrico de apertura sintética, MIRAS (*Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis*), mientras que Aquarius tiene un radiómetro de apertura real, las diferencias en las horas respectivas de paso de ambos satélites, etc. Obtenemos unos resultados altamente significativos y novedosos al utilizar los diagramas de antena de los instrumentos.

Los datos utilizados de SMOS corresponden a productos de nivel 3 de temperatura de brillo con ángulo de incidencia de 27.5° y proporcionados por CATDS (*Centre Aval de Traitement des Données SMOS*). Los datos de Aquarius corresponden a temperaturas de brillo adquiridas por el *inner*

beam. En ambas configuraciones se consideran ambas polarizaciones, horizontal y vertical.

Como era de esperar, es el método de la matriz de ganancia es el que consigue mejores resultados, reduciendo considerablemente los errores en todas las zonas y con ambas polarizaciones. El método del TVDI necesita datos complementarios de un tercer sensor MODIS (*MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer*), para poder aplicarse. Este método tiene la ventaja de que considera los aspectos dinámicos de la evolución de la superficie, lógicamente en el caso de las superficies continentales, lo cual representa una ventaja frente a los métodos más estáticos de las áreas y de los usos del suelo.

1. INTRODUCCIÓN

El agua de la Tierra - que constituye la *hidrosfera* - se distribuye en tres reservorios principales: los océanos, los continentes y la atmósfera, entre los cuales existe una circulación continua - el **ciclo del agua** o **ciclo hidrológico**. El ciclo del agua es un ciclo terrestre que consiste en el intercambio de agua entre las diferentes partes de la Tierra: la atmósfera, la hidrosfera, y el suelo (litosfera). El movimiento del agua en el ciclo hidrológico es mantenido por la energía radiante del Sol y por la fuerza de la gravedad.

El agua dulce representa menos del 3% del agua disponible y está en su mayor parte en forma de hielo sólido en los polos y en los glaciares de montaña. El ciclo del agua tiene una interacción constante con los ecosistemas ya que los seres vivos dependen del agua para sobrevivir.

Debido a la gran importancia científica de todos los aspectos relacionados con el agua y con el ciclo hidrológico, las agencias espaciales ESA y NASA han desarrollado diferentes misiones espaciales relacionadas con esta temática. Así, en el año 2009, ESA lanzó el satélite SMOS y en 2011 NASA lanzó el satélite Aquarius. La coincidencia en el tiempo de ambos satélites ha permitido comparar sus observaciones, en este caso referidas a la temperatura radiativa en la banda L de microondas.

Estos satélites proporcionan datos globales de la humedad del suelo, salinidad y el estado de congelación / descongelación de la superficie con una precisión sin precedentes. Entre los objetivos de estos satélites se encuentran: comprender los procesos que vinculan los ciclos del agua, estimar los flujos de agua y energía a nivel mundial, mejorar la habilidad del pronóstico del clima y predicción de sequías e inundaciones.

Las diferencias entre los dos instrumentos tales como la configuración (sintética o apertura real), los esquemas de antena y de calibración, la resolución espacial, originan diferentes valores de las temperaturas de brillo. La intercomparación de las mediciones de ambos sensores observando los mismos objetivos es una actividad altamente significativa y con trascendencia en teledetección, ya que se trata de comparar medidas reales procedentes de dos misiones, es decir, se pone a prueba la validez de ambos instrumentos en su funcionamiento real, cuando en muchos otros casos se trabaja con simulaciones.

A finales de enero de 2015, NASA lanzó el satélite SMAP (*Soil Moisture Active Passive*), cuyos objetivos eran también complementarios a los de los satélites anteriores. La inclusión de SMAP en la comparación hubiera sido extraordinariamente significativa, pero desafortunadamente, Aquarius dejó de funcionar en Junio de 2015.

Las comparaciones previas entre Aquarius y SMOS se han hecho sobre zonas homogéneas, por ejemplo, [Pablos et al., 2014], [Bindlish et al., 2013]. En este trabajo se comparan los datos de Aquarius con los de SMOS, realizando una adaptación geométrica entre los *footprints* de ambos instrumentos. El *footprint* de SMOS se ha adaptado al de Aquarius ajustando las áreas equivalentes de ambos

sensores donde se produce el solapamiento entre ambas observaciones, teniendo en cuenta el área, los usos del suelo, el índice TVDI y la matriz de ganancia de la antena. Uno de los problemas encontrados ha sido la disponibilidad de datos para realizar las comparaciones, y eso ha restringido el intervalo temporal estudiado, que va desde el año 2012 hasta el año 2015, ya que fue en 2015 cuando Aquarius dejó de transmitir datos. También hemos tenido que decidir las zonas del planeta sobre las que comparar los resultados procedentes de ambos satélites, y se han elegido varias, tratando de que fueran representativas de las zonas barridas por ambos satélites en que existía coincidencia, procurando, entre otros aspectos, que las zonas de estudio fueran tanto homogéneas como heterogéneas, que estuviesen en distintas latitudes y que correspondieran tanto a superficies continentales como a superficies marinas. Esto permitía verificar la bondad de la comparativa y del correspondiente método.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. RADIOMETRÍA EN MICROONDAS: CONCEPTOS

La mayor parte de la energía recibida por el planeta Tierra viene de la radiación solar electromagnética. Parte de esta energía es dispersada y absorbida por la atmósfera de la Tierra y otra parte se transmite a la superficie de la Tierra. De esta última, una parte se dispersa hacia el exterior absorbiéndose el resto.

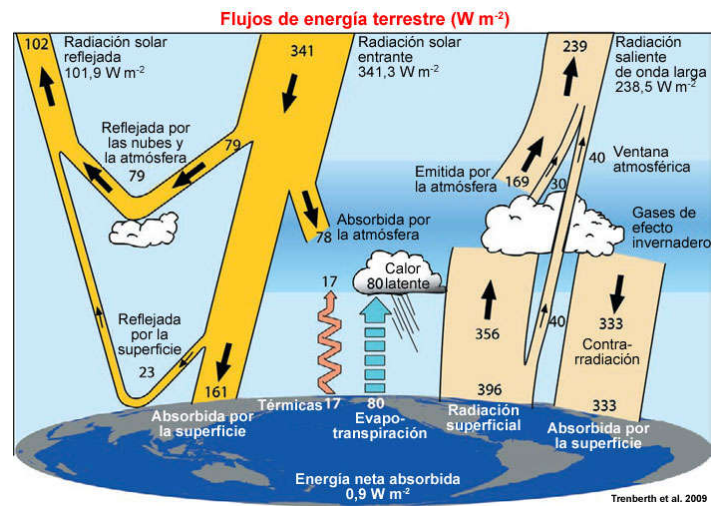


Figura 1: Balance energético medio anual de la Tierra en $W m^{-2}$ entre marzo de 2000 y mayo de 2004. (Trenberth et al., 2009)

La absorción de energía electromagnética por un material conlleva una transformación en energía térmica, que se acompaña en un aumento de temperatura.

El equilibrio entre la radiación solar absorbida y la radiación emitida por la superficie de la Tierra y su atmósfera, se trata en la Teoría de Transferencia de Radiación.

La Radiometría es el campo de la ciencia que está relacionada con la medición de la energía electromagnética asociada a la radiación de un cuerpo negro, esta radiación es emitida directamente o reflejada de los objetos que tiene alrededor. Un radiómetro es un receptor muy sensible especialmente diseñado para medir esta energía que se traduce en la medición de una potencia de ruido.

Todos los medios materiales que están a una determinada temperatura de equilibrio emiten energía electromagnética que se extiende sobre la totalidad del espectro electromagnético. En la región de microondas la potencia de ruido es $P = k T B$, donde k es la constante de Boltzmann ($1.380658 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$), B la anchura de banda del sistema (27 MHz) y T la temperatura (en este caso del orden de 300 K) (Schwank et al., 2010), resultando entonces una potencia del orden de $\approx 0.11 \cdot 10^{-12} \text{ W}$. Como hemos mencionado anteriormente, vemos que el radiómetro debe tener muy alta sensibilidad y precisión capaz de medir niveles tan bajos de radiación electromagnética.

2.2. PRINCIPIOS FÍSICOS

Un cuerpo negro es un cuerpo idealizado de un material perfectamente opaco que absorbe toda la radiación incidente en todas las frecuencias, no reflejando nada. Es

un perfecto emisor, ya que de lo contrario, la energía absorbida por un material, aumentaría su temperatura de forma indefinida.

La radiación del cuerpo negro no polarizado se emite, de acuerdo con la ley de radiación de Planck, de manera uniforme con el brillo espectral definido en la siguiente fórmula:

$$B_f = \frac{2hf^3}{c^2} \cdot \left(\frac{1}{e^{hf/kT} - 1} \right) \quad (1)$$

donde B_f = brillo espectral del cuerpo negro ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{Hz}^{-1}$)

h = constante de Planck = $6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$

f = frecuencia (Hz)

k = constante de Boltzmann = $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

T = temperatura absoluta (K)

c = velocidad de la luz = $3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$

En la región de microondas, generalmente $hf \ll kT$ y entonces la aproximación de Rayleigh-Jeans simplifica la ecuación anterior [Ulaby et al., 1981].

Como $e^x - 1 = \left(1 + x + \frac{x^2}{2} + \dots \right) - 1 \approx x$ para $x < 1$

entonces: $B_f = \frac{2f^2 kT}{c^2} = \frac{2kT}{\lambda^2}$ (2)

y entonces el brillo de un cuerpo negro B_{bb} , a temperatura T y para un ancho de banda Δf , es directamente proporcional a la temperatura:

$$B_{bb} = B_f \cdot \Delta f = \frac{2kT}{\lambda^2} \cdot \Delta f \quad (3)$$

Los cuerpos materiales reales no se corresponden con el cuerpo negro idealizado, no absorben toda la energía incidente que les llega y emiten menos radiación que el cuerpo negro, usualmente se les llama *cuerpos grises*.

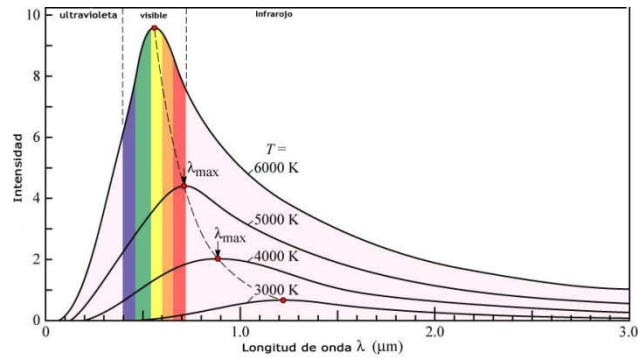


Figura 2: Radiación de cuerpo negro

[<http://www.quimicafisica.com/sites/default/files/images/quimica-general/teoria-cuantica/radiacion-cuerpo-negro.png>]

La radiación de los cuerpos grises (a una temperatura física T) se distribuye en el espacio según unas direcciones determinadas en función de la geometría de dichos cuerpos, este brillo $B(\vartheta, \varphi)$ se puede relacionar con la temperatura de brillo en cada dirección $T_B(\vartheta, \varphi)$, con la siguiente expresión:

$$B(\vartheta, \varphi) = \frac{2kT}{\lambda^2} \cdot T_B(\vartheta, \varphi) \cdot \Delta_f \quad (4)$$

El brillo de un material relativo al brillo de un cuerpo negro a la misma temperatura, define la emisividad $e(\vartheta, \varphi)$ como

$$e(\vartheta, \varphi) = \frac{B(\vartheta, \varphi)}{B_{bb}} = \frac{T_B(\vartheta, \varphi)}{T} \quad (5)$$

$$0 \leq e(\vartheta, \varphi) \leq 1$$

El cuerpo negro tiene $e = 1$ y los totalmente reflectores $e = 0$.

La temperatura de brillo, T_B , de un material es siempre menor o igual que su temperatura física, T .

$$T_B = eT \quad (6)$$

ya que $0 \leq e \leq 1$.

2.3. MICROONDAS EN TELEDETECCIÓN

El dispositivo que hace de intermediario entre los receptores de un radiómetro y el exterior es la antena. La antena recibe potencia de ruido desde todas las fuentes que están a su alrededor. Este dispositivo está recibiendo potencia de ruido de todos los objetos que directamente o indirectamente están emitiendo ruido por estar a una determinada temperatura, y esta potencia de ruido se transmite desde la antena a los diversos elementos de los receptores a través de líneas de transmisión con sus correspondientes amplificadores y filtros.

La antena apuntará a una zona que tiene una determinada temperatura aparente de brillo, pero la antena tiene un determinado diagrama de radiación y, de hecho, lo que hace es medir la temperatura de ruido de todo su entorno, en función de su diagrama de radiación. La atmósfera emite radiación en todas direcciones, originalmente procedentes de otros objetos y del Sol. También habrá una potencia de ruido procedente directamente del Sol y otra reflejada en el suelo y otros objetos circundantes, como por ejemplo la vegetación. Todas estas emisiones llegan al receptor a través del lóbulo principal y de los lóbulos secundarios de la antena. De

ese modo, podríamos decir que la temperatura total de ruido vista por el radiómetro es una función de la escena que tiene alrededor (Figura 3). Con la radiometría de microondas es posible inferir información de la escena a partir de la medición de la temperatura de ruido, combinado con un debido análisis de los mecanismos que relacionan la temperatura de brillo con las condiciones físicas de la escena. Por ejemplo, la potencia reflejada en una lámina uniforme de hielo o nieve se puede modelizar como la reflexión de una onda plana en una lámina dieléctrica multicapa, y dicho modelo se puede implementar para relacionar el nivel de señal recibido, o temperatura de brillo a varias frecuencias, con el grosor de las láminas de hielo y/o nieve [Pozar, 2012].

Una de las ventajas de usar la parte del espectro de microondas (300 MHz-300 GHz) en teledetección es su capacidad de atravesar las nubes, lluvia y otros fenómenos de tipo atmosférico, para realizar el trayecto suelo-sensor del satélite. Otra razón es su capacidad para penetrar más profundamente en la vegetación, que aumenta al disminuir la frecuencia, y por lo tanto tiene mayor penetración a longitudes de onda más grandes.

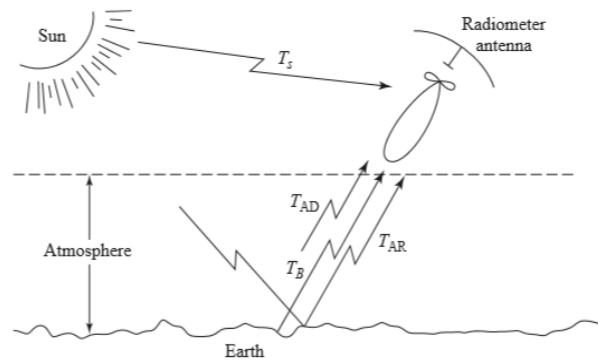


Figura 3: Fuentes de potencia de ruido en un radiómetro típico [Pozar, 2012]

Además, las microondas son capaces de penetrar de forma significativa en el suelo de la superficie terrestre. Y finalmente, la tercera razón es que la información que se obtiene en teledetección de microondas es diferente a la que se obtiene en la parte del espectro del visible y regiones infrarrojas, por lo que la teledetección en el rango de microondas se complementa con la teledetección en las bandas del espectro visible e infrarrojo.

Tanto SMOS como Aquarius operan en la banda L de microondas, específicamente, en la banda de frecuencia que va de 0.390 a 1.550 GHz.

2.4. RADIACIÓN RECIBIDA POR LA ANTENA

La señal de microondas procedente de la Tierra es recibida por las antenas a bordo de los satélites de Observación de la Tierra y la medida radiométrica de microondas es la temperatura de brillo, la cual está definida como $T_B(\vartheta, \varnothing) = e(\vartheta, \varnothing) \cdot T$ siendo su sensibilidad proporcional a $(B \cdot \tau)^{-1/2}$, donde B es el ancho de banda y τ es el tiempo de integración. [Ulaby et al., 1981]

Como consecuencia de lo anterior, para una mayor precisión radiométrica es deseable una anchura de banda tan grande como sea posible, ya que el límite superior del tiempo de integración τ se encuentra restringido a los parámetros de la plataforma (altura y velocidad), así como la anchura del haz de la antena y la configuración del barrido.

La *temperatura aparente* $T_{AP}(\vartheta, \varnothing)$ es la temperatura de ruido o energía de microondas que incide sobre la antena en la dirección (ϑ, \varnothing) respecto del lóbulo principal procedente del exterior, [Balanis, 2005].

Dado que la antena integra cada nivel de ruido procedente de cada combinación de ángulos (ϑ, \varnothing) , la temperatura aparente final T_{AP} se deberá calcular procediendo con tal integral angular en un volumen que encierre la antena. Sin embargo, el término que más influye sobre T_{AP} es la temperatura de brillo del pixel al que la antena apunta. Pero hay otras fuentes de ruido que también son medidas por la antena: la emisión atmosférica (T_{UP}), y la temperatura dispersada por el terreno en dirección (ϑ, \varnothing) que denotaremos como T_{SC} .

Los términos en emisión ($T_B + T_{SC}$) son atenuados por el factor de pérdida atmosférica que denotamos por L_a . Así pues:

$$T_{AP} = T_{UP} + (T_B + T_{SC}) \cdot \frac{1}{L_a} \quad (7)$$

y

$$T_A = \frac{A_r}{\lambda} \cdot \iint_{4\pi} T_{AP}(\theta, \varnothing) F_n(\theta, \varnothing) d\Omega \quad (8)$$

De ese modo, la temperatura de ruido final en la antena T_A es la integral de la temperatura aparente T_{AP} ponderada por el diagrama de la antena. Las antenas suelen diseñarse para captar la señal entre -90 grados y +90 grados respecto de su dirección de apuntamiento, donde se encuentra el lóbulo principal de radiación. Asimismo, su directividad es tan elevada que la señal que reciben fuera de este lóbulo principal es despreciable respecto de la señal recibida en dicho lóbulo, por lo que los lóbulos laterales y traseros, que también recogen energía de otras áreas, se suelen depreciar.

Como se ha comentado, el objetivo principal del diseño de la antena es tener un intenso y estrecho lóbulo principal y muy bajos lóbulos laterales, así T_A sería una buena aproximación al valor promedio de T_B .

La potencia medida por la antena observando una radiación térmica de fondo puede relacionarse con la temperatura de antena, utilizando la aproximación de Rayleigh-Jeans

$$P = k \cdot B \cdot G \cdot T_A \quad (9)$$

donde B es la anchura de banda del sistema y G la ganancia del radiómetro.

Otra característica de las medidas radiométricas es que la densidad de potencia de microondas es muy baja y la señal recibida por el sensor es por lo tanto muy débil, en algunos casos por debajo de la potencia de ruido del receptor. Esto hace necesario trabajar en bandas de frecuencia protegidas, bandas de frecuencia de microondas donde no se autorizan emisiones, no se permiten sistemas de telecomunicación que operen en estas bandas a nivel planetario, ya que las emisiones humanas de cualquier tipo, podrían enmascarar la señal recibida en las antenas de los satélites, y ocultar la temperatura de brillo que se pretende medir. Aunque estas bandas de frecuencia están protegidas, algunos puntos del planeta son inaccesibles para la detección debido a las interferencias de radiofrecuencia.

PARÁMETROS DE STOKES

Si consideramos una onda plana, propagándose en la dirección del eje z de un sistema cartesiano ortogonal xyz , esta onda puede descomponerse en dos componentes ortogonalmente polarizadas. Las polarizaciones horizontal y vertical se describen como sigue:

$$E(z, t) = E_h(z, t) \cdot \vec{h} + E_v(z, t) \cdot \vec{v} \quad (10)$$

y cada proyección está definida como:

$$E_h(t) = \text{Re}(A_h \cdot e^{-j\omega t}) = A_h \cdot \cos(\omega t + \delta_h) \quad (11)$$

$$E_v(t) = \text{Re}(A_v \cdot e^{-j\omega t}) = A_v \cdot \cos(\omega t + \delta_v) \quad (12)$$

donde A_h y A_v son las amplitudes del campo \vec{E} , en las direcciones horizontal y vertical respectivamente (ortogonales), ω es la frecuencia angular, y δ_h y δ_v son los factores de fase de cada proyección, siendo el desfase entre ambas la diferencia ($\delta = \delta_v - \delta_h$).

Los cuatro parámetros de Stokes son muy útiles para describir el estado de una onda electromagnética. Describen la energía total transportada por la onda y el tipo de polarización. Los parámetros de Stokes pueden definirse como:

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_H + T_V \\ T_V - T_H \\ T_{45^\circ} - T_{-45^\circ} \\ T_{l\text{ cir}} - T_{r\text{ cir}} \end{bmatrix} = \frac{\lambda^2}{kB\eta} \begin{bmatrix} \langle |E_h|^2 \rangle + \langle |E_v|^2 \rangle \\ \langle |E_h|^2 \rangle - \langle |E_v|^2 \rangle \\ 2\text{Re} \langle E_v E_h^* \rangle \\ 2\text{Im} \langle E_v E_h^* \rangle \end{bmatrix} \quad (13)$$

donde λ es la longitud de onda, $\lambda = c/f$, y siendo f la frecuencia, $\omega = 2\pi f$ la frecuencia angular, $c = 2.9978 \times 10^8$ m/s la velocidad de la luz, k la constante de Boltzmann, B el ancho de banda y η la impedancia del medio, en nuestro caso aire.

El parámetro I representa la intensidad de la onda, ya que nos informa de la potencia transportada por la onda, Q es la diferencia entre las potencias con polarización vertical y horizontal, U la diferencia entre las potencias con polarización $+45^\circ$ y -45° , y V la diferencia entre las potencias con las polarizaciones circular a derechas y circular a izquierdas.

Si la onda está perfectamente polarizada, se cumple que $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$, si está parcialmente polarizada, $I^2 > Q^2 + U^2 + V^2$ y si no está polarizada $Q = U = V = 0$.

Los radiómetros miden por separado la energía que llega con las polarizaciones horizontal y vertical, y utilizan el llamado vector de Stokes modificado

$$\vec{T}_B = \begin{bmatrix} T_H \\ T_V \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \frac{\lambda^2}{kB\eta} \begin{bmatrix} \langle |E_h|^2 \rangle \\ \langle |E_v|^2 \rangle \\ 2Re \langle E_v E_h^* \rangle \\ 2Im \langle E_v E_h^* \rangle \end{bmatrix} \quad (14)$$

La propagación de una onda electromagnética en un medio ionizado (plasma) bajo la acción de un campo magnético da lugar a la rotación del plano de polarización de la onda; esto es la llamada *rotación de Faraday*. Este efecto produce una rotación del plano de polarización de una onda electromagnética al atravesar la ionosfera terrestre, debido a la interacción de la misma con el campo magnético de la Tierra. Este efecto produce un ángulo de rotación de las ondas electromagnéticas entre 5° y 10°, que induce a errores de la temperatura de brillo del orden de 2K. [LeVine et al., 2007]. Para evitar este error inducido por la rotación de Faraday, las medidas de temperatura de brillo de los satélites se realizan con los parámetros de Stokes porque son independientes del giro del plano de polarización.

2.5. MATRIZ DE GANANCIA

Una antena es un dispositivo pasivo de microondas que realiza dos funciones:

- Adaptar la impedancia de la línea de transmisión o guía a la impedancia del espacio libre para evitar reflexiones que darían lugar a una menor potencia radiada.
- Dirigir la radiación en determinadas direcciones en el espacio tridimensional.

La antena es un dispositivo pasivo recíproco, por lo que esta capacidad de adaptar y dirigir la radiación se produce en los dos sentidos, al emitir y al recibir la señal electromagnética. Esta capacidad para dirigir la radiación en el espacio viene definida por su diagrama de radiación en el que se compara con la radiación que emitiría un radiador isótropo, que es un ente o antena ideal que radia la misma densidad de potencia en todas las direcciones del espacio.

La forma en la que una antena dirige la radiación se representa en coordenadas esféricas centradas en la antena, haciendo uso de los ángulos de coordenadas esféricas. El diagrama de radiación es una representación normalizada de la forma en que la antena radia en el espacio tridimensional. El diagrama es por su naturaleza tridimensional, aunque se suele trabajar con dos cortes perpendiculares de dicho diagrama, [Balanis, 2008], [Kraus 1988], [Pozar 2012].

Algunos de los parámetros más importantes y que definen el comportamiento de una antena son:

- Dirección de apuntamiento o dirección de máxima radiación en función de sus parámetros geométricos: Lóbulo principal
- Existencia o no de lóbulos secundarios y su dirección respecto el haz principal
- Directividad y eficiencia o, alternativamente, la Ganancia
- Ancho de haz: Ángulo subtendido entre las direcciones en las que la densidad de potencia radiada toma un valor de 3 dB por debajo de la densidad de potencia radiada máxima
- Nulos: Direcciones en que la densidad de potencia radiada es mínima

- Ancho entre nulos: Ángulo subtendido entre las direcciones en las que la densidad de potencia radiada es mínima
- Polarización
- Polarización cruzada

Estos parámetros dan una idea del comportamiento de una antena que, principalmente, queda caracterizada con su diagrama de radiación y su ganancia para la polarización a la cual ha sido diseñada y la polarización cruzada.

El parámetro que más interesa en el presente trabajo es la distribución tridimensional de la energía radiada como función de la posición de un observador a lo largo de un radio constante, que es de hecho el *diagrama de radiación*. Como la antena es un dispositivo pasivo recíproco [Pozar, 2012], esta distribución tridimensional también se produce en recepción, por lo que la señal procedente de la dirección del máximo del diagrama también es la dirección en la que se recibe más densidad de potencia.

El parámetro que se usa comúnmente para medir la capacidad de una antena de dirigir la potencia radiada en una dirección determinada es la **ganancia**. La directividad relaciona la densidad de potencia en cada dirección respecto de la potencia total radiada, y la ganancia relaciona la densidad de potencia en cada dirección respecto de la potencia entregada a la antena. Es por ello que la ganancia se puede deducir de la directividad y de la eficiencia de la antena.

Para entender formalmente la ganancia, es necesario antes introducir la intensidad de radiación y comprender el significado de la directividad para, finalmente, definir la eficiencia de la antena.

La **intensidad de radiación** en una dirección dada, se define como la energía radiada desde la antena por unidad de ángulo sólido. Se puede obtener al multiplicar la densidad de radiación por el cuadrado de la distancia.

$$U = r^2 \cdot W_{rad} \quad (15)$$

con U = Intensidad de radiación ($W/unidad\ de\ ángulo\ sólido$)

W_{rad} = densidad de radiación (W/m^2)

La **directividad** de una antena se define como la relación de la intensidad de radiación en una dirección dada desde la antena respecto a la intensidad de radiación promediada sobre todas las direcciones. [Kraus, 1988]

$$D = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (17)$$

donde U = intensidad de radiación ($W/unidad\ de\ ángulo\ sólido$), P_{rad} = energía total radiada.

La ganancia está directamente relacionada con la directividad y tiene en cuenta la eficiencia de antena y sus posibilidades direccionales.

La **eficiencia de la antena**, es un parámetro que se utiliza para tener en cuenta las pérdidas dentro de la estructura de la antena, que pueden deberse a reflexiones por disparidades entre la línea de transmisión y la antena (adaptación), pérdidas por conducción y pérdidas dieléctricas.

$$e_0 = e_r \cdot e_c \cdot e_d = e_r \cdot e_{cd} \quad (18)$$

con e_0 = eficiencia total

e_r = eficiencia de adaptación

e_c = eficiencia de conducción

e_d = eficiencia dieléctrica

$e_{cd} = e_c \cdot e_d$ es la eficiencia de la radiación de la antena, que se utiliza para relacionar la ganancia y la directividad.

Podemos relacionar la energía total radiada con la energía total entrante como sigue:

$$P_{rad} = e_{cd} \cdot P_{in} \quad (19)$$

Por último, la **ganancia de la antena** en una dirección dada, está definida como la relación de la intensidad de radiación emitida en esa dirección respecto a la intensidad de radiación que podría recibirse si la antena fuese un radiador isótropo.

$$G(\vartheta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\vartheta, \varphi)}{P_{in}} \quad (20)$$

Utilizando (*) se obtiene:

$$G(\theta, \varphi) = e_{cd} \cdot \left[\frac{4\pi U(\theta, \varphi)}{P_{rad}} \right] \quad (21)$$

$$G(\theta, \varphi) = e_{cd} \cdot D(\theta, \varphi) \quad (22)$$

El máximo valor de la ganancia está relacionado con el máximo valor de la directividad.

$$G_0 = G(\theta, \varphi) |_{max} = e_{cd} D_0 \quad (23)$$

La eficiencia de adaptación está relacionada con el coeficiente de reflexión. Si queremos introducir el término de ganancia absoluta, hay que tener en cuenta las pérdidas por reflexión,

$e_r = (1 - |\Gamma|^2)$ donde Γ es el coeficiente de reflexión.

$$G_{abs}(\theta, \phi) = e_r G(\theta, \phi) = (1-|\Gamma|^2) G(\theta, \phi) = e_r e_{cd} D(\theta, \phi) = e_0 D(\theta, \phi) \quad (24)$$

Similarmente, el máximo de la ganancia absoluta $G_{0\ abs}$ está relacionado con el máximo de la directividad D_0 por la ecuación $G_{0\ abs} = e_0 D_0$.

Por otro lado, la ganancia total es la suma de las ganancias parciales para las dos polarizaciones ortogonales de la señal recibida.

La ganancia y directividad son magnitudes relativas. En la mayoría de las veces, la antena de referencia es una fuente isotrópica sin pérdidas. Cuando no se indica la dirección, la ganancia se entiende que se refiere en la dirección del máximo de radiación.

En el presente trabajo se han utilizado las ganancias del *rayo inner* de Aquarius y ha sido necesario documentarse con trabajos anteriores que tenían que ver con la matriz de ganancia [Dinnat et al., 2011], [Dinnat et al., 2007], [Farrar et al., 2012], [Gourrion et al.,2013].

3. AQUARIUS, SMOS, MODIS. DATOS

3.1. SMOS

El satélite SMOS está formado por una plataforma llamada PROTEUS, que fue suministrada por CNES (*Centre National d'Etudes Spatiales*) y el radiómetro de microondas de apertura sintética interferométrico en banda L (1.4 GHz), llamado MIRAS), que fue desarrollado por la empresa española EADS-CASA Espacio. [Font et al., 2004].

MIRAS está formado por 69 pequeñas antenas equiespaciadas $d = 0.875 \lambda$, distribuidas en forma de *Y*. En cada brazo tiene 21 antenas llamadas LICEF (*Light weight Cost Effective Front-end*), más dos redundantes. La longitud del brazo es de 4.5 m y la resolución angular es 2° . Su período de revisita es de 3 días.



Figura 4: Figuración del satélite SMOS. Cortesía de la ESA

El motivo por el que la ESA se decidió por un radiómetro de apertura sintética, es que en un radiómetro, el tamaño de la antena requerido para un *footprint* de tamaño d es:

$$D = \lambda \cdot h/d \quad (25)$$

En banda L, $\lambda = 21 \text{ cm}$, la altura es de 700 km, por lo que se necesitaría una antena de 5 m de diámetro para tener 30 km de *footprint*. Poner un satélite de estas dimensiones en órbita resulta realmente complicado. [Gabarro, 2004]

El radiómetro sintetiza por la transformada de Fourier inversa, una imagen completa de T_b , desde la correlación cruzada de las medidas simultáneas de las antenas. Se obtiene una captura (o *snapshot*) de T_b del llamado FOV (*Field of View*) cada 1.2 s. En 1.2 s se producen 3 cambios electrónicos en la antena y, en cada cambio, los brazos del satélite pasan por las fases *HHH*, *HVV*, *VHV*, *VVH*, *VVV*, *VHH*, *HVH*, *HHV* [McMullan et al., 2008].

Cada pixel es observado en sucesivos *snapshots*, bajo diferentes ángulos (desde 0° a 65°) con una resolución espacial (de 30 a 60 km), obteniendo un sistema sobredeterminado en el que es posible recuperar parámetros geofísicos como la humedad del suelo o la salinidad.

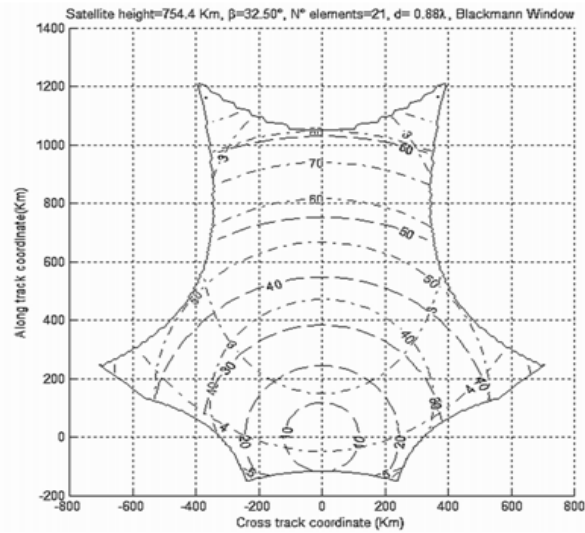


Figura 5: Figura generada por SMOS End-to-end Performance Simulator (UPC) que ilustra las medidas multiangulares y espacialmente variables de SMOS. (Ross Stone, 2002)

Debido a que no se cumple el criterio de Nyquist ($d \leq \lambda/3$), siendo d la distancia entre las antenas), la imagen presenta *aliasing*, efecto que causa que señales continuas distintas se tornen indistinguibles cuando se muestrean; la señal entonces no puede reconstruirse de forma unívoca a partir de la señal digital [Brigham, 1988]. En el caso de SMOS, el *aliasing* se produce espacialmente en los 69 LICEFS, por lo que sus *snapshots* tienen una forma muy particular de hexágono distorsionado (Figuras 5 y 6).

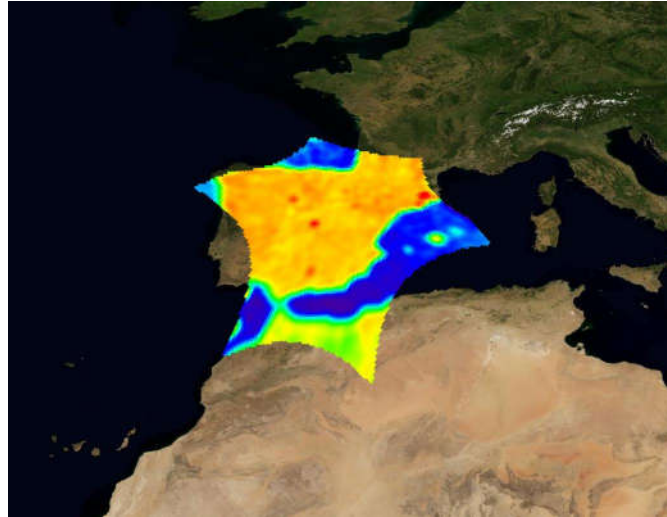


Figura 6: Footprint de SMOS. Cortesía ESA

SMOS es un satélite heliosíncrono de ESA, que se dedica a medir la humedad del suelo y la salinidad de los océanos. Este satélite fue lanzado en Noviembre de 2009, y opera en la banda L de microondas.

El radiómetro de este satélite mide la energía que llega de la superficie terrestre, además de otras contribuciones que deben identificarse y estimarse bien para garantizar un buen resultado en las medidas

$$\begin{aligned}
 T_{AP} &= e^{-\tau_{atm}} [Tb_surf + \Gamma (e^{-\tau_{atm}} Tb_gal + Tb_Atm_dn)] + Tb_Atm_up = \\
 &= e^{-\tau_{atm}} Tb_surf + e^{-2\tau_{atm}} \Gamma Tb_gal + \Gamma e^{-\tau_{atm}} Tb_Atm_dn + Tb_Atm_up \quad (26)
 \end{aligned}$$

donde $e^{-\tau_{atm}}$ = atenuación debida a la atmósfera, τ_{atm} = espesor óptico de la atmósfera y $\Gamma = 1 - e$ = coeficiente de reflexión de la superficie, $e^{-\tau_{atm}} Tb_surf$ = contribución de la superficie que se haya atenuada por la atmósfera, Tb_Atm_up = contribución de la atmósfera que va de camino al radiómetro, $e^{-\tau_{atm}} Tb_Atm_dn$

=contribución de la atmósfera reflejada por la superficie y atenuada por la atmósfera y $e^{-2\tau_{atm}}$ Tb_{gal} = contribución del *background cósmico* reflejada por la superficie y atenuada 2 veces por la atmósfera.

Como se ha comentado anteriormente, los datos de SMOS de este trabajo se han obtenido de CATDS desarrollado por CNES (<http://catds.fr>), [Berthon et al., 2013]

Los productos anteriores a la versión 2.6x (antes 31/12/2013), se encuentran proyectados sobre la malla *EASE-Grid (Equal - Area Scalable Earth Grid)*, también conocida como EPSG 3410. Esta malla utiliza la proyección global-cilíndrica de igual área y está definida como verdad en 30° N/S; además posee una resolución espacial de 25 x 25km² [Brodzik, et al, 2002].

Los productos 2.7 (después del 01/01/2014) utilizan la malla *EASE-Grid 2.0 (EPSG 3975)*, la cual tiene una resolución espacial de 15 x 15 km² [Brodzik, et al., 2012, 2014].

Para este trabajo se utilizaron datos de temperatura de brillo diarios tanto de pasadas ascendentes como descendentes del satélite, en polarizaciones *H (TB_H)* y *V (TB_V)* con un ángulo de incidencia fijo cada 5°, proporcionado en los productos de nivel 3 de SMOS, *L3TB*.

Estos productos se organizan en la web de CATDS como:

SM/GRIDDED/L3/OPER/{product type}/{year}/{day of the year}

donde *{product type}* puede ser *MIR_CDF3TA* (órbitas ascendentes) y *MIR_CDF3TD* (órbitas descendentes), y *{day of the year}* está entre 001 (1 de enero) y 365/366 (31 de diciembre)

Se han comparado los datos de SMOS con los datos de Aquarius del rayo *inner*, con observaciones próximas en el tiempo sobre las zonas de estudio definidas. El rayo *inner* tiene un ángulo de incidencia de 28.7°, como veremos a continuación, y en SMOS se ha seleccionado el ángulo de incidencia más próximo de 27.5°.

3.2. AQUARIUS

Es un satélite heliosíncrono, lanzado por NASA y CONAE (*Comisión Nacional de Actividades Espaciales*), situado a una altitud de 657 km, cuyo objetivo era medir la salinidad global de la superficie del mar. Esta misión pretendía observar y modelizar los procesos que relacionan las variaciones de la salinidad, los cambios climáticos en el ciclo global del agua y las variaciones en la circulación de los océanos. Aquarius realizaba observaciones de la salinidad superficial del mar, cubriendo la superficie de la Tierra, cada 8 días, proporcionando mensualmente mapas de salinidad con una resolución de 100 km y precisión de 0.2 psu [LeVine et al.,2015].

Este satélite llevaba a bordo 3 radiómetros de apertura real *pushbroom* en banda L con polarización completa, cada uno de ellos midiendo con ángulos de incidencia respectivos de 28.7° llamado rayo *inner*, 37.8° llamado rayo *middle*, y 45.6° llamado rayo *outer*. La T_B se mide a una frecuencia de 1.414 GHz, con las polarizaciones horizontal, vertical, y tercer y cuarto parámetros de Stokes. El satélite incluye un escaterómetro que opera a 1.26 GHz y que se utiliza en las correcciones de rugosidad de los datos de salinidad. Los tres rayos apuntan hacia la parte de la noche para evitar el *sunlint* (reflexión directa del Sol sobre el satélite) (*Aquarius User Guide, dataset versión 2.0*) [PO.DAAC, 2015].

Los *footprints* de estos rayos tienen un tamaño de 74 km *along-track* x 94 km *cross-track* para el rayo *inner*, 84 km x 120 km para el rayo *middle* y 96 km x 156 km para el *outer*, produciendo un *cross-track* total de 370 km.

La cobertura global se conseguía en 7 días. Cada día había 14 ~ 15 semiórbitas, las cuales empiezan al pasar por el Polo Sur y duran ~98 min.

La característica más prominente del satélite es una antena reflectora de 2.5 m de diámetro con 3 “*bocinas de alimentación*” (*feed horn*).

Aquarius cruza el Ecuador con una pasada descendente a las 6 a.m. y con una pasada ascendente a las 6 p.m., de forma opuesta a como lo hace SMOS.

El modelo forward para Aquarius sigue las directrices de la ecuación de transferencia radiativa que describieron *Wentz and Meissner* en el año 2000 en el AMSR-E ATBD [Wentz et al., 2000]. Así pues, las componentes *V-pol* y *H-pol* de la temperatura de brillo vienen dadas por:

$$T_{BE,P} = T_{BU} + \tau[E_P T_S + T_{BP\Omega}] \quad (27)$$

donde P denota la polarización V ó H , T_{BU} es la temperatura de brillo de la radiación atmosférica hacia arriba, τ es la transmisividad atmosférica, E_P es la emisividad de la superficie de la tierra (K) y $T_{BP\Omega}$ es la radiación del cielo hacia abajo que se dispersa fuera de la superficie de la Tierra en la dirección de observación. [Wentz et al., 2011].

Los datos de Aquarius se encuentran archivados en PO-DAAC (*Physical Oceanography Distributed Active Archive Center*) e incluyen todos los niveles. Durante este trabajo se han ido mejorando las versiones de los productos, afectando esto a los niveles 2 y 3.

CADENA DE PROCESADO DE AQUARIUS

Level 0 → Está formado por los datos binarios en bruto bajados desde el satélite. Se envían 4 archivos por día. Estos datos se entregan al *Aquarius Ground Segment* (AGS), para ser procesados.



Level 1A → Se ponen en orden los datos del nivel 0, por fecha, y tiempo, y se incorporan los datos en un archivo de una órbita (~98 minutos). Los archivos contienen los *block attributes*, la telemetría, navegación y los datos en bruto de Aquarius. Se producen 14 ó 15 órbitas por día. Una órbita empieza al pasar el Polo Sur. Solamente los datos de mejor calidad se procesan y utilizan para crear las carpetas de los datos L1A.



Level 2 → Se generan a partir de los datos L1A. Cada carpeta contiene los datos de una órbita, teniendo 14 ó 15 órbitas por día. Los productos L2 contienen las temperaturas de brillo del radiómetro, los datos de NRCS (*Scatterometer Normalized Radar Cross-Section*), salinidades del mar, y las velocidades del viento derivados de estos. También contienen datos auxiliares, como la calidad de los *flags*, los *block data* y los datos de navegación. Así, Aquarius consigue datos de los 3 rayos. Todos estos datos tienen una dimensión nx3.



Level 3 → Los datos de nivel 3 son mapas con promedios en la *grid* de la salinidad de la superficie del mar y la velocidad del viento. Estos mapas de salinidad, velocidad del viento y datos auxiliares son generados con las mismas resoluciones espaciales y temporales. Cada archivo tiene una resolución de 1 grado y los valores representan los promedios para intervalos temporales predefinidos, diarios, una semana, mensual, estacional (3 meses) y anual. Estos productos se denominan R7 (*running7*) = una semana, R28 (*running 28*) = mensual, MC (*monthly climatology*), SC = (*seasonal climatology*)

Para este trabajo se han utilizado los datos de nivel 2 de Aquarius. Estos tienen una estructura $Q[yyyy][ddd][hh][mm][ss].L2_SCI_V[n.n]$, donde *yyyy* es el año, *ddd* el día del año (de 001 a 365 ó 366 si es bisiesto), *hh* la hora, *mm* los minutos y *ss* los segundos, que indican el comienzo de la adquisición de los datos. La inicial *L* precede al indicador de nivel, *SCI* indica que los datos han sido procesados con parámetros científicos. $V[n,n]$ es la versión de los datos.

La variable estudiada en Aquarius es *rad_toa_X_nolc* (Temperatura de brillo en TOA en polarización *X* a la que se ha aplicado la corrección por rotación de Faraday). Los datos proceden de las versiones *v2* y *v3*, obtenidos de los servidores de datos de NASA.

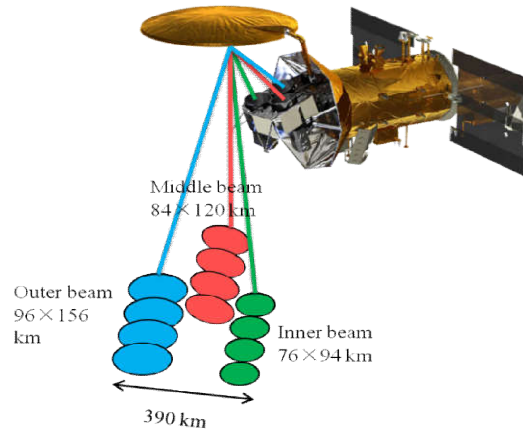


Figura 7:Footprints de los tres rayos de Aquarius

(<<http://nsidc.org/data/docs/daac/aquarius/aq2-sm/images/size-of-aquarius-beams.png>>)

3.3. MODIS

El instrumento MODIS opera sobre las naves *Terra* y *Aqua*.

Terra es un satélite de órbita polar heliosíncrona que pertenece a NASA. Se puso en órbita en diciembre de 1999. Este satélite orbita la Tierra una vez cada 98.9 minutos, con un ciclo de repetición de 16 días, inclinación de 98.2° con respecto al Ecuador y altitud media de 705 km (Wolfe., 2002). Ofrece cobertura global cada uno o dos días para cualquier punto de la Tierra.

MODIS es un radiómetro de barrido transversal por espejo oscilante que tiene un FOV de 110° y realiza un patrón de escaneado de $\pm 55^\circ$. Tiene una anchura de barrido de visualización de 2330 km y ve toda la superficie cada 1 ó 2 días. Sus detectores miden en 36 bandas espectrales entre 0.4 μm y 13.385 μm y, a partir de sus observaciones realizadas con una resolución espacial de

250 m, se obtienen productos con resoluciones de 500 m y de 1000 m de un modo operacional.

Debido a la gran cantidad de bandas espectrales, se pueden obtener muchos productos importantes en los estudios sobre procesos de la Tierra, como la reflectividad superficial, TSS, el albedo, y parámetros de vegetación como el LAI, NDVI, EVI,... MODIS también registra la cobertura de nubes y sus propiedades, así como la cantidad de partículas de aerosoles. MODIS ayuda a los científicos a determinar la cantidad de vapor de agua en una columna de la atmósfera y la distribución vertical de temperatura y vapor de agua. En la página web terra.nasa.gov/about/terra-instruments/modis, se encuentran especificadas las características físicas del sensor y sus bandas espectrales.

MODIS realiza un seguimiento de los cambios a gran escala en la biosfera. Mide la actividad fotosintética de la Tierra y las plantas marinas para proporcionar una mejor estimación de los gases de efecto invernadero. Estas mediciones permiten rastrear las fuentes y sumideros de dióxido de carbono.

Los productos obtenidos de MODIS se clasifican en distintos niveles. Casi en tiempo real se procesan los datos de *nivel 0* y se georreferencian para obtener los datos de *nivel 1A*. Con los datos de *nivel 1A* se obtienen las radiancias calibradas, que constituyen el *nivel 1B*. El *nivel 2* se obtiene a partir de los datos de *nivel 1A*, *1B*, y los datos auxiliares. Una vez obtenidos los datos de *nivel 2*, se les aplica la máscara de nubes y los perfiles atmosféricos (Tran y Yashuoka, 2004). A partir del *nivel 2*, los datos son sometidos a distintos algoritmos para obtener los diferentes productos que dispone MODIS.

En este trabajo, se utilizan los productos *MOD11A2* y *MOD13A2* de MODIS, para calcular el índice de sequedad TVDI; estos productos pertenecen al nivel

3 de datos. Los archivos de los datos se han almacenado en el formato HDF (*Hierarchical Data Format- Earth Observing System*). Los datos contienen el conjunto de datos científicos y los metadatos donde se describe la proyección y la malla, las fechas y el tiempo de adquisición, estadísticas sobre la calidad de los datos, etc. [Wan, 2006]. En los metadatos se encuentra especificado el *UpperLeftPointMtrs* que es la esquina izquierda de arriba del píxel superior izquierdo y el *LowerRightMtrs*, que identifica la esquina derecha de abajo del píxel inferior derecho de la imagen. Con estos datos se pueden saber las coordenadas de los 1200 x 1200 píxeles que contiene la imagen, para referenciarlas y poder comparar con los datos de los otros satélites. Se han consultado trabajos anteriores [Garcia et al., 2007].

MOD11A2 (“*Land Surface Temperature and Emissivity 8-Day 13 Global 1 km*”) es un producto del sensor MODIS que proporciona un promediado de LST (*Land Surface Temperature*) de 8 días por píxel en una rejilla de 1200 x 1200. Cada valor del píxel es un promedio simple de todos los datos de LST correspondientes a *MOD11A1* dentro de los 8 días. Este producto tiene las bandas de temperatura de superficie de día y de noche, los indicadores de calidad (*QC*), las bandas 31 y 32 de MODIS, el error-LST, ángulo de visión, tiempo de visión, latitud y longitud. Tiene una resolución espacial de 1 km y la proyección es sinusoidal.

MOD13A2 (“*MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3Global 1km Grid SIN*”), proporciona valores de índices de vegetación de los píxeles. El algoritmo elige los mejores valores de los píxeles disponibles de todas las adquisiciones en esos 16 días. El criterio utilizado prima que haya un bajo contenido de nubes, bajo ángulo de visión y el mayor valor NDVI/EVI (*Normalized Difference Vegetation Index / Enhanced Vegetation Index*). En

los datos se proporcionan las bandas de los índices de vegetación, las bandas de calidad y reflectancia, y las bandas 1 (rojo, 645 nm), 2 (infrarrojo, 858 nm), 3 (azul, 469 nm) y 7 (infrarrojo medio). Los productos NDVI y EVI se calculan enmascarando el agua de las nubes y sus sombras.

En este capítulo se han descrito las características técnicas de los satélites Aquarius y SMOS y su cadena de procesado, de la cual se derivan sus productos. Las distintas resoluciones espaciales y temporales fueron un gran hándicap al que tuvimos que enfrentarnos. Los métodos que vienen en el capítulo 6, muestran la manera en que se abordaron los problemas para poder comparar las temperaturas de brillo de ambos. Se ha incluido la descripción del sensor MODIS, pues sus datos son necesarios para aplicar el método del TVDI

4. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS

Durante 3 años y medio han coincidido en el tiempo, las dos misiones de Observación de la Tierra, Aquarius y SMOS, de dos agencias espaciales, NASA y ESA, que han recopilado datos de varias variables geofísicas como temperaturas de brillo, humedad de suelo y salinidad, que tienen una gran importancia tanto en los modelos matemáticos de predicción del tiempo como en el ciclo del agua. Esta coincidencia ha sido una oportunidad de oro, en el ámbito científico, para comparar y validar los datos que se han ido obteniendo.

Este trabajo ha aprovechado esta coincidencia, para intercomparar los datos de temperaturas de brillo de los dos satélites, utilizando 4 métodos: método de áreas, método de usos de suelo, método del TVDI y método de la matriz de ganancia, en varias localizaciones muy dispares con vegetación y usos del suelo muy variados. Se habrá conseguido el objetivo, si este trabajo contribuye a que se mejoren los resultados en la validación de misiones actuales y futuras.

El plan de trabajo se ha materializado siguiendo los siguientes objetivos:

- Descarga y almacenamiento de los datos, tanto de Aquarius y MODIS, como de SMOS. En los datos de Aquarius y SMOS se ha tenido que descomprimir y, además en los de Aquarius, colocar la extensión *.hdf* para que pudieran leerse en *MatLab* y *ArcGis*.
- Aplicación de los métodos de áreas, de usos de suelo, TVDI, y matriz de ganancia, que se describen más adelante. Con el programa *ArcGis* y en una zona adecuada de España se procedió para conocer los días en que había

datos, y obtener unos resultados preliminares. Al tener que procesar datos de 3 instrumentos, fue necesario automatizar el proceso. Se desarrollan diversos scripts MatLab para procesar los datos que se validan en esta fase del trabajo.

- Este procedimiento se extendió al resto de datos disponibles, se procesaron todos los datos de los tres años y medio, se hicieron las estadísticas y se compararon los distintos métodos y procedimientos.

Hasta ahora hemos presentado una sencilla introducción a la teledetección en la banda de microondas en el Capítulo 1. Desarrollamos el marco teórico en el que está fundamentada la tesis en el Capítulo 2. El Capítulo 3 describe los satélites y los datos que se han utilizado, así como las diferentes resoluciones espaciales de los satélites y la forma en que se ha abordado esta cuestión. En este Capítulo 4, definimos los objetivos del trabajo, que se materializará en los Capítulos 5, 6, y 7:

- Las zonas de estudio que se han considerado se describen en el Capítulo 5.
- Los métodos de comparación que se han utilizado, y su análisis así como su modificación con el fin de obtener mejores resultados mejores en las comparaciones, se presentan en el Capítulo 6.
- Los resultados y las estadísticas en todas las zonas bajo estudio se presentan en el Capítulo 7.
- Finalmente se presentan las conclusiones en el Capítulo 8.

5. ZONAS DE ESTUDIO

Al elegir las zonas de estudio que vienen a continuación, se ha pretendido, que fueran zonas variadas, con vegetaciones y usos de suelo diferentes y ubicaciones muy dispares, para comprobar la respuesta de los métodos de validación que estamos utilizando en el trabajo. En un principio, se había incluido la zona de Dome C, pero durante el estudio se tuvo que desechar esta idea, porque no se pudieron rellenar con datos SMOS los 5600 km² del *footprint* del rayo *inner* de Aquarius, incluso se rebajaron los criterios de calidad que se utilizaban en otras zonas con el fin de obtener datos, obteniendo resultados nulos en todos los intentos. Los trabajos que otros autores han hecho de comparación de temperaturas de brillo de Aquarius y SMOS en Dome C, han tomado como zona de estudio, un área de 40 km², que se corresponde con el *alias free* de SMOS [Brucker et al., 2014], [Macelloni et al., 2013] pero el *footprint* de Aquarius es mucho mayor que esa superficie. La primera zona donde se fue comprobando los métodos, fue la de *España*. Las zonas de *Fort Peck*, *Park Falls*, *Sky Oaks*, y *Santa Rita* en EEUU, son también zonas actuales de validación del satélite SMAP.

5.1. Amazonas

Es el bosque tropical más extenso del mundo y uno de los ecosistemas de mayor diversidad. La selva se desarrolla alrededor del río Amazonas y su cuenca fluvial. En la Amazonía colombiana hay una intrincada red fluvial que desemboca directamente al gran río Amazonas. Estos ríos son el Caquetá, el Pitumayo, Vaupes, Guania.

Las altas temperaturas favorecen el desarrollo de una vegetación tupida y exuberante, siempre verde.

Toda la flora de la selva tropical húmeda sudamericana está presente en la selva amazónica. Se calcula que el 20% de las especies mundiales de plantas se encuentran aquí. En los bosques se encuentran una cantidad increíble de árboles de todo tipo: *itahuba*, *tajibos*, *caricari*, *cedro*, *ruta barcina*, *mandrilo*,...



Figura 8: Imagen de la ubicación latitud = -1.5° , longitud = -72°

5.2. España

La zona de estudio se encuentra situada dentro de las coordenadas: latitud [38.65° N, 39.78° N], y longitud [-4.78° E, -2.4° E]. Esta zona se ha escogido después de ver las órbitas de Aquarius dentro de la Península Ibérica, porque es una zona relativamente homogénea y porque vamos a obtener los datos de SMOS con un método de usos de suelo que tenga el *footprint* de Aquarius.

Al principio de comenzar este trabajo, la localización fue más al norte, cerca de Madrid, pero en las versiones antiguas de SMOS, había un vacío de datos en el centro de la península, debido al *sun glint*, por lo que fue necesario cambiar de ubicación a la actual. Este problema lo ha solucionado CATDS en las nuevas versiones de los datos.



Figura 9: Imagen de la ubicación latitud = 39.35°, longitud = -3.63°

La zona se encuentra en la provincia de Toledo, cerca de Madridejos. Tiene un clima mediterráneo interior o continental. Tiene inviernos muy fríos y veranos cálidos porque no le llega la influencia marina.

La vegetación de la comarca tiene en los encinares y en los bosques de melojos la máxima expresión, siendo destacables las masas arbóreas de S. Pablo de los Montes, los Yébenes, Hontanar o Navahermosa.

En el sotobosque de los encinares son frecuentes arbustos como el torvisco, la olivilla, el espino negro.

A medida que aumenta la altitud y la precipitación, los encinares son sustituidos por los melojares. Los ríos más importantes son Cedená y Torcón, ambos afluentes del río Tago. También el río Mulagro que vierte sus aguas al Bulloque. Cerca de las riberas de estos ríos crecen alamedas, saucedas o choperas, también olmos, fresnos, almeces, sauces, carrizales.

5.3. Fort Peck

La estación de Fort Peck se encuentra en la reserva de Fort Peck Tribes, es una reserva india de las naciones *sioux* y *assiniboine* en Yellowstone, aproximadamente 15 millas al norte de Poplar, Montana. Está rodeada de campos de gramíneas y cultivos de cereales. En ella se encuentra una presa y un lago del río Missouri. Tiene un clima semiárido.

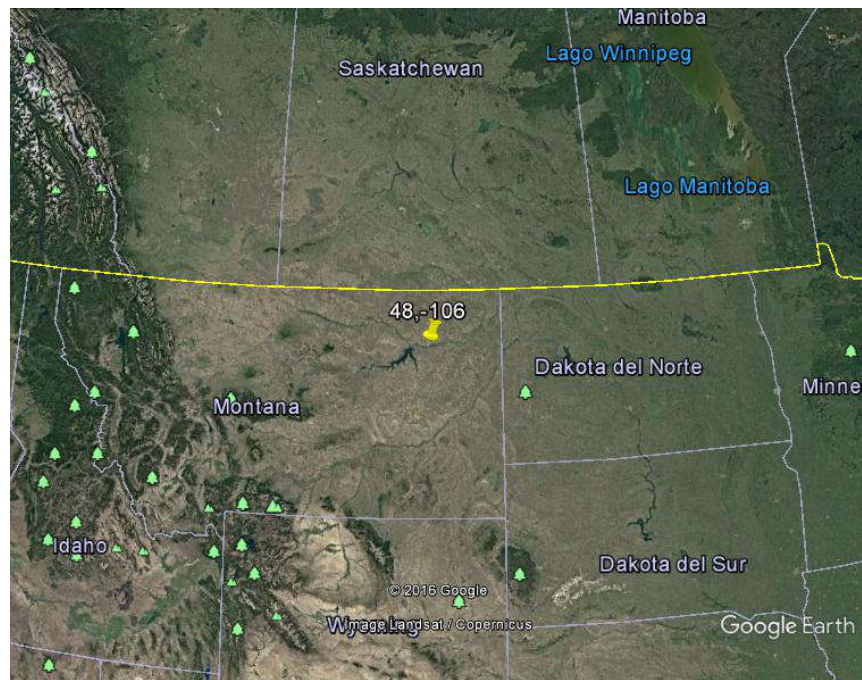


Figura 10: Imagen de la ubicación latitud = 48.3077°, longitud = -106°

5.4. Marruecos

La zona de estudio se encuentra enmarcada en la zona de la montaña Rif del país, que es una zona de tierras altas, paralela a la costa mediterránea. En esta zona desemboca el río Muluya. En ella predomina el clima mediterráneo, con temperaturas altas en verano y lluvias invernales fuertes en la parte Rif Occidental y que descienden en dirección al Sur y al Este.

La vegetación es la típica del Mediterráneo, es decir bosques de pinos, con ausencia de sotobosque y arbustos llamados maquis, con madroños, brezos,

olivares, naranjos y otras plantas similares a las de la Península Ibérica (palmitos, matorrales de plantas aromáticas).



Figura 11: Imagen de la ubicación latitud = 34.6°, longitud = -5°

5.5. Pacífico Sur

La circulación superficial de las aguas del Pacífico es generalmente en el sentido contrario de las agujas del reloj. Cerca del ecuador, las temperaturas oscilan alrededor de 29°C.

La salinidad varía con la latitud. Cerca del ecuador, el agua es menos salina que la de las latitudes medias debido a la precipitación ecuatorial abundante a lo largo del año. En este océano se dan los fenómenos de El Niño (un calentamiento anormal de las aguas superficiales en su zona ecuatorial y tropical cercana a la costa sudamericana) y La Niña (fenómeno contrario, un enfriamiento de las aguas del mar).

Sus aguas ricas en nutrientes proceden de la corriente Circumpolar.

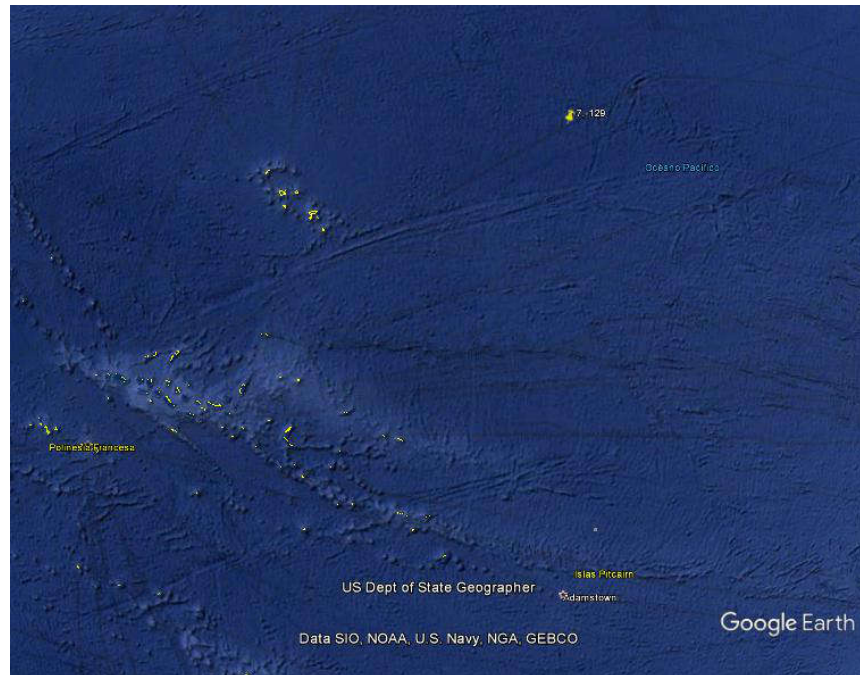


Figura 12: Imagen de la ubicación latitud = -7° , longitud = -129°

5.6. Park Falls

Se encuentra en el estado de Wisconsin, en el extremo norte de la cuenca del río Mississippi en el Bosque Nacional de Chequamegon. Está a una altitud de 473 metros.

La cobertura de suelo que tiene es de bosque (abeto, arce, tilo, pino rojo, abedul...) y humedales (40%) que incluyen alisos, cedros, ...

Las características geomorfológicas en el terreno circundante son principalmente el resultado de la actividad glacial. Más específicamente, pequeños cambios de elevación, del orden de 20 m que crean un paisaje mixto de humedales y bosques de tierras altas. Las actividades de explotación forestal incluyen el adelgazamiento y los cortes claros, y se concentran en las regiones de montaña. Park Falls es miembro del Estudio de Ecosistema-Atmósfera de Chequamegon, que también incluye las zonas Willow Creek, Lost Creek y Sylvania Wilderness (Berger et al., 2001, Davis et al., 2003, Wang et al., 2005).

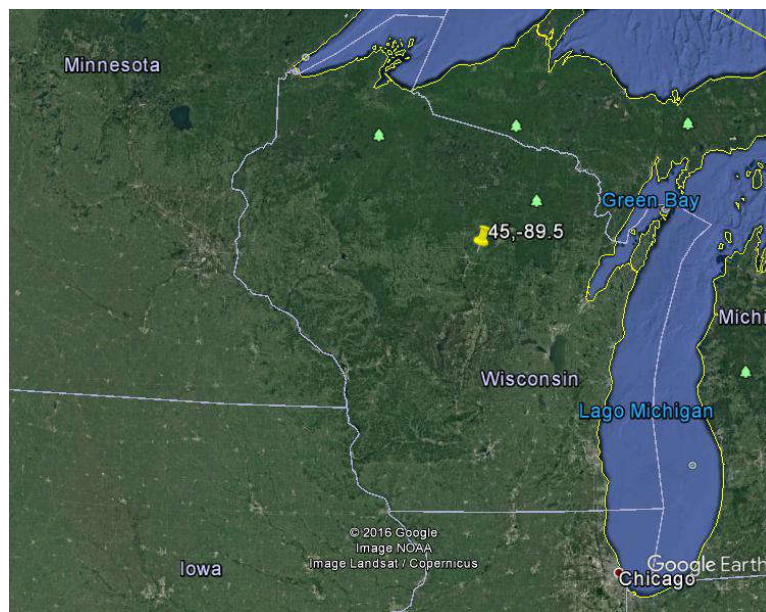
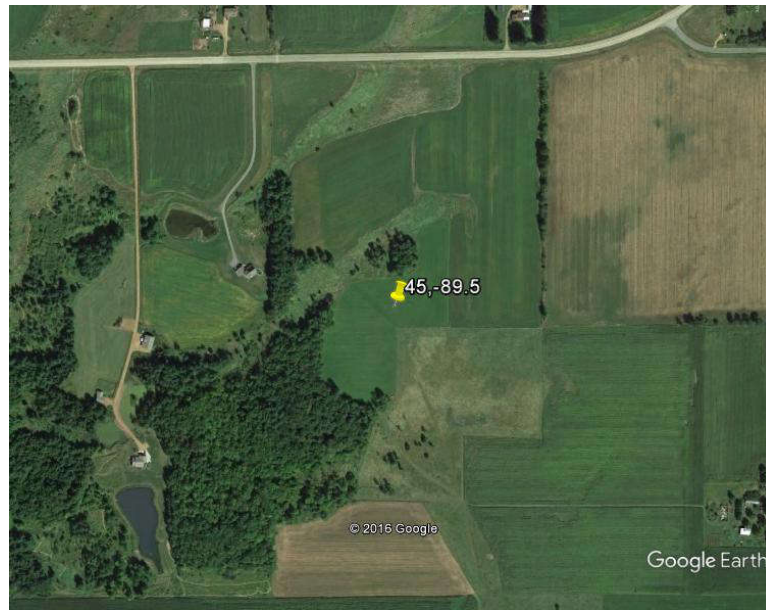


Figura 13: Imágenes de la ubicación $latitud = 45.9459^\circ$, $longitud = -89.5^\circ$

5.7. Sahara Sur-Chad

El Sahara está formado por dunas de arena (erg), mesetas rocosas (hamada), llanuras de grava (reg), valles secos, oasis y llanos salinos (*shatt* o *chott*).

Sus temperaturas varían entre -21°C y 59°C . Esta zona casi no tiene vegetación. Las plantas están adaptadas al medio ambiente para reducir la evaporación y aumentar la absorción del agua: hojas pequeñas, raíces muy largas para llegar a las capas más profundas y más húmedas del subsuelo, plantas suculentas, tamariscos, acacias. La palmera datilera se encuentra en los oasis.

La mayor parte de los ríos y corrientes del Sahara son estacionales o intermitentes. Los acuíferos subterráneos pueden alcanzar ocasionalmente la superficie, formando oasis.

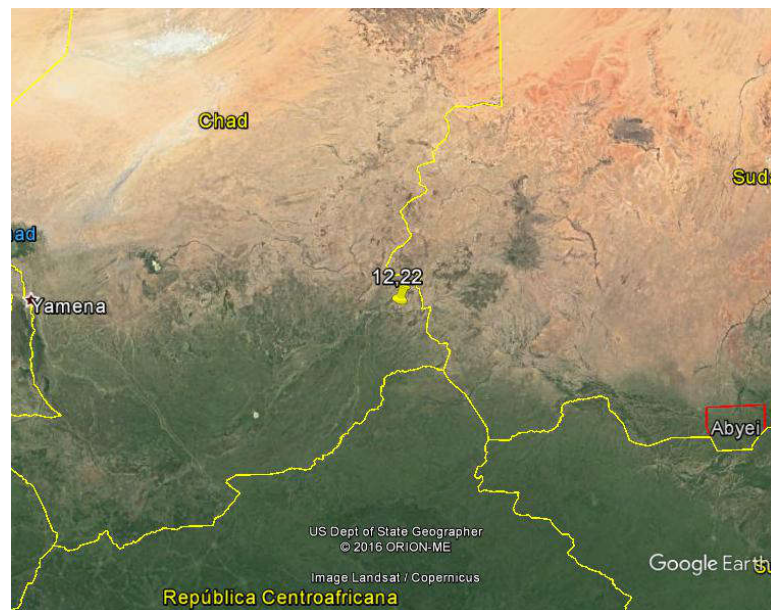


Figura 14: Imagen de la ubicación latitud = 12° , longitud = 22°

5.8. Santa Rita

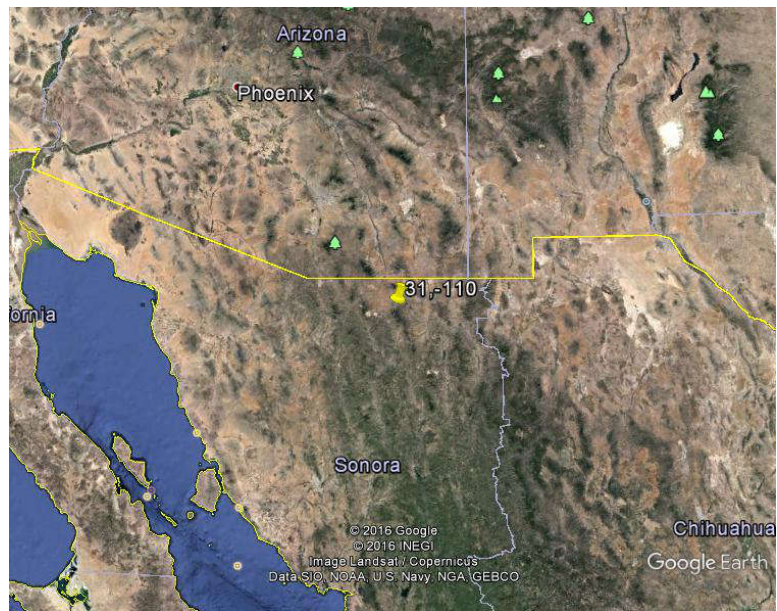
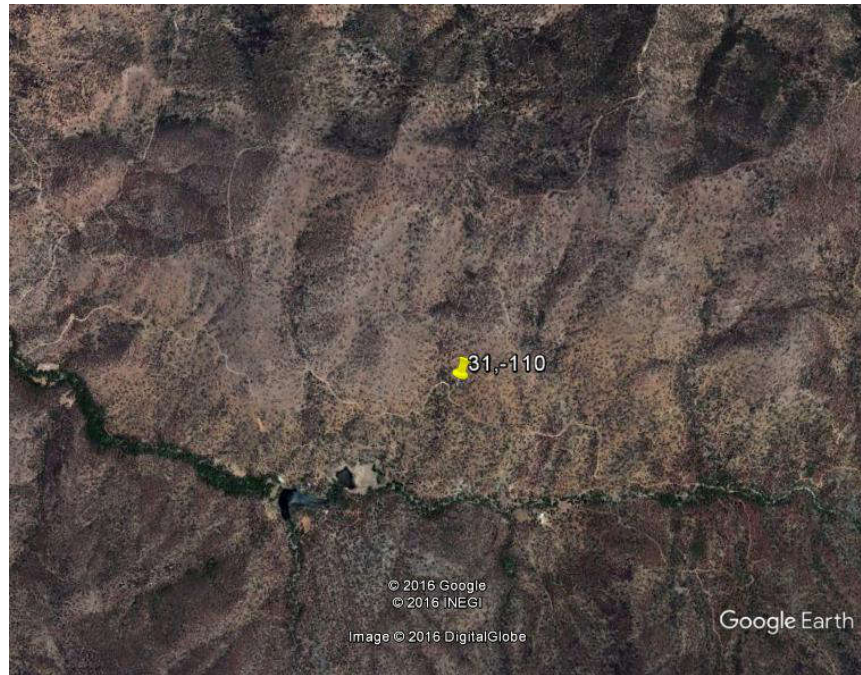


Figura 15: Imágenes de la ubicación latitud = 31.7894°, longitud = -110.8277°.

Altitud de 1291 metros. Cobertura de matorrales. Santa Rita (SRER = *Santa Rita Experimental Range*), fundada en 1903, es el área de investigación más antigua mantenida por el *Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA Forest Service)* y ha sido una zona principal para la investigación pionera sobre el mejoramiento y manejo de pastizales semiáridos en el suroeste de USA. El SRER es generalmente visto como una instalación de clase mundial debido a las bases de datos históricas y biológicas a largo plazo que se han mantenido desde su creación. En ella se han producido importantes cambios vegetales debido a los procesos naturales y las prácticas de manejo [Medina, 1996]. El pastoreo por ganado fue permitido en 2004 y 2005. Durante los últimos 3 años, el pastoreo ha sido cerrado en el área local del SRER.

5.9. Sky Oaks



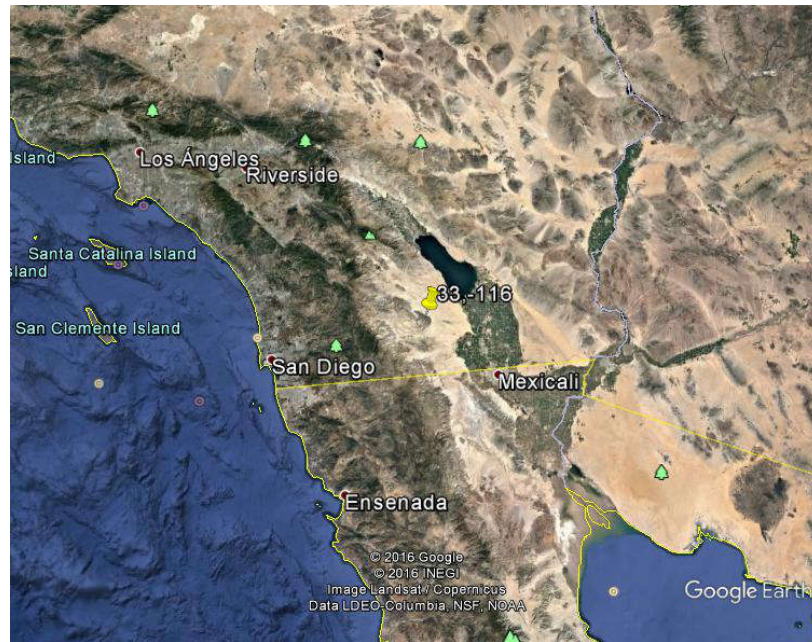


Figura 16: Imágenes de la ubicación latitud = 33.38444°, longitud = -116.6402°

Es una zona que tiene una vegetación de chaparral, asociada a un clima mediterráneo, que cubre la mitad de un terreno áspero y rocoso. Está situada a una altitud de 1408 metros. Este chaparral tiene bastantes años y cuenta con una altitud media de 2,3 m.

La precipitación se limita casi exclusivamente a los meses de invierno. Durante el verano y principios del otoño, los vientos calientes y secos de Santa Ana desde el noroeste traen el calor del desierto hasta el lugar.

Haciendo una recopilación, las zonas que se han elegido para hacer las comparaciones, consisten en zonas homogéneas como Amazonas, Sahara, Pacífico-Sur, Fort Peck (gramíneas), Santa Rita (matorrales) y Sky Oaks (chaparral) y las zonas heterogéneas como España, Marruecos y Park Falls.

Las latitudes nos permiten también clasificar estos lugares, como de latitud baja y por lo tanto son zonas tropicales o semitropicales como Amazonas, Sahara, Pacifico- Sur, Marruecos, Santa Rita y Sky Oaks, y las restantes como latitudes medias como España, Fort Peck, Park Falls.

Trabajar con zonas diversas permite comprobar cómo los métodos de comparación que proponemos entre SMOS y Aquarius se comportan bajo diferentes condiciones de homogeneidad, usos del suelo, etc.

6. METODOLOGÍA

Durante la realización de este trabajo, se han ido ensayando varios métodos de validación. El fin que siempre se ha perseguido ha sido mejorar los resultados que se iban obteniendo.

Se ha comparado los datos de dos satélites muy diferentes, por lo que ha sido necesario utilizar diversos métodos para hacer coincidir los datos sobre la misma superficie. ¿Cómo se ha realizado esto?.

Primero de una manera estática, utilizando el método intuitivo, que es el método de áreas, es decir haciendo una media pesada de las temperaturas de los píxeles de SMOS, contenidos dentro del *footprint* de Aquarius.

Después introdujimos los usos del suelo dando un peso diferente a la temperatura de brillo en función del uso del suelo. Empezamos por aplicarlo a la zona española, utilizando la clasificación SIOSE (*Sistema de Información sobre la Ocupación del Suelo en España*) (SIOSE, 2017). En este método se obtienen las temperaturas de cada uso de suelo para reconstruir una temperatura de SMOS que coincidiera con el *footprint* de Aquarius. Como esta clasificación es estática y no tiene en cuenta los cambios estacionales durante el año, se pensó que se mejorarían los resultados si se cambiase a un método más dinámico, por ejemplo, utilizando el TVDI (*Temperature Vegetation Dryness Index*), un índice de sequedad que puede obtenerse de forma operativa a partir de productos operacionales de MODIS. El método de los usos de suelo sólo se probó en la zona de España, por la razón mencionada anteriormente.

Todos los métodos que han sido mencionados anteriormente, se han englobado como métodos geofísicos, si bien el método de las áreas puede considerarse exclusivamente geométrico. [Benlloch et al., 2015a], [Benlloch et al., 2015b].

El último método que se ha probado y que se ha revelado como el mejor, ha sido el *método de la matriz de ganancia*. En él se ha pesado los datos de SMOS, teniendo en cuenta la posición que ocupaban en el diagrama de antena de Aquarius.

6.1. MÉTODOS GEOFÍSICOS

6.1.1. Método de áreas

El primer paso fue localizar las coordenadas de los píxeles de SMOS que se encuentran proyectados en la malla EASE-Grid (*Equal-Area Scalable Earth- Grid*) y la elipse del *footprint* de Aquarius, y superponerlos para saber cuáles eran los píxeles que intersectaban con la elipse.

En principio se utilizó el programa ArcGis al que se cargaban dos *shapefiles* con los datos de Aquarius y SMOS, y se hacían las intersecciones para conocer el peso de cada píxel de SMOS. A partir de unos ensayos manuales primeros, se programó el proceso completamente con MatLab para abordar automáticamente todas las zonas de estudio.

En el método del área sólo se han considerado los datos del día juliano (días numerados desde 1 a 365 ó 366 si es bisiesto) en que hubiese dato de Aquarius y hubiese datos de todos los píxeles de SMOS que estaban dentro del píxel de Aquarius. El valor de la temperatura de brillo de SMOS a la escala de Aquarius es

la combinación lineal de las temperaturas de brillo de los pixeles de SMOS que están dentro. A cada pixel se le ha asignado un peso que es:

$$\frac{\text{Área de la superficie del pixel que está dentro del footprint de Aquarius (km}^2\text{)} / \text{Área total del footprint de Aquarius (5670.565754 km}^2 \rightarrow \text{5670.57 km}^2\text{)}}{1}$$

El nuevo dato de temperatura de brillo se obtiene mediante la ecuación:

$$TB_{AQUARIUS} = \sum \frac{\text{Área intersectada entre cada pixel SMOS y Aquarius}}{\text{Área total de Aquarius}} \cdot TB_{\text{pixel SMOS}} \quad (28)$$

6.1.2. Método de usos del suelo

Como ya se tenían localizadas las coordenadas de los pixeles de SMOS que se encuentran proyectados en la malla EASE y la elipse del *footprint* de Aquarius, y se habían superpuesto para saber cuáles eran los pixeles que intersectaban con la elipse, se escogieron 6 pixeles que estuviesen completamente contenidos en el *footprint* de Aquarius (Figura 17).

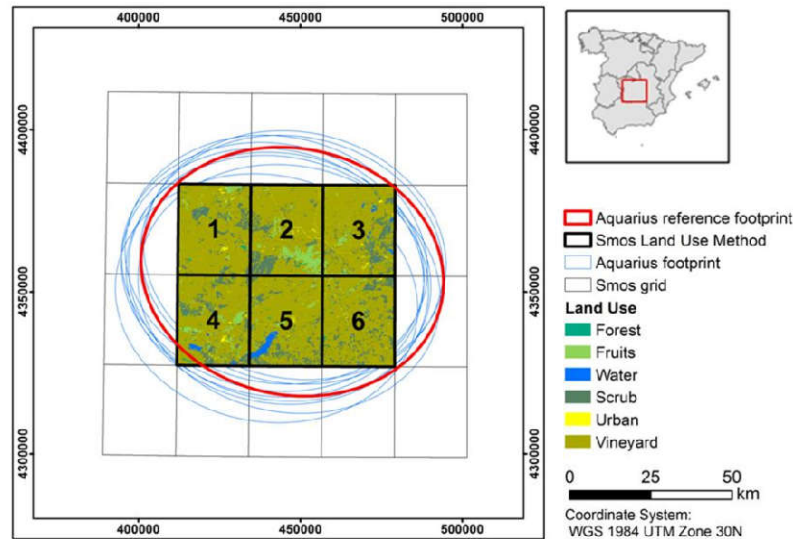


Figura 17: Mapa de los usos del suelo de la zona de España con las elipses de Aquarius y los pixeles de SMOS

Como es natural, en esa zona hay bastantes usos de suelo, que se tuvieron que agrupar en sólo seis usos, pues sólo seis pixeles quedaban totalmente dentro del footprint de Aquarius.

Para cada día juliano (días numerados desde 1 a 365 ó 366 si es bisiesto) que hubiese dato de Aquarius y de estos 6 pixeles se ha resuelto el siguiente sistema de ecuaciones:

$$a_{11}Tb_{bosque\ mediterraneo} + a_{12}Tb_{matorral} + a_{13}Tb_{láminas\ de\ agua} + a_{14}Tb_{viña} + a_{15}Tb_{frutales} + a_{16}Tb_{urbano} = Tb_{pixel\ 1}$$

$$a_{21}Tb_{bosque\ mediterraneo} + a_{22}Tb_{matorral} + a_{23}Tb_{láminas\ de\ agua} + a_{24}Tb_{viña} + a_{25}Tb_{frutales} + a_{26}Tb_{urbano} = Tb_{pixel\ 2}$$

$$a_{31}Tb_{bosque\ mediterraneo} + a_{32}Tb_{matorral} + a_{33}Tb_{láminas\ de\ agua} + a_{34}Tb_{viña} + a_{35}Tb_{frutales} + a_{36}Tb_{urbano} = Tb_{pixel\ 3}$$

$$a_{41}Tb_{bosque\ mediterraneo} + a_{42}Tb_{matorral} + a_{43}Tb_{láminas\ de\ agua} + a_{44}Tb_{viña} + a_{45}Tb_{frutales} + a_{46}Tb_{urbano} = Tb_{pixel\ 4}$$

$$a_{51}Tb_{bosque\ mediterraneo} + a_{52}Tb_{matorral} + a_{53}Tb_{láminas\ de\ agua} + a_{54}Tb_{viña} + a_{55}Tb_{frutales} + a_{56}Tb_{urbano} = Tb_{pixel\ 5}$$

$$a_{61}Tb_{bosque\ mediterraneo} + a_{62}Tb_{matorral} + a_{63}Tb_{láminas\ de\ agua} + a_{64}Tb_{viña} + a_{65}Tb_{frutales} + a_{66}Tb_{urbano} = Tb_{pixel\ 6}$$

Los coeficientes a_{ij} son los porcentajes del uso suelo j en el pixel i y forman la matriz A . Las incógnitas X son:

$$Tb_{bosque\ mediterraneo}, Tb_{matorral}, Tb_{láminas\ de\ agua}, Tb_{viña}, Tb_{frutales}, Tb_{urbano}$$

El sistema es $A \cdot X = b$ siendo b el vector columna de las temperaturas de brillo de los 6 pixeles. Se resuelve haciendo $X = A^{-1} \cdot b$. Una vez resuelto el sistema se calcula una nueva temperatura de brillo de SMOS que es la combinación lineal de las temperaturas de brillo de los seis usos del suelo. Los pesos que se utilizan son los porcentajes de cada uso de suelo en el *footprint* de Aquarius.

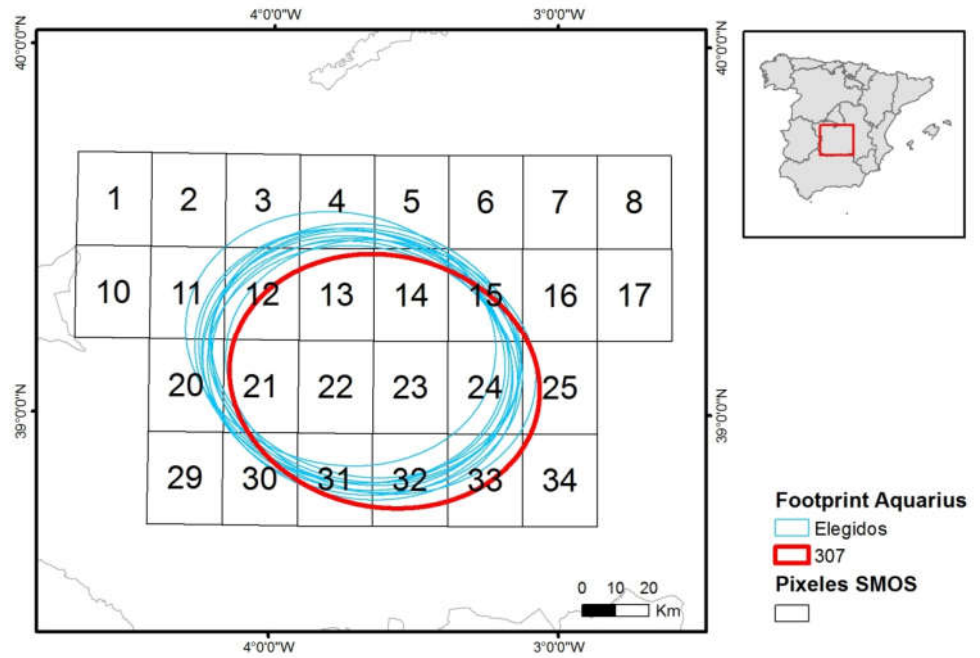


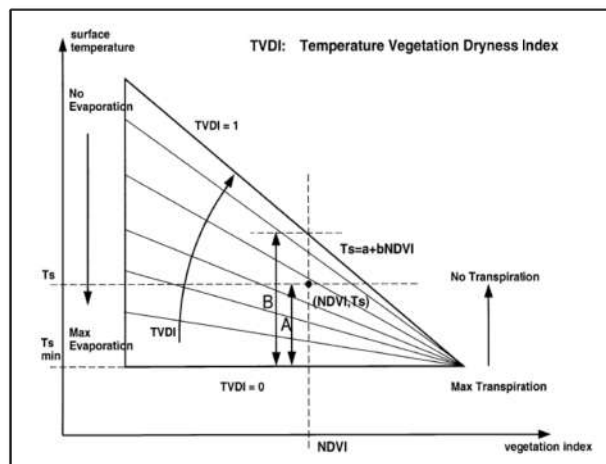
Figura 18: Elipses de los 12 datos de 2012 sobre la malla EASE en la zona de estudio de España

Este método se ha utilizado sólo en la zona de España, en el año 2012, ya que se pensó que los usos del suelo, eran estáticos. Durante el periodo de estudio, estos usos podían haber cambiado y nos decidimos por un parámetro como el TVDI que fuese dinámico y contemplara la variabilidad de las condiciones de la superficie a lo largo de las estaciones del año.

Se ha utilizado el programa ArcGis para realizar este método, utilizando el MatLab para generar dos *shapefiles* con los datos de SMOS y Aquarius que se cargaban junto con los datos de usos del suelo del SIOSE. Haciendo intersecciones y uniones de clases de usos de suelo (para que solo hubiese seis clases) con estos *shapefiles*, se obtenían los porcentajes que tenía cada uso de suelo en los seis píxeles y en el *footprint* de Aquarius.

6.1.3. Método del TVDI

El TVDI (*Temperature Vegetation Dryness Index*) es un índice que establece el estado de sequedad del suelo. Este índice toma valores entre 0 y 1, donde 0 es la máxima humedad o disponibilidad de agua en la superficie y 1 es la máxima sequedad. El índice combina la temperatura de la superficie, T_s , y el índice de vegetación $NDVI$. Para calcular el índice es necesario realizar el diagrama de dispersión de los píxeles y definir los límites del espacio $T_s/NDVI$ para el área de estudio, definiendo el límite seco y el límite húmedo del triángulo [Price, 1990]; [Carlson et al., 1994]. El modelo supone que la humedad del suelo es la principal fuente de variación de T_s y que el $TVDI$ está relacionado con la humedad del suelo debido a los cambios en la inercia térmica y al control de la evapotranspiración.



Definición del TVDI. El TVDI se obtiene para cada píxel como la proporción entre los segmentos A y B (Ecuación 29) [Sandholt et al., 2002]

Una vez establecidos los bordes o límites del triángulo es posible calcular el $TVDI$ o índice de sequedad para cada píxel:

$$TVDI = (T_s - T_{min}) / (T_{Smax} - T_{Smin}) \quad (29)$$

donde T_s es la temperatura dada para un pixel, T_{Smin} es la mínima temperatura de superficie en el triángulo y define el límite húmedo y $T_{Smax} = a NDVI + b$ [Sandholt et al., 2002]

$$(NDVI = \frac{IRC-R}{IRC+R}) \quad (30)$$

Durante la realización de este trabajo, se han consultado, entre otros, los trabajos que se citan a continuación, para saber cómo calculaban el *TVDI* y los resultados que obtenían en las diferentes zonas de estudio [Chen et al., 2011], [Holzman et al., 2012a], [Holzman et al., 2012b], [Holzman et al., 2013], [Holzman et al., 2014a], [Holzman et al., 2014b], [Sanchez et al., 2013], [Vazquez, 2013].

Se han utilizado los productos de MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) MOD11A2 (*MODIS/Terra Land Surface Temperature Emissivity 8-Day L3 Global 1 km*) para la TSS y MOS13A2 (*MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1 km*) para el *NDVI* <<http://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/modis>>.

El producto *MOD11A2* se obtiene a partir de los productos diarios (*MOD11A1*) y se almacena en una rejilla sinusoidal de 1 km como los valores promedio de los *LST* (*land surface temperature*) durante un periodo de 8 días. El producto *MOD13A2*, está diseñado para comparar de forma temporal el estado de la vegetación. Se utilizan las reflectancias centradas en 469 nm (azul), 645 nm (rojo) y 858 nm (infrarrojo) para determinar el índice de vegetación, enmascarando previamente el agua, nubes y sombras de las nubes. Los datos *MOD13A2* se proporcionan cada 16 días con una resolución espacial de 1 km.

Como los datos de estos productos carecen de decimales y signo, es decir son enteros sin signo (*16-bit unsigned integer*) para facilitar su almacenamiento, ha

sido necesario pasar los datos a datos enteros con signo (*16-bit signed integer*) y para ello se han hecho las correcciones necesarias, es decir se ha multiplicado los datos de *MOD11A2* por el coeficiente 0'02 y por 0'0001 para los *MOD13A2*.

En el caso de que no haya dato *MOD11A2* o *MOD13A2* en ese día, se hace el promedio de las temperaturas o *NDVIs* de los dos datos más cercanos a la fecha. Si el error de esos datos es superior al 20% no se tiene en cuenta el promedio.

A continuación se han tomado 100 clases igualmente espaciadas para el *NDVI*, habiendo fijado como mínimo para el tamaño de clase un valor de $(0'2 * totalpixeles)/100$. Si alguna de las clases no llega a ese valor no es tenida en cuenta.

En cada clase se ha calculado la media de las temperaturas y la desviación típica y se han hallado los valores

$$TSS_{max_recta}(i) = meanT + (2 * desvT) \quad (31)$$

$$TSS_{min_recta}(i) = meanT - (2 * desvT) \quad (32)$$

siendo *i* el número de clases

Con estos datos se ha buscado la recta de regresión. Los puntos rojos son los que se han considerado para obtener las rectas de regresión máxima y mínima.

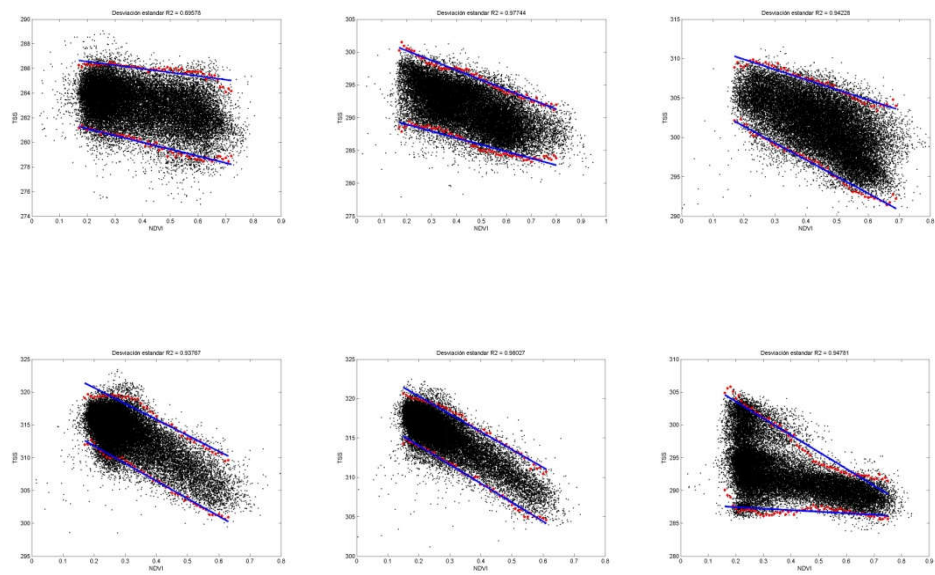


Figura 19: Plots TSS vs NDVI, de unos datos del 2012 que se han considerado en el trabajo

Se ha considerado también hacerlo con las ecuaciones

$$TSS_{max_recta}(i) = q3 + 1.5 * (q3 - q1) \quad (33)$$

$$TSS_{min_recta}(i) = q1 - 1.5 * (q3 - q1) \quad (34)$$

siendo $q1$, y $q3$ los cuartiles 1º y 3º pero las correlaciones son inferiores que con las anteriores fórmulas, por lo que no se han tenido en cuenta.

Se calcula el coeficiente de correlación de los datos TSS vs NDVI, si no alcanza el 65%, este dato no se tiene en cuenta para el método de TVDI.

Una vez obtenida la recta de regresión, se ha calculado el *TVDI* con la fórmula anterior.

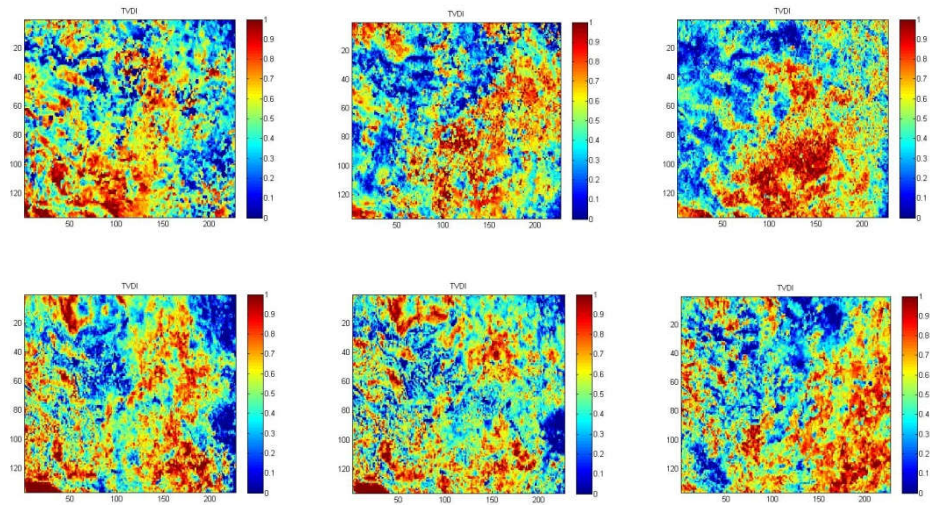


Figura 20: TVDI obtenido de los datos de los plots anteriores

Los valores de *TVDI* se han dividido en 6 clases igualmente espaciadas y se han clasificado los datos.

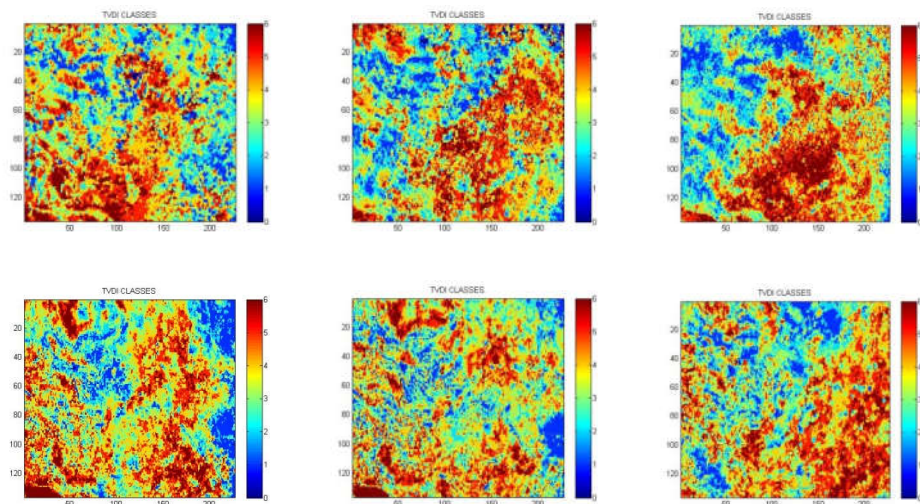


Figura 21: 6 clases de los *TVDI* en los datos anteriores

Esta clasificación se ha pasado a un fichero *envi* y en *envi* se ha guardado como *geotiff* para poder abrirlo en *ArcGis*.

Después se ha resuelto el sistema:

$$a_{11}Tb_{TVDI1} + a_{12}Tb_{TVDI2} + a_{13}Tb_{TVDI3} + a_{14}Tb_{TVDI4} + a_{15}Tb_{TVDI5} + a_{16}Tb_{TVDI6} = Tb_{pixel\ 1}$$

$$a_{21}Tb_{TVDI1} + a_{22}Tb_{TVDI2} + a_{23}Tb_{TVDI3} + a_{24}Tb_{TVDI4} + a_{25}Tb_{TVDI5} + a_{26}Tb_{TVDI6} = Tb_{pixel\ 2}$$

$$a_{31}Tb_{TVDI1} + a_{32}Tb_{TVDI2} + a_{33}Tb_{TVDI3} + a_{34}Tb_{TVDI4} + a_{35}Tb_{TVDI5} + a_{36}Tb_{TVDI6} = Tb_{pixel\ 3}$$

$$a_{41}Tb_{TVDI1} + a_{42}Tb_{TVDI2} + a_{43}Tb_{TVDI3} + a_{44}Tb_{TVDI4} + a_{45}Tb_{TVDI5} + a_{46}Tb_{TVDI6} = Tb_{pixel\ 4}$$

$$a_{51}Tb_{TVDI1} + a_{52}Tb_{TVDI2} + a_{53}Tb_{TVDI3} + a_{54}Tb_{TVDI4} + a_{55}Tb_{TVDI5} + a_{56}Tb_{TVDI6} = Tb_{pixel\ 5}$$

$$a_{61}Tb_{TVDI1} + a_{62}Tb_{TVDI2} + a_{63}Tb_{TVDI3} + a_{64}Tb_{TVDI4} + a_{65}Tb_{TVDI5} + a_{66}Tb_{TVDI6} = Tb_{pixel\ 6}$$

Los coeficientes a_{ij} son los porcentajes del uso suelo j en el pixel i y forman la matriz A . Las incógnitas X son:

$$Tb_{TVDI1}, Tb_{TVDI2}, Tb_{TVDI3}, Tb_{TVDI4}, Tb_{TVDI5}, Tb_{TVDI6}$$

El sistema es $A \cdot X = b$ siendo b el vector columna de las temperaturas de brillo de los 6 pixeles. Se resuelve haciendo $X = A^{-1} \cdot b$. Una vez resuelto el sistema se calcula una nueva temperatura de brillo de SMOS que es la combinación lineal de las temperaturas de brillo. Los pesos que se utilizan son los porcentajes de cada clase de $TVDI$ en el *footprint* de Aquarius.

6.2. MÉTODOS FÍSICOS

6.2.1. Método de la matriz de Ganancia

El método de matriz de ganancia proyecta el diagrama de antena sobre los píxeles terrestres. El nivel de señal en la antena se corresponde con la suma de las señales de ruido que emite cada píxel pesada (*weighed*) con el factor de diagrama con el

que es visto por la antena receptora. La señal recibida está integrada y no permite discernir la emisividad de cada píxel. En nuestro caso, asimilamos cada *footprint* de SMOS a un “píxel” de AQUARIUS, asignando a dicha emisividad una determinada ganancia. De este modo se pueden contrastar las medidas de ambos radiómetros.

Para poder utilizar este método, fue necesario utilizar las 16 matrices de ganancia. Cada matriz tiene unas dimensiones de 721 x 361. Las filas corresponden al ángulo θ de rotación de la antena (*roll*), medidas en intervalos de cada 0,5°, y las columnas el azimut ϕ cada 1°. En el apéndice del trabajo se encuentran especificadas las fórmulas para el cálculo de estas matrices.

Como la matriz de ganancia está referenciada a las coordenadas angulares de la antena es necesario proyectar estos valores sobre las coordenadas terrestres de cada *footprint* de SMOS para poder asociar cada *footprint* a una determinada ganancia.

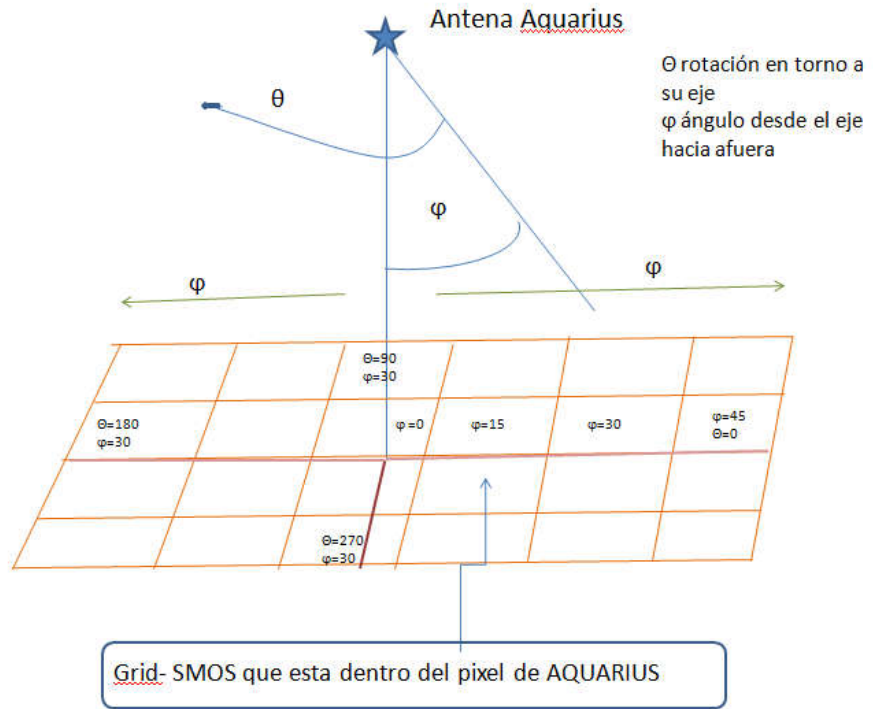


Figura 22: Proyección de los ángulos θ y φ del diagrama de aantena

Las coordenadas del satélite Aquarius ($AQ.SCLAT$, $AQ.SCLON$, $AQ.SCALT$) están en el sistema de coordenadas ECEF (*earth-centered, earth-fixed*), por lo que es necesario pasar estas coordenadas *ecef* a otro sistema de coordenadas local, centrado en el centro del *footprint* de Aquarius.

Utilizando la matriz de transformación *mtrans*, conseguimos unas nuevas coordenadas del satélite Aquarius en el sistema de coordenadas local, que son llamadas (x_{10j} , y_{10j} , z_{10j})

$$mtrans = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sinphi0 & \cosphi0 \\ 0 & -\cosphi0 & \sinphi0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\sinlambda0 & \coslambda0 & 0 \\ -\coslambda0 & -\sinlambda0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

siendo (script *Matlab*) :

$$\sinphi0 = \text{send}(AQ.SCLAT)$$

$$\cosphi0 = \text{cosd}(AQ.SCLAT)$$

$$\sinlambda0 = \text{send}(AQ.SCLON)$$

$$\coslambda0 = \text{cosd}(AQ.SCLON).$$

con:

AQ.SCLAT = latitud del satélite *Aquarius*

AQ.SCLON = longitud del satélite *Aquarius*

Vista desde arriba

★ = centro del footprint

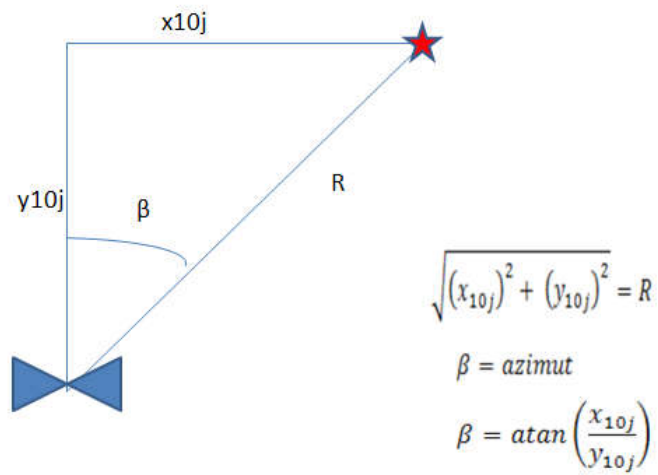


Figura 23: Dibujo (1)- Esquema de los cambios de coordenadas para la proyección de las coordenadas de la matriz G.

Vista perpendicular

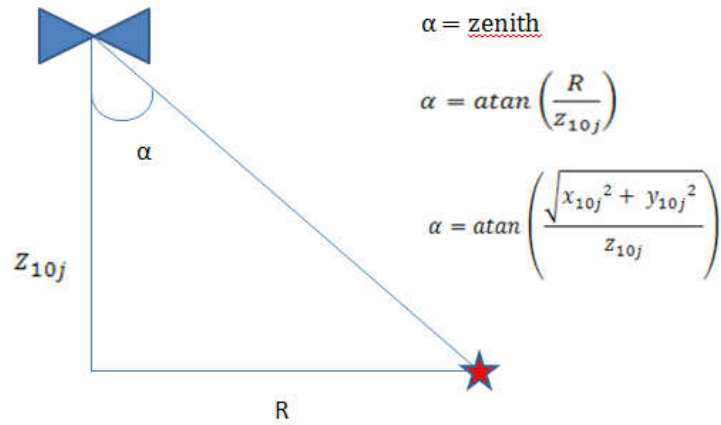


Figura 24: Dibujo (2)- Esquema de los cambios de coordenadas para la proyección de las coordenadas de la matriz G.

en el que:

x_{10j} = coordenada del eje X de Aquarius en el sistema de coordenadas local

y_{10j} = coordenada del eje Y de Aquarius en el sistema de coordenadas local

z_{10j} = coordenada del eje Z de Aquarius en el sistema de coordenadas local

se obtienen los ángulos α , y β , *azimut* y *zenith* del satélite.

Para averiguar las coordenadas de los distintos valores de la matriz de ganancia, se utiliza las ecuaciones que vienen a continuación.

Vista perpendicular

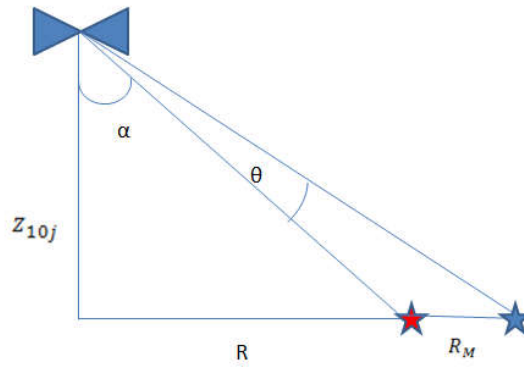


Figura 25: Dibujo (3) - Esquema de los cambios de coordenadas para la proyección de las coordenadas de la matriz G.

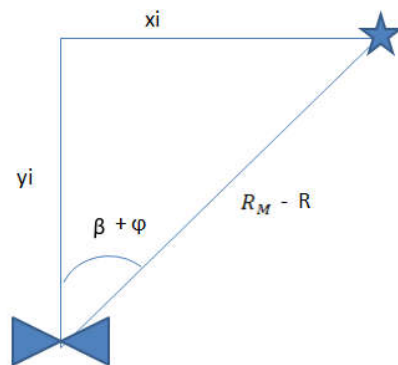
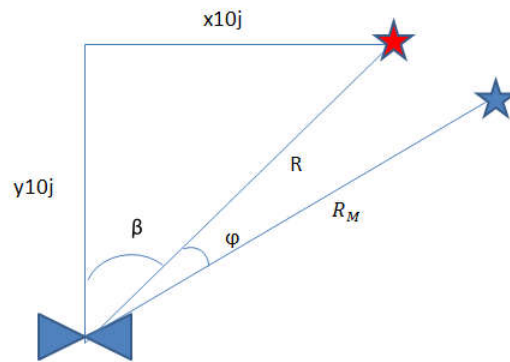
Entonces el valor del punto azul será $R_M - R$

$$R_M = \tan(\alpha + \theta) \cdot z_{10j} \quad (35)$$

$$R = \tan(\alpha) \cdot z_{10j} \quad (36)$$

$$R_M - R = z_{10j} \cdot (\tan(\alpha + \theta) - \tan(\alpha)) \quad (37)$$

Vista perpendicular



Figuras 26: Dos dibujos (4) - Esquema de los cambios de coordenadas para la proyección de las coordenadas de la matriz G .

Obteniendo las coordenadas del punto que nos interesa:

$$x_i = z_{10j} \cdot (\tan(\alpha + \theta) - \tan(\alpha)) \cdot \text{sen}(\beta + \varphi) \quad (38)$$

$$y_i = z_{10j} \cdot (\tan(\alpha + \theta) - \tan(\alpha)) \cdot \text{cos}(\beta + \varphi) \quad (39)$$

Una vez hecho esto, se comprueba en cada pixel de SMOS que está dentro del *footprint* de Aquarius, los puntos de la matriz de ganancia que están dentro, y se hace la media de todos los valores de esos puntos. Los valores medios para cada pixel que hemos hallado, se normalizan.

La nueva temperatura de SMOS, se halla multiplicando las temperaturas de brillo de SMOS de cada pixel por el peso que se ha obtenido anteriormente a partir de los valores de la matriz de ganancia.

Otros trabajos anteriores también han considerado el modelo de antena (*antenna pattern*), concretamente en el trabajo de [Kim et al.,2008], se trataba el acoplamiento de las polarizaciones cruzadas en el patrón de antena porque complicaba la corrección del efecto de Faraday

Durante la realización de este trabajo se pasó del método de usos de suelo al método TVDI, para mejorar los resultados. El cambiar a un método que tuviese en cuenta la variabilidad estacional, hizo que los resultados mejorasen.

7. RESULTADOS

AMAZONAS SENTIDO ASCENDENTE

POLARIZACIÓN H

YEA R	JDAY	AQ	AREA S	AE	RE	GANANCIA	AE	RE	TVDI	AE	RE
2012	60	280,24	273,94	-6,30	-0,02	273,8	-6,45	-0,02			
2012	109	281,37	284,05	2,67	0,009	283,21	1,84	0,006			
2012	137	280,08	273,21	-6,86	-0,025	272,82	-7,26	-0,02			
2012	165	281,23	275,49	-5,74	-0,02	275,78	-5,45	-0,02			
2012	214	280,08	267,24	-12,83	-0,05	267,21	-12,86	-0,05			
2012	291	282,28	268,94	-13,34	-0,05	268,87	-13,41	-0,05			
2012	340	284,05	278,36	-5,69	-0,02	277,82	-6,23	-0,02			
2013	51	281,00	273,10	-7,89	-0,029	273,16	-7,84	-0,03			
2013	79	281,72	275,64	-6,08	-0,02	278,57	-3,15	-0,01			
2013	100	281,22	276,10	-5,11	-0,02	276,24	-4,97	-0,02			
2013	128	280,89	267,58	-13,31	-0,05	267,88	-13,01	-0,05			
2013	205	280,70	273,68	-7,02	-0,02	273,23	-7,46	-0,03			
2013	282	281,19	276,32	-4,87	-0,02	276,31	-4,88	-0,02			
2013	331	281,94	271,77	-10,18	-0,04	271,74	-10,20	-0,04			
2013	359	283,25	280,31	-2,94	-0,01	280,01	-3,24	-0,01			
2014	43	281,72	268,10	-13,62	-0,05	268,27	-13,45	-0,05			
2014	120	281,27	273,07	-8,20	-0,03	273,23	-8,04	-0,03			
2015	7	276,29	278,31	2,02	0,01	277,88	1,60	0,005			
2015	35	276,45	279,14	2,69	0,009	278,59	2,14	0,007			
2015	84	276,18	278,22	2,04	0,007	277,86	1,68	0,006			
2015	112	276,99	280,14	3,15	0,01	280,15	3,16	0,01			

Tabla 1: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona del Amazonas con órbitas ascendentes y polarización H.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
A	ÁREAS	-5,59	7,77	0,03	6,79	2,41	-0,25	0,06	0,27
A	GANANCIAS	-5,59	7,67	0,03	6,59	2,34	-0,22	0,05	0,32

Tabla 2: Errores de los datos anteriores

AMAZONAS SENTIDO ASCENDENTE

POLARIZACIÓN V

YEA R	JDA Y	AQ	AREAS	AE	RE	GANANC IA	AE	RE	TV DI	A E	R E
2012	60	280,77	274,22	-6,54	-0,02	273,61	-7,15	-0,02			
2012	109	282,17	271,95	-10,22	-0,04	271,77	-10,40	-0,04			
2012	137	281,34	274,34	-7,00	-0,02	274,31	-7,03	-0,02			
2012	165	281,92	270,51	-11,41	-0,04	270,29	-11,63	-0,04			
2012	214	281,30	273,64	-7,66	-0,03	273,57	-7,731	-0,03			
2012	291	282,74	276,51	-6,231	-0,02	276,32	-6,42	-0,02			
2012	340	284,97	277,66	-7,30	-0,02	277,27	-7,69	-0,03			
2013	51	281,76	275,66	-6,09	-0,02	275,47	-6,28	-0,02			
2013	79	282,44	267,53	-14,91	-0,05	270,53	-11,91	-0,04			
2013	100	281,95	273,14	-8,80	-0,03	273,08	-8,86	-0,03			
2013	128	281,72	272,97	-8,75	-0,03	273,06	-8,65	-0,03			
2013	205	282,00	274,77	-7,23	-0,02	274,61	-7,39	-0,03			
2013	282	281,90	273,88	-8,02	-0,03	273,76	-8,14	-0,03			
2013	331	282,83	276,85	-5,98	-0,02	276,22	-6,61	-0,02			
2013	359	283,86	273,13	-10,73	-0,04	272,49	-11,36	-0,04			
2014	43	282,29	274,13	-8,16	-0,03	274,41	-7,88	-0,03			
2014	120	281,83	277,88	-3,94	-0,014	277,56	-4,27	-0,01			
2015	7	278,52	277,31	-1,20	-0,004	277,26	-1,25	-0,004			
2015	35	278,14	278,64	0,50	0,002	278,22	0,084	0,0003			
2015	84	278,51	277,99	-0,51	-0,002	277,80	-0,70	-0,002			
2015	112	279,04	273,31	-5,74	-0,021	273,37	-5,67	-0,021			

Tabla 3: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona del Amazonas con órbitas ascendentes y polarización V.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
A	AREAS	-6,95	7,79	0,03	7,00	2,48	-0,27	0,07	0,23
A	GANANCIAS	-7,00	7,71	0,03	7,00	2,48	-0,31	0,09	0,17

Tabla 4: Errores de los datos anteriores

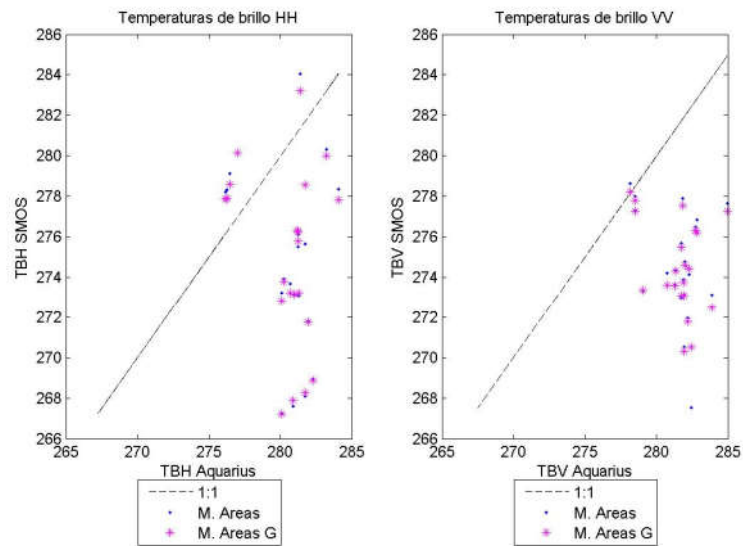


Figura 27: Plot datos de temperatura

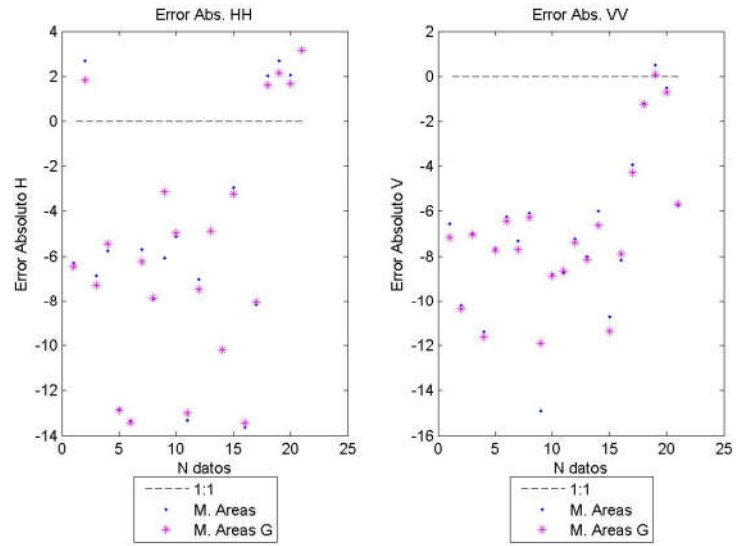


Figura 28: Plot errores absolutos

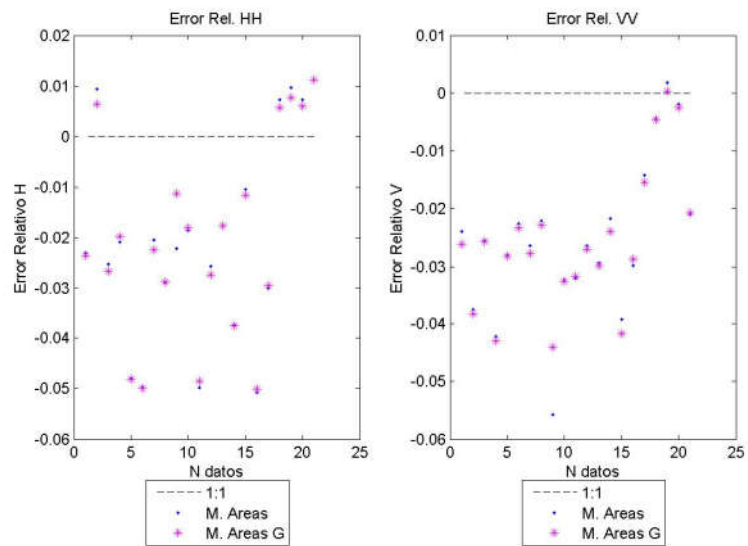


Figura 29: Plots de los errores relativos

En Amazonas sentido Ascendente, tanto en polarización H como en V , no se aprecian claras diferencias en los errores medios de los métodos 1 y 2 (áreas y ganancias, error medio 6.95 en un caso y 7.00 en otro en polarización V y 5.59 en ambos casos en polarización H). Se obtienen menores errores en $polH$ que en $polV$. Los datos que proceden del satélite Aquarius, en polarización V , siempre son mayores a los que se obtienen con los datos de SMOS.

AMAZONAS SENTIDO DESCENDENTE

POLARIZACIÓN H

YEAR	JDAY	AQ	AREAS	AE	RE	GANANCIA	AE	RE	TVDI	AE	RE
2012	43	284,06	280,55	-3,51	-0,01	280,87	-3,19	-0,01			
2012	71	283,94	274,74	-9,19	-0,03	274,96	-8,97	-0,03			
2012	99	283,85	282,30	-1,55	-0,005	282,60	-1,25	-0,004			
2012	148	283,79	273,25	-10,54	-0,04	278,66	-5,13	-0,02			
2012	197	282,79	271,81	-10,98	-0,04	272,06	-10,73	-0,04			
2012	274	284,43	273,44	-10,99	-0,04	273,49	-10,93	-0,04			
2012	351	285,69	278,36	-7,33	-0,02	278,29	-7,40	-0,02			
2013	34	285,36	285,34	-0,02	-8,21E-05	284,54	-0,82	-0,003			
2013	111	282,84	275,09	-7,76	-0,03	275,74	-7,10	-0,02			
2013	160	283,41	274,71	-8,70	-0,03	275,67	-7,74	-0,03			
2013	188	281,97	274,19	-7,77	-0,03	274,24	-7,73	-0,03			
2013	216	284,78	268,01	-16,77	-0,06	278,83	-5,95	-0,02			
2013	237	284,87	282,12	-2,74	-0,01	282,51	-2,36	-0,008			
2013	314	283,89	282,76	-1,12	-0,004	282,57	-1,31	-0,004			
2014	26	287,58	274,92	-12,66	-0,04	275,00	-12,58	-0,04			
2014	75	285,58	270,41	-15,17	-0,05	283,85	-1,73	-0,006			
2014	103	284,43	272,61	-11,81	-0,04	272,45	-11,98	-0,04			
2015	18	280,07	280,74	0,67	0,002	280,71	0,65	0,002			
2015	144	277,54	275,63	-1,90	-0,007	276,34	-1,19	-0,004			

Tabla 5: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona del Amazonas con órbitas descendentes y polarización H.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
D	Áreas	-7,36	8,96	0,03	7,43	2,61	-0,02	0,0004	0,93
D	Ganancias	-5,65	6,99	0,02	5,72	2,01	0,17	0,03	0,49

Tabla 6: Errores de los datos anteriores

AMAZONAS SENTIDO DESCENDENTE

POLARIZACIÓN V

YEAR	JDAY	AQ	AREAS	AE	RE	GANANCIA	AE	RE	TVDI	AE	RE
2012	43	285,29	271,71	-13,58	-0,05	272,53	-12,76	-0,04			
2012	71	284,61	277,30	-7,31	-0,02	277,22	-7,38	-0,02			
2012	99	284,50	271,29	-13,21	-0,05	271,33	-13,17	-0,05			
2012	148	284,78	270,96	-13,82	-0,05	276,61	-8,17	-0,03			
2012	197	283,16	276,30	-6,85	-0,02	276,36	-6,79	-0,02			
2012	274	285,24	277,75	-7,49	-0,02	277,67	-7,58	-0,03			
2012	351	286,82	278,39	-8,43	-0,03	278,43	-8,39	-0,03			
2013	34	286,32	278,64	-7,68	-0,03	278,70	-7,62	-0,03			
2013	111	283,36	277,37	-5,99	-0,02	277,53	-5,83	-0,02			
2013	160	284,09	279,41	-4,68	-0,01	280,49	-3,60	-0,01			
2013	188	282,54	277,66	-4,88	-0,02	277,43	-5,11	-0,02			
2013	216	285,55	271,43	-14,12	-0,05	281,82	-3,72	-0,01			
2013	237	285,60	277,90	-7,69	-0,03	278,41	-7,18	-0,02			
2013	314	284,63	279,58	-5,049	-0,02	279,71	-4,92	-0,02			
2014	26	288,84	280,88	-7,96	-0,03	280,82	-8,01	-0,03			
2014	75	285,68	260,92	-24,75	-0,09	274,45	-11,22	-0,04			
2014	103	285,09	278,56	-6,52	-0,02	278,49	-6,59	-0,02			
2015	18	282,05	280,50	-1,55	-0,005	280,43	-1,62	-0,006			
2015	144	279,94	278,76	-1,18	-0,004	278,93	-1,02	-0,003			

Tabla 7: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona del Amazonas con órbitas descendentes y polarización V.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
D	ÁREAS	8,57	10,06	0,03	8,57	3,00	-0,12	0,01	0,61
D	GANANCIAS	6,88	7,57	0,02	6,88	2,41	0,04	0,001	0,87

Tabla 8: Errores de los datos anteriores

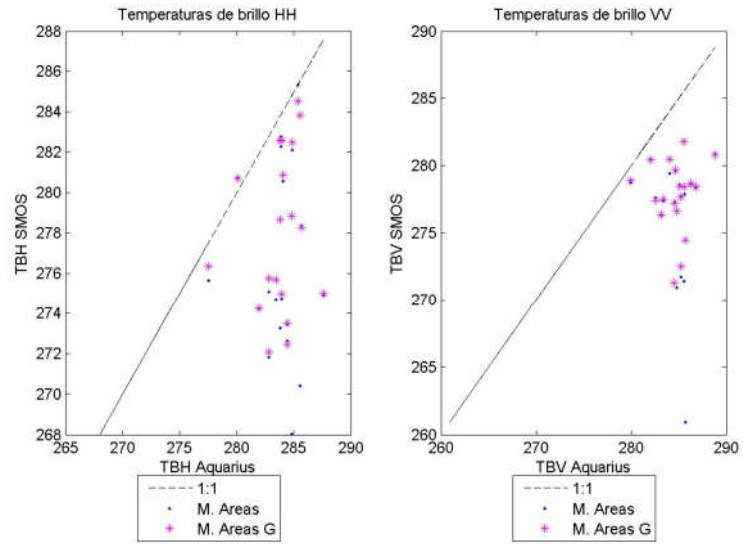


Figura 30: Plot datos de temperatura

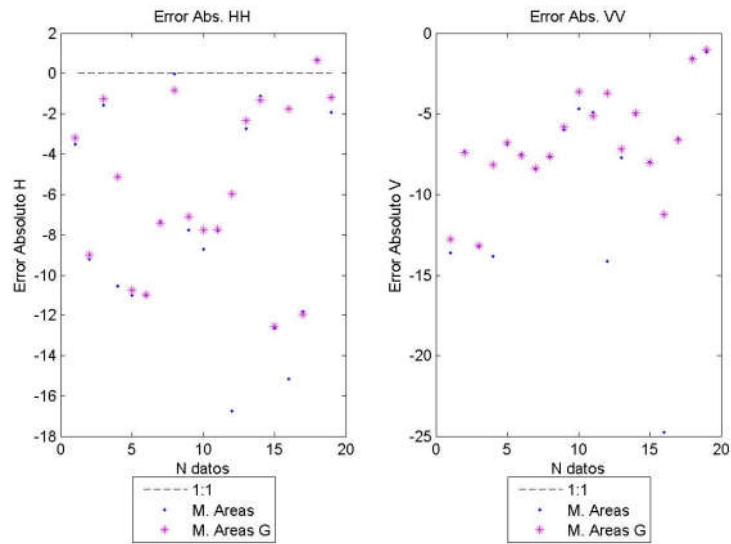


Figura 31: Plot errores absolutos

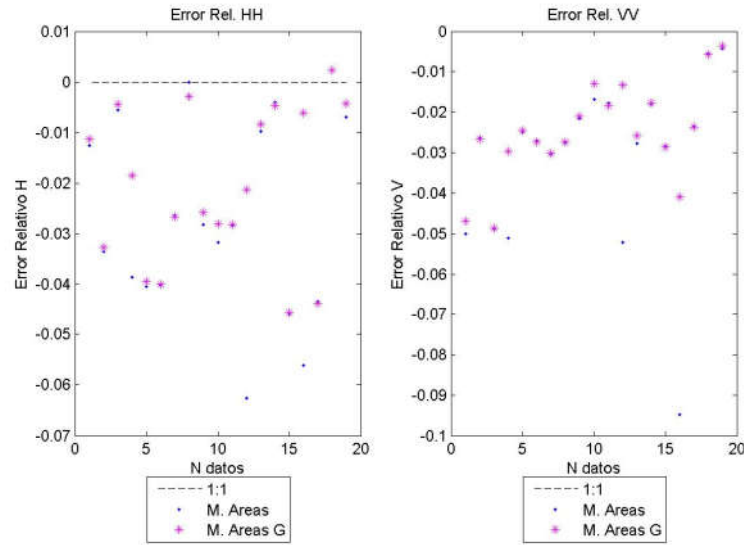


Figura 32: Plots de los errores relativos

En Amazonas sentido descendente en polarización H , se pasa de un ME de 7.36 en el método 1 a 5.65 en el método 2. El $RMSE$ pasa de 8.96 a 6.99. Se reduce en 2 grados el error medio.

En polarización V , pasa de igual forma, de 857 a 6.88 (en los errores medios) y de 10.06 a 7.57 en $RMSE$.

No se consiguen datos con el método3 del $TVDI$, ya que es una zona en la que los datos de temperatura están llenos de nubes.

Al igual que pasaba con pasadas ascendentes, los datos de Aquarius son mayores en las dos polarizaciones que los de SMOS.

En otro trabajo anterior [Pablos et al., 2014] en el que se comparaba varias zonas utilizando el 1er parámetro de Stokes y considerando a la vez los datos de las pasadas ascendentes y descendentes, se obtenía en el Amazonas un error medio de 8.82 y un $RMSD$ de 8.84.

ESPAÑA SENTIDO ASCENDENTE
POLARIZACIÓN H

YEAR	JDA Y	AQ	AREAS	AE	RE	GANANCIA	AE	RE	TVDI	AE	RE
2012	27	251,22	250,57	-0,64	-0,002	250,72	-0,49	-0,002			
2012	55	259,07	249,87	-9,20	-0,03	249,87	-9,19	-0,03	245,72	-13,35	-0,05
2012	76	267,17	267,45	0,27	0,001	266,97	-0,21	-0,0007	269,75	2,58	0,009
2012	83	240,46	244,92	4,45	0,02	244,54	4,08	0,016	241,96	1,50	0,006
2012	132	268,16	262,95	-5,2	-0,02	263,63	-4,53	-0,02	259,91	-8,25	-0,03
2012	153	277,96	263,52	-14,44	-0,055	275,09	-2,86	-0,01			
2012	160	277,83	264,35	-13,48	-0,05	273,42	-4,40	-0,01	264,16	-13,67	-0,05
2012	181	281,35	280,63	-0,72	-0,002	281,00	-0,35	-0,001	287,10	5,75	0,02
2012	230	280,81	274,51	-6,29	-0,02	278,18	-2,63	-0,01	278,49	-2,32	-0,008
2012	258	276,97	277,01	0,04	0,0001	276,93	-0,043	-0,0001	276,71	-0,27	-0,001
2012	279	254,80	248,91	-5,88	-0,02	260,36	5,56	0,02			
2012	307	237,83	254,05	16,2	0,06	253,56	15,72	0,06			
2012	335	240,23	231,53	-8,69	-0,04	231,75	-8,48	-0,03			
2012	363	243,64	243,12	-0,52	-0,002	242,66	-0,97	-0,004			
2013	18	235,70	235,52	-0,18	-0,0008	235,65	-0,05	-0,0002			
2013	46	250,00	242,93	-7,07	-0,03	242,68	-7,32	-0,03			
2014	10	232,22	229,64	-2,58	-0,01	229,13	-3,09	-0,01			
2014	38	222,03	220,85	-1,18	-0,005	219,94	-2,09	-0,01	220,46	-1,57	-0,007
2014	87	255,42	246,57	-8,85	-0,03	246,92	-8,51	-0,03			
2014	115	253,20	254,75	1,54	0,006	254,15	0,95	0,004	255,00	1,80	0,007

Tabla 9: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de España con órbitas ascendentes y polarización H.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
A	ÁREAS	-3,12	7,33	0,03	5,37	2,09	0,92	0,85	5,26E-09
A	GANANCIAS	-1,44	5,69	0,02	4,08	1,63	0,95	0,90	1,58E-10
A	TVDI	-2,74	6,96	0,02	5,06	1,95	0,94	0,88	4,83e-05

Tabla 10: Errores de los datos anteriores

ESPAÑA SENTIDO ASCENDENTE

POLARIZACIÓN V

YEAR	JD AY	AQ	AREAS	AE	RE	GANAN CIA	AE	RE	TVDI	AE	RE
2012	27	261,15	251,74	-9,41	-0,04	251,92	-9,23	-0,03			
2012	55	266,76	260,55	-6,21	-0,02	260,81	-5,95	-0,02	258,25	-8,51	-0,03
2012	76	274,33	262,65	-11,67	-0,04	262,90	-11,43	-0,04	261,71	-12,61	-0,05
2012	83	252,51	244,18	-8,33	-0,03	244,31	-8,20	-0,03	244,10	-8,41	-0,03
2012	132	277,43	278,19	0,75	0,003	277,86	0,43	0,001	275,76	-1,67	-0,006
2012	153	286,12	265,07	-21,04	-0,08	276,90	-9,21	-0,03			
2012	160	285,47	267,91	-17,55	-0,06	276,29	-9,18	-0,03	277,79	-7,68	-0,03
2012	181	289,55	284,45	-5,10	-0,018	284,46	-5,09	-0,02	284,66	-4,89	-0,02
2012	230	289,05	275,99	-13,06	-0,05	279,71	-9,33	-0,03	283,03	-6,02	-0,02
2012	258	285,07	287,53	2,46	0,008	287,43	2,35	0,008	281,71	-3,36	-0,01
2012	279	265,92	245,55	-20,37	-0,08	258,19	-7,73	-0,03			
2012	307	250,99	263,78	12,79	0,05	263,43	12,44	0,05			
2012	335	251,84	246,30	-5,53	-0,02	246,30	-5,54	-0,02			
2012	363	254,56	243,90	-10,65	-0,04	243,69	-10,86	-0,04			
2013	18	248,48	240,55	-7,92	-0,03	240,72	-7,75	-0,03			
2013	46	258,68	252,73	-5,94	-0,02	252,38	-6,29	-0,02			
2014	10	246,31	241,25	-5,06	-0,02	240,89	-5,42	-0,02			
2014	38	236,67	226,57	-10,10	-0,04	226,61	-10,06	-0,04	218,96	-17,71	-0,08
2014	87	264,96	258,98	-5,98	-0,02	259,13	-5,83	-0,02			
2014	115	263,62	250,97	-12,64	-0,05	250,57	-13,05	-0,05	250,34	-13,27	-0,05

Tabla 11: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de España con órbitas ascendentes y polarización V.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
A	ÁREAS	8,03	11,02	0,04	9,63	3,62	0,88	0,78	2,70E-07
A	GANANCIAS	6,25	8,38	0,03	7,77	2,95	0,94	0,88	7,32E-10
A	TVDI	-8.41	9.62	0.03	8.41	3.33	0.99	0.97	8.31e-08

Tabla 12: Errores de los datos anteriores

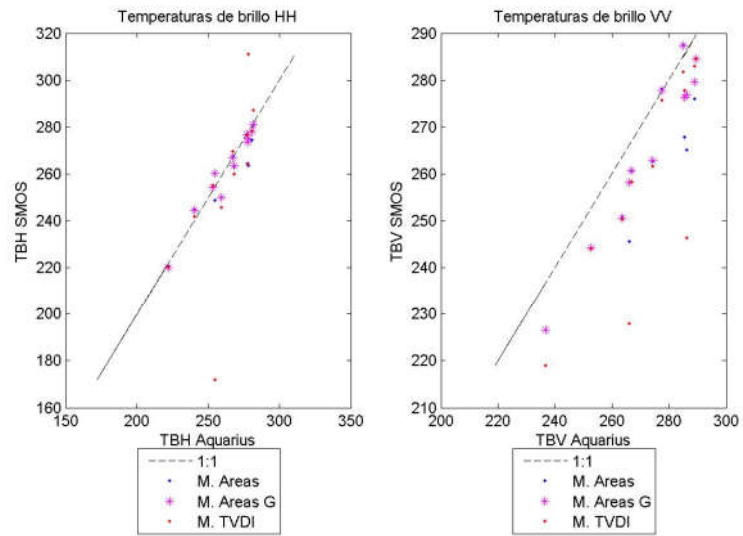


Figura 33: Plot datos de temperatura

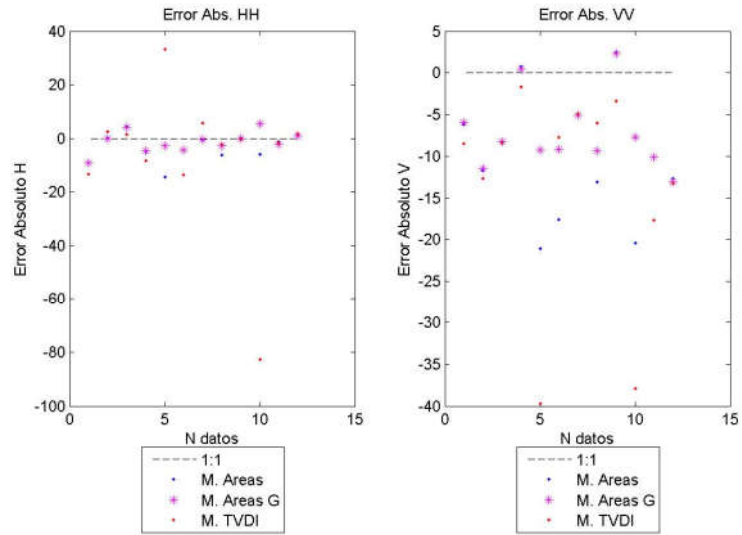


Figura 34: Plot errores absolutos

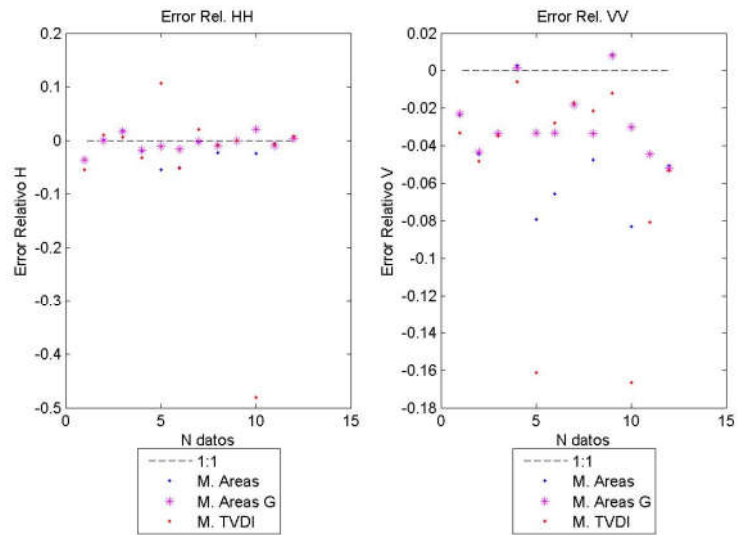


Figura 35: Plots de los errores relativos

En la zona centro de España, donde se consiguen datos con los tres métodos en sentido Ascendente, el método que consigue mejores resultados es el de la matriz de ganancias tanto en polarización H como en V . El error medio en el método de ganancias es 1.31, el de áreas es 4.17 y por último el de TVDI es -2.74.

En polarización V , también ocurre lo mismo, dando unos errores más grandes que en polarización H (como es normal), siendo el mejor resultado, el del método de ganancias con un 7.20 de error medio luego el de TVDI con -8.41 y por último el método de áreas con un 10.24.

En polarización H , el coeficiente de correlación más alto entre los datos, se consigue con el método de ganancias 0.95, seguido del método de áreas y TVDI con un 0.89. En polarización V , la correlación más alta se consigue con el método de TVDI 0.97, seguido del método de ganancias con un 0.94 y por último el de áreas con un 0.83.

En polarización V , los datos de Aquarius son mayores que los obtenidos con los de SMOS.

A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron con el método de usos del suelo. Los errores se han calculado con los datos que se consiguieron en el año 2012 y en la zona de España con órbitas ascendentes. Estos resultados se obtuvieron utilizando el programa ArcGis.

	<i>USOS_H</i>	<i>USOS_V</i>	<i>AREA_H</i>	<i>AREA_V</i>	<i>TVDI_H</i>	<i>TVDI_V</i>
<i>MAE</i>	10,522	6,792	2,106	4,756	3,794	5,950
<i>BIAS</i>	-1,277	6,633	0,971	4,756	0,516	5,568
<i>RMSE</i>	15,530	7,984	2,784	6,185	4,286	7,139
<i>RRMSE</i>	0,068	0,032	0,011	0,024	0,018	0,027
<i>R2</i>	0,618	0,990	0,991	0,980	0,978	0,972

Como se pueden observar los peores resultados, se obtenían con el método de usos de suelo, por lo que se decidió que el estudio a partir del año 2013 las comparaciones no se iban a seguir con este método.

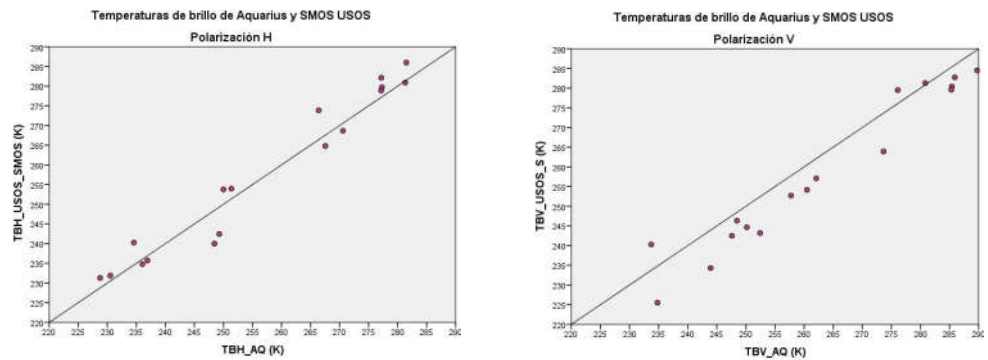


Figura 36: Plot de los datos de Aquarius y los estimados por usos de suelo

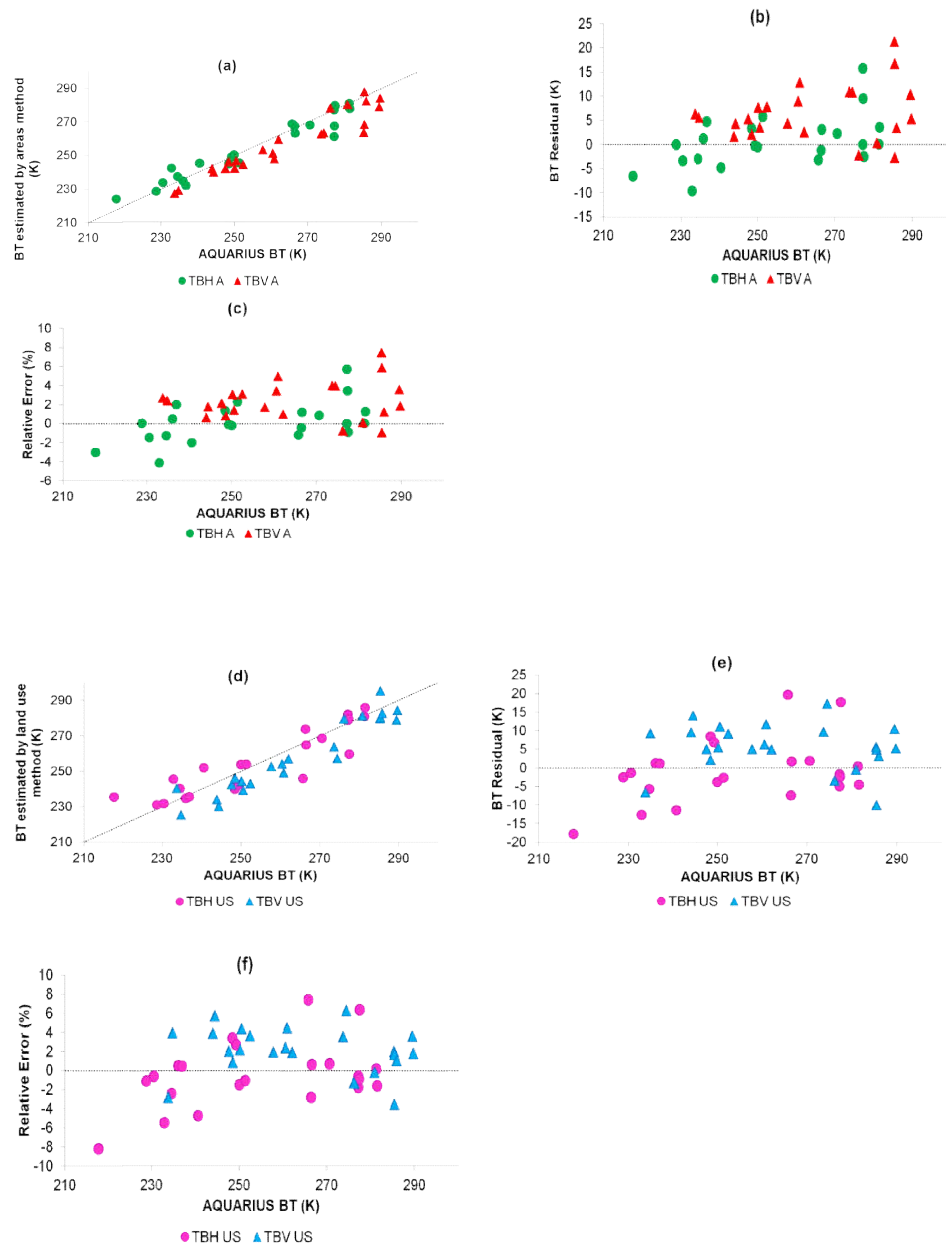


Figura 37: Plots con las temperaturas obtenidas con el método de los usos del suelo y el de áreas, los errores residuales, y los errores relativos

Tener que agrupar los usos del suelo en 6 clases, supuso que se agrupasen en una clase, usos de suelo que tenían diferente respuesta espectral o que durante el año,

tuviesen en algunas épocas más similitud y en otras menos. Eso probablemente y que el método no fuese más dinámico, sean los motivos por los que los resultados no fuesen buenos.

ESPAÑA SENTIDO DESCENDENTE

POLARIZACIÓN H

YE R	JDA Y	AQ	AREAS	AE	RE	GANAN CIA	AE	RE	TVDI	AE	RE
2012	221	290,52	271,54	-18,98	-0,07	278,62	-11,90	-0,04	278,05	-12,47	-0,04
2012	298	254,98	231,64	-23,33	-0,10	239,64	-15,34	-0,06	239,95	-15,02	-0,06
2013	9	245,01	237,60	-7,41	-0,03	237,75	-7,25	-0,03			
2013	114	279,34	266,71	-12,63	-0,05	267,76	-11,58	-0,04			
2013	135	252,43	243,34	-9,09	-0,04	243,11	-9,32	-0,04			
2013	184	293,23	275,91	-17,32	-0,06	279,16	-14,07	-0,05	280,77	-12,46	-0,04
2013	191	297,24	276,72	-20,51	-0,07	279,66	-17,57	-0,06	277,77	-19,46	-0,07
2013	212	298,55	283,18	-15,37	-0,05	283,54	-15,01	-0,05	285,41	-13,14	-0,04
2013	261	291,59	278,45	-13,14	-0,05	280,12	-11,47	-0,04	282,96	-8,64	-0,03
2014	1	241,08	228,22	-12,86	-0,05	232,14	-8,95	-0,04			
2014	22	224,14	224,44	0,30	0,001	223,18	-0,96	-0,004			
2014	50	236,26	217,58	-18,68	-0,08	219,84	-16,42	-0,07			

Tabla 13: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de España con órbitas descendentes y polarización H.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
D	ÁREAS	14,08	15,40	0,06	14,13	5,22	0,97	0,95	8,90E-08
D	GANANCIAS	11,65	12,47	0,04	11,65	4,30	0,99	0,98	1,46E-09
D	TVDI	13.53	13.92	0.05	13.53	4.72	0.98	0.95	7.34e-04

Tabla 14: Errores de los datos anteriores

ESPAÑA SENTIDO DESCENDENTE

POLARIZACIÓN V

YEA R	JDA Y	AQ	AREAS	AE	RE	GANANC IA	AE	RE	TVDI	AE	RE
2012	221	297,06	279,09	-17,97	-0,06	286,60	-10,46	-0,03	287,65	-9,41	-0,03
2012	298	263,16	246,67	-16,49	-0,06	255,33	-7,83	-0,03	256,67	-6,49	-0,02
2013	9	254,53	246,26	-8,27	-0,03	246,00	-8,52	-0,03			
2013	135	264,49	264,45	-0,03	-0,0001	264,69	0,20	0,0007			
2013	184	306,48	286,27	-20,21	-0,07	289,40	-17,08	-0,06	288,80	-17,68	-0,06
2013	191	317,89	287,54	-30,34	-0,10	291,37	-26,52	-0,09	298,16	-19,72	-0,06
2013	261	305,32	283,28	-22,05	-0,08	285,51	-19,81	-0,07	285,00	-20,33	-0,07
2014	1	255,89	235,85	-20,033	-0,085	239,92	-15,97	-0,06			
2014	22	241,19	224,35	-16,84	-0,07	223,14	-18,06	-0,08			
2014	50	253,97	232,76	-21,21	-0,09	235,28	-18,69	-0,08			

Tabla 15: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de España con órbitas descendentes y polarización V.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
D	ÁREAS	17,34	19,01	0,07	17,34	6,21	0,96	0,92	1,31E-05
D	GANANCIAS	14,27	16,00	0,06	14,31	5,14	0,96	0,92	8,79E-06
D	TVDI	-14,72	15,78	0,05	14,72	5,13	0,98	0,96	0,003

Tabla 16: Errores de los datos anteriores

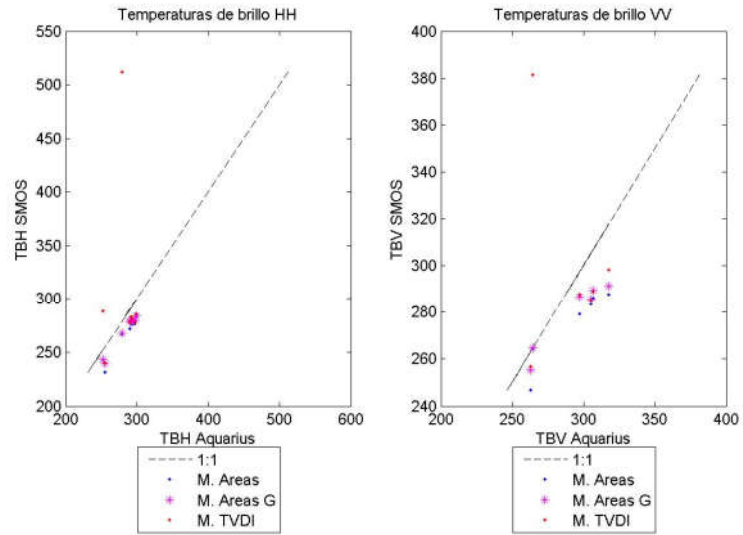


Figura 38: Plot datos de temperatura

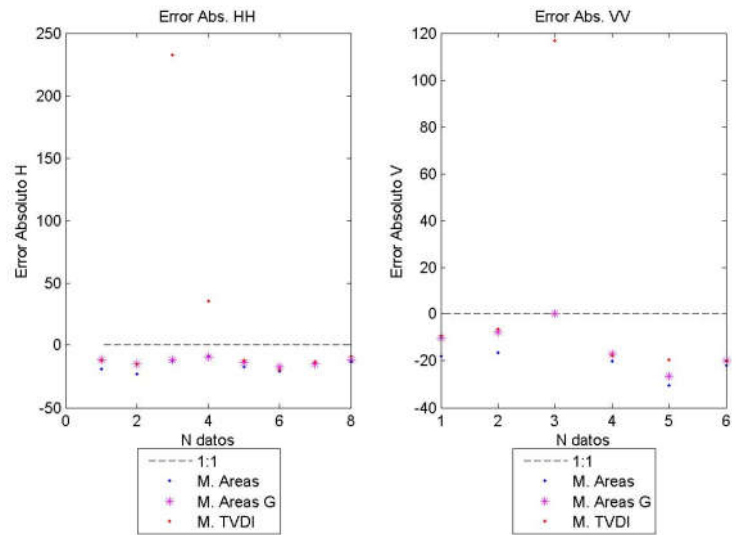


Figura 39: Plot errores absolutos (Abajo)

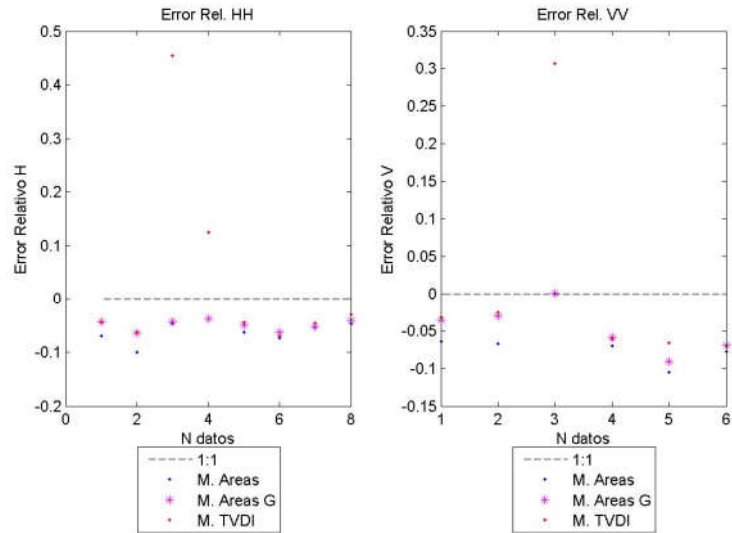


Figura 40: Plots de los errores relativos

En las pasadas descendentes, los resultados son considerablemente peores que en las pasadas ascendentes. En polarización H , el método de ganancias obtiene un error medio de 13.28, el de TVDI un 13.53 y por último el de áreas un 16.30. En polarización V , se repite el orden con unos errores de 13.58, -14.72 y 17.85 respectivamente.

La correlación entre los datos en polarización H , es de 0.98 con el método de ganancias y 0.94 en los otros métodos. Cuando se trata de la polarización V , el método de TVDI obtiene la correlación más alta, 0.96, seguido del método de ganancias con un 0.93 y el de áreas con un 0.87.

En pasadas descendentes los datos de Aquarius en ambas polarizaciones, son mayores que los datos obtenidos con SMOS.

FORT PECK SENTIDO ASCENDENTE

POLARIZACIÓN H

YE R	JDA Y	AQ	AREA S	AE	RE	GANANCI A	AE	RE	TVD I	A E	R E
2012	14	239,84	226,01	-13,82	-0,06	225,49	-14,35	-0,06			
2012	42	234,84	221,72	-13,12	-0,06	232,48	-2,36	-0,01			
2012	63	244,56	241,00	-3,56	-0,01	240,03	-4,53	-0,02			
2012	91	243,26	233,26	-10,00	-0,04	231,98	-11,28	-0,05			
2012	119	223,50	218,80	-4,70	-0,02	217,24	-6,26	-0,03			
2012	140	247,86	240,11	-7,75	-0,03	239,17	-8,69	-0,03			
2012	168	248,90	241,67	-7,23	-0,03	240,73	-8,17	-0,03			
2012	196	274,66	263,17	-11,49	-0,04	269,21	-5,45	-0,02			
2012	217	238,79	226,63	-12,16	-0,05	225,58	-13,21	-0,06			
2012	322	235,17	219,18	-15,99	-0,07	227,66	-7,51	-0,03			
2014	46	246,61	234,42	-12,19	-0,05	234,59	-12,02	-0,05			
2014	74	209,21	206,67	-2,54	-0,01	206,09	-3,12	-0,01			
2015	10	238,48	239,35	0,88	0,003	239,27	0,79	0,003			
2015	38	236,59	233,39	-3,20	-0,01	233,50	-3,09	-0,01			
2015	66	231,75	230,18	-1,56	-0,007	230,55	-1,20	-0,005			
2015	115	246,60	247,74	1,1400	0,004	246,99	0,39	0,001			

Tabla 17: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Fort Peck con órbitas ascendentes y polarización H.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
A	ÁREAS	7,33	9,07	0,04	7,58	3,13	0,92	0,84	5,74E-07
A	GANANCIAS	6,25	7,77	0,03	6,40	2,65	0,94	0,88	7,01E-08

Tabla 18: Errores de los datos anteriores

FORT PECK SENTIDO ASCENDENTE

POLARIZACIÓN V

YEA R	JDA Y	AQ	AREA S	AE	RE	GANANCI A	AE	RE	TVD I	A E	R E
2012	14	250,95	248,66	-2,28	-0,01	247,95	-2,99	-0,01			
2012	42	246,67	226,68	-19,99	-0,09	237,95	-8,73	-0,03			
2012	63	254,33	250,35	-3,98	-0,01	250,02	-4,30	-0,02			
2012	91	255,43	249,06	-6,37	-0,02	248,08	-7,35	-0,03			
2012	119	236,46	224,83	-11,63	-0,05	223,26	-13,21	-0,06			
2012	140	260,20	249,08	-11,12	-0,04	248,42	-11,79	-0,05			
2012	168	261,19	255,08	-6,10	-0,02	254,06	-7,13	-0,03			
2012	196	284,11	264,09	-20,01	-0,07	270,15	-13,96	-0,05			
2012	217	254,26	245,25	-9,01	-0,03	243,90	-10,36	-0,04			
2012	322	246,98	223,76	-23,22	-0,10	232,18	-14,80	-0,06			
2014	46	254,22	243,90	-10,32	-0,04	244,36	-9,86	-0,04			
2014	74	224,85	217,25	-7,60	-0,03	216,49	-8,36	-0,04			
2015	10	249,40	245,36	-4,04	-0,01	245,20	-4,20	-0,02			
2015	38	247,52	241,29	-6,24	-0,02	241,82	-5,71	-0,02			
2015	66	246,15	239,96	-6,18	-0,02	240,50	-5,64	-0,02			
2015	115	258,12	254,72	-3,39	-0,01	254,38	-3,73	-0,01			

Tabla 19: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Fort Peck con órbitas ascendentes y polarización V.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
A	ÁREAS	9,47	11,31	0,04	9,47	3,75	0,87	0,76	9,14E-06
A	GANANCIAS	8,26	9,03	0,03	8,26	3,28	0,95	0,91	9,99E-09

Tabla 20: Errores de los datos anteriores

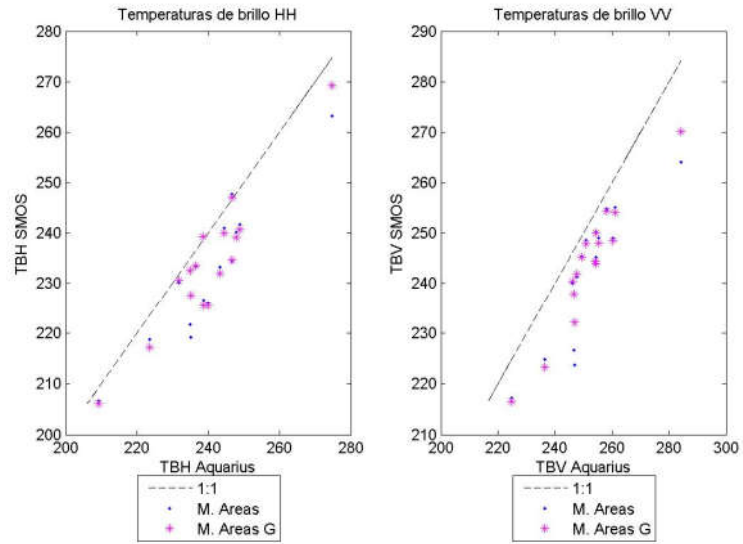


Figura 41: Plot datos de temperatura

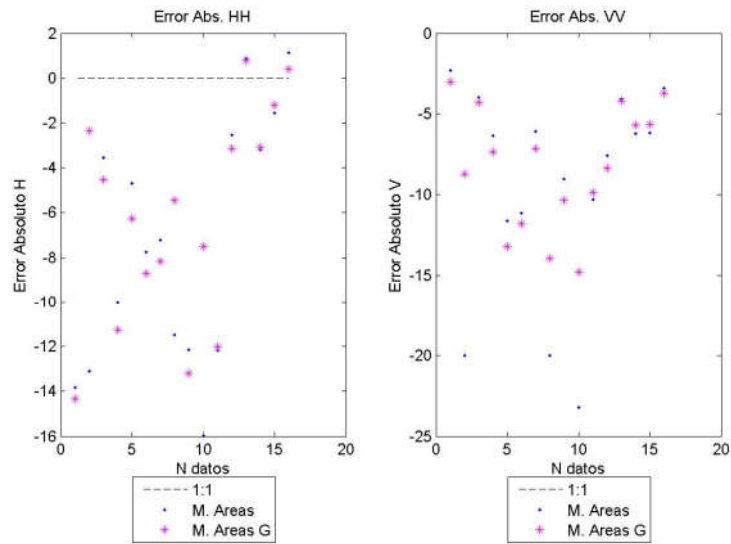


Figura 42: Plot errores absolutos

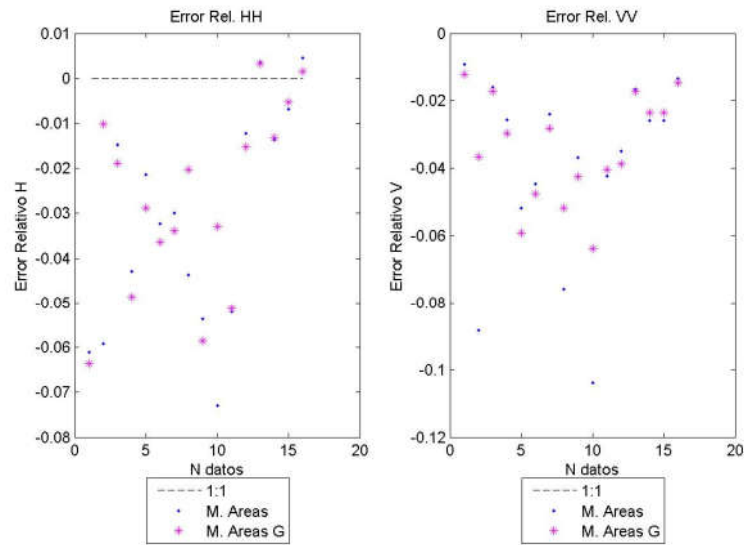


Figura 43: Plots de los errores relativos

En Fort Peck, sentido Ascendente, en polarización H, con el método de áreas se obtiene, un error medio de 7.33, reduciéndose a un 6.25 con el método de ganancias. El coeficiente de correlación es respectivamente 0.84 y 0.88.

Así mismo, en polarización V, el método de áreas obtiene un error medio de 9.47, pasando a 8.26 con el de ganancias. Los coeficientes de correlación son 0.76 y 0.91.

Al igual que ocurre con las zonas de estudio anteriores, los datos de Aquarius exceden a los de SMOS, en las dos polarizaciones.

MARRUECOS SENTIDO ASCENDENTE

POLARIZACIÓN H

YEAR	JDAY	AQ	AREAS	AE	RE	GANANCIA	AE	RE	TVDI	AE	RE
2012	6	253,67	250,25	-3,42	-0,01	250,19	-3,47	-0,014			
2012	34	230,77	226,52	-4,24	-0,02	227,60	-3,16	-0,014			
2012	83	267,04	260,63	-6,41	-0,02	261,20	-5,83	-0,02			
2012	104	234,21	239,08	4,87	0,02	241,59	7,38	0,03			
2012	111	253,10	254,28	1,18	0,004	254,13	1,03	0,004			
2012	132	272,76	272,21	-0,54	-0,002	272,75	-0,009	-3,34E-05			
2012	160	274,80	267,04	-7,76	-0,03	267,85	-6,95	-0,026			
2012	181	277,69	267,87	-9,82	-0,03	281,29	3,60	0,01			
2012	286	266,89	262,78	-4,11	-0,01	263,27	-3,62	-0,01			
2012	314	236,86	237,44	0,57	0,002	239,65	2,78	0,01			
2012	335	220,29	217,00	-3,29	-0,01	217,98	-2,31	-0,01			
2012	363	235,34	226,91	-8,43	-0,04	227,03	-8,31	-0,03			
2013	18	233,31	234,03	0,72	0,003	235,21	1,90	0,008			
2013	25	222,03	216,84	-5,19	-0,024	217,85	-4,18	-0,02			
2013	46	237,93	237,57	-0,35	-0,001	238,44	0,51	0,002			
2013	74	230,54	229,48	-1,06	-0,004	229,59	-0,95	-0,004			
2013	95	226,63	223,56	-3,07	-0,014	228,70	2,07	0,01			
2013	123	259,52	255,56	-3,96	-0,01	255,46	-4,05	-0,01			
2013	200	275,02	267,01	-8,01	-0,03	267,66	-7,35	-0,03			
2013	277	268,23	261,04	-7,19	-0,03	261,83	-6,39	-0,02			
2013	298	264,53	270,12	5,60	0,02	269,92	5,40	0,02			
2013	305	261,84	262,82	0,98	0,004	263,20	1,35	0,005			
2013	326	239,70	239,15	-0,55	-0,002	239,58	-0,12	-0,0005			
2014	38	226,06	220,38	-5,68	-0,02	221,77	-4,29	-0,02			
2014	66	243,89	240,59	-3,30	-0,01	242,42	-1,46	-0,006			
2014	115	258,32	251,00	-7,32	-0,03	251,34	-6,98	-0,03			
2015	58	239,80	242,07	2,26	0,009	242,20	2,398	0,010			
2015	107	252,00	252,48	0,48	0,002	259,36	7,36	0,03			

Tabla 21: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Marruecos con órbitas ascendentes y polarización H.

RESULTADOS

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
A	ÁREAS	2,75	4,84	0,02	3,94	1,56	0,97	0,95	2,3 E-18
A	GANANCIAS	1,20	4,50	0,02	3,76	1,50	0,97	0,94	1,9 E-17

Tabla 22: Errores de los datos anteriores

MARRUECOS SENTIDO ASCENDENTE

POLARIZACIÓN V

YEAR	JDA Y	AQ	AREAS	AE	RE	GANANCIAS	AE	RE	TVD I	A E	R E
2012	6	262,33	254,97	-7,36	-0,03	255,10	-7,23	-0,03			
2012	34	240,67	228,35	-12,31	-0,05	228,88	-11,79	-0,05			
2012	83	272,92	268,12	-4,81	-0,02	268,63	-4,29	-0,01			
2012	104	243,87	229,58	-14,29	-0,06	232,10	-11,77	-0,05			
2012	111	259,94	248,82	-11,12	-0,04	249,77	-10,17	-0,04			
2012	132	278,52	275,67	-2,85	-0,01	276,43	-2,08	-0,007			
2012	160	282,82	278,10	-4,72	-0,02	278,33	-4,48	-0,01			
2012	181	285,40	265,95	-19,45	-0,07	279,38	-6,01	-0,02			
2012	286	274,44	271,08	-3,36	-0,01	271,36	-3,08	-0,01			
2012	314	248,83	233,53	-15,30	-0,06	236,96	-11,87	-0,05			
2012	335	231,69	221,94	-9,75	-0,04	222,81	-8,88	-0,04			
2012	363	244,18	240,89	-3,29	-0,01	240,69	-3,48	-0,01			
2013	18	242,05	230,16	-11,89	-0,05	229,75	-12,29	-0,05			
2013	25	232,72	217,70	-15,02	-0,07	219,02	-13,70	-0,06			
2013	46	247,06	239,51	-7,54	-0,03	241,01	-6,05	-0,02			
2013	74	239,75	236,48	-3,27	-0,01	236,75	-3,00	-0,01			
2013	95	238,29	226,46	-11,83	-0,05	231,46	-6,82	-0,03			
2013	123	266,24	264,44	-1,80	-0,007	264,54	-1,69	-0,006			
2013	200	281,62	278,22	-3,40	-0,01	279,10	-2,52	-0,01			

2013	277	275,78	272,79	-2,99	-0,01	272,98	-2,80	-0,01			
2013	298	272,77	263,71	-9,06	-0,03	262,77	-10,00	-0,04			
2013	305	269,45	261,52	-7,93	-0,03	263,60	-5,85	-0,02			
2013	326	249,68	242,63	-7,05	-0,03	243,65	-6,02	-0,02			
2014	38	236,38	227,76	-8,62	-0,04	229,20	-7,18	-0,03			
2014	66	253,07	246,82	-6,25	-0,02	247,28	-5,79	-0,02			
2014	115	265,12	258,60	-6,51	-0,02	259,11	-6,01	-0,02			
2015	58	249,49	250,73	1,25	0,005	251,07	1,58	0,006			
2015	107	259,95	256,72	-3,23	-0,01	263,43	3,47	0,01			

Tabla 23: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Marruecos con órbitas ascendentes y polarización V.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
A	ÁREAS	7,63	9,02	0,03	7,72	3,05	0,97	0,93	4,7 E-17
A	GANANCIAS	6,06	7,34	0,03	6,43	2,55	0,98	0,96	1,42E-19

Tabla 24: Errores de los datos anteriores

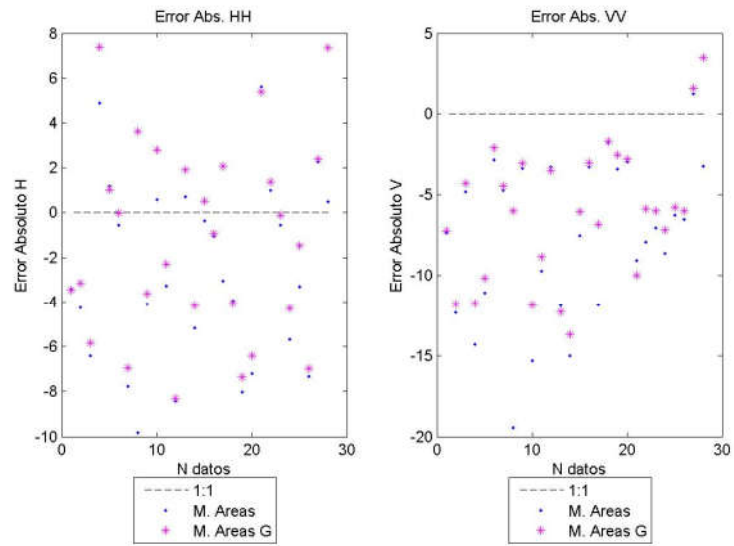


Figura 44: Plot datos de temperatura

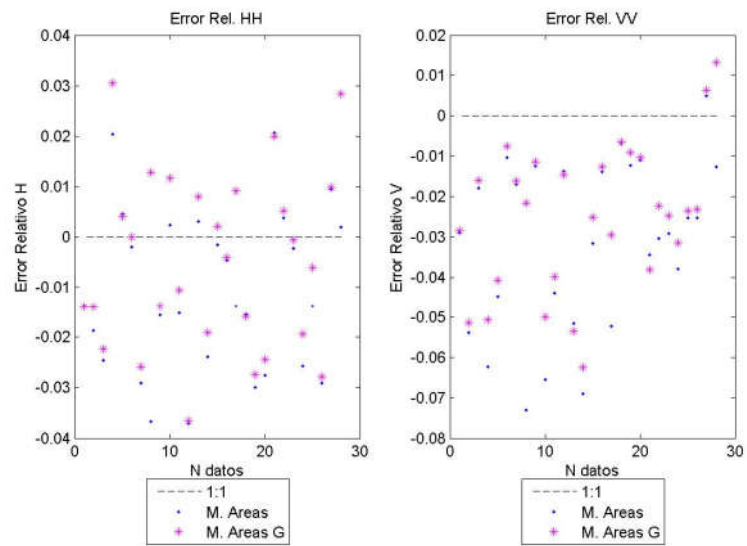


Figura 45: Plot errores absolutos

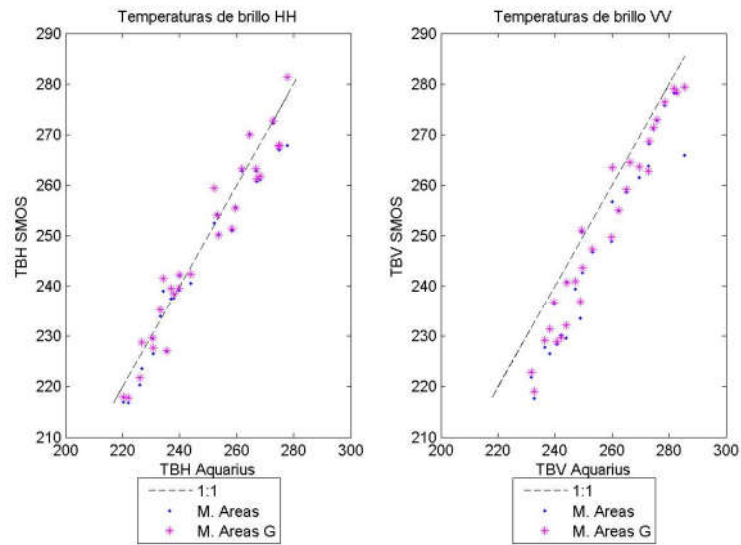


Figura 46: Plots de los errores relativos

En Marruecos sentido Ascendente y polarización H, se obtiene un 2.75 de error medio con el método de áreas, que queda reducido a un 1.20 con el método de ganancias. Ambos métodos tienen un coeficiente de correlación de 0.94.

En polarización V, el error medio del método de áreas es 7.63, que se reduce a 6.06 con el de ganancias. Los coeficientes de correlación son altos, un 0.93 en el primero y un 0.96 en el segundo.

Los errores absolutos y relativos nos indican que en polarización V, el dato de Aquarius excede a SMOS.

PACIFICO-SUR SENTIDO ASCENDENTE

POLARIZACIÓN H

YEAR	JDA Y	AQ	AREA S	AE	RE	GANANCI A	AE	RE	TVD I	A E	R E
2012	5	89,34	86,51	-2,83	-0,03	86,46	-2,88	-0,03			
2012	54	88,56	91,85	3,29	0,03	91,69	3,13	0,03			
2012	103	89,86	92,60	2,74	0,03	92,41	2,55	0,03			
2012	131	89,41	89,82	0,40	0,004	90,04	0,62	0,007			
2012	159	88,86	89,07	0,21	0,002	89,09	0,23	0,002			
2012	180	89,43	87,64	-1,78	-0,02	89,87	0,43	0,005			
2012	285	89,10	86,42	-2,68	-0,03	86,54	-2,56	-0,03			
2012	306	89,011	85,70	-3,31	-0,04	88,84	-0,17	-0,002			
2012	334	88,98	90,75	1,76	0,02	90,58	1,60	0,02			
2012	362	89,36	88,25	-1,10	-0,01	88,43	-0,92	-0,01			
2013	73	89,09	91,76	2,66	0,03	91,40	2,30	0,02			
2013	122	89,98	87,63	-2,35	-0,02	87,71	-2,26	-0,02			
2013	199	89,50	88,57	-0,92	-0,01	88,52	-0,97	-0,01			
2013	220	88,90	91,20	2,31	0,02	91,23	2,33	0,02			
2013	276	89,26	88,24	-1,01	-0,01	88,23	-1,02	-0,01			
2013	325	89,37	87,49	-1,88	-0,02	87,31	-2,06	-0,02			
2013	353	89,27	89,49	0,22	0,002	89,63	0,37	0,004			
2014	9	89,07	90,52	1,45	0,01	90,62	1,55	0,02			
2014	37	89,34	86,79	-2,55	-0,03	87,04	-2,30	-0,02			
2014	114	89,58	90,77	1,19	0,01	90,33	0,75	0,01			
2015	1	89,57	92,98	3,41	0,03	92,84	3,28	0,03			
2015	29	89,40	92,08	2,68	0,03	91,95	2,55	0,03			
2015	78	88,99	92,33	3,34	0,03	92,08	3,09	0,03			
2015	106	88,73	89,88	1,15	0,01	89,76	1,03	0,01			

Tabla 25: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Pacifico- Sur con órbitas ascendentes y polarización H.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
A	ÁREAS	-0,26	2,21	0,02	1,97	2,21	-0,09	0,010	0,68
A	GANANCIAS	-0,44	1,97	0,02	1,71	1,91	-0,12	0,01	0,57

Tabla 24: Errores de los datos anteriores

PACIFICO-SUR SENTIDO ASCENDENTE

POLARIZACIÓN V

YEAR	JDA Y	AQ	AREAS	AE	RE	GANANCIA	AE	RE	TVD I	A E	R E
2012	5	108,82	106,75	-2,07	-0,02	106,69	-2,13	-0,02			
2012	54	108,51	103,30	-5,21	-0,05	103,28	-5,23	-0,05			
2012	103	109,52	103,15	-6,37	-0,06	103,27	-6,25	-0,06			
2012	131	108,79	105,88	-2,91	-0,03	105,68	-3,10	-0,03			
2012	159	108,55	103,20	-5,35	-0,05	103,29	-5,26	-0,05			
2012	180	108,89	99,34	-9,54	-0,09	102,30	-6,59	-0,06			
2012	285	108,45	106,41	-2,04	-0,02	106,41	-2,04	-0,02			
2012	306	108,30	99,43	-8,87	-0,09	102,45	-5,85	-0,06			
2012	334	108,64	103,41	-5,22	-0,05	103,51	-5,12	-0,05			
2012	362	108,83	104,56	-4,27	-0,04	104,36	-4,47	-0,04			
2013	73	108,90	103,80	-5,10	-0,05	103,89	-5,01	-0,05			
2013	122	109,85	106,94	-2,91	-0,03	106,79	-3,05	-0,03			
2013	199	108,91	105,74	-3,17	-0,03	106,01	-2,89	-0,03			
2013	220	108,87	100,00	-8,88	-0,09	100,03	-8,83	-0,09			
2013	276	108,88	103,97	-4,91	-0,05	103,93	-4,95	-0,05			
2013	325	108,49	105,58	-2,90	-0,03	105,56	-2,92	-0,03			
2013	353	108,82	101,65	-7,16	-0,07	101,48	-7,33	-0,07			
2014	9	108,59	102,40	-6,19	-0,06	102,52	-6,07	-0,06			
2014	37	108,55	104,88	-3,66	-0,03	105,02	-3,53	-0,03			
2014	114	109,10	106,50	-2,60	-0,02	106,26	-2,84	-0,02			
2015	1	109,12	105,35	-3,76	-0,03	105,36	-3,76	-0,03			

RESULTADOS

2015	29	108,89	107,94	-0,94	-0,01	107,60	-1,29	-0,01			
2015	78	108,53	106,82	-1,71	-0,01	106,97	-1,55	-0,01			
2015	106	108,10	105,18	-2,93	-0,03	105,40	-2,70	-0,02			

Tabla 27: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Pacífico- Sur con órbitas ascendentes y polarización V.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
A	ÁREAS	4,53	5,09	0,04	4,53	4,16	0,17	0,03	0,42
A	GANANCIAS	4,28	4,68	0,04	4,28	3,94	0,11	0,01	0,58

Tabla 28: Errores de los datos anteriores

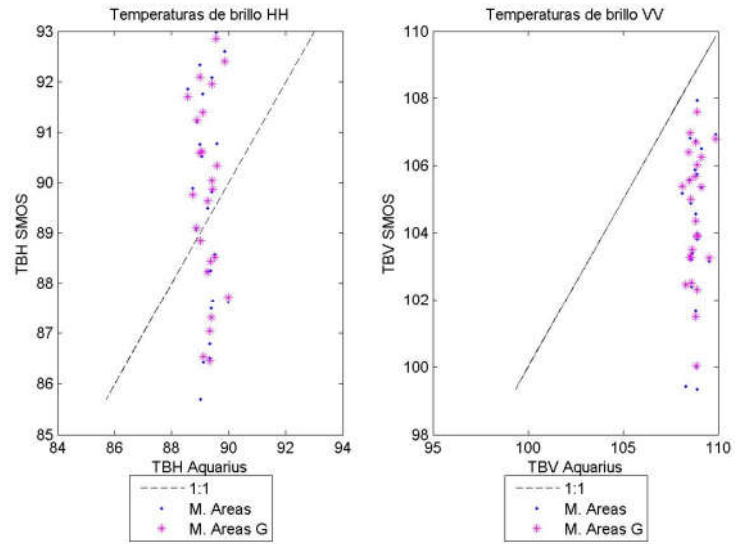


Figura 47: Plot datos de temperatura

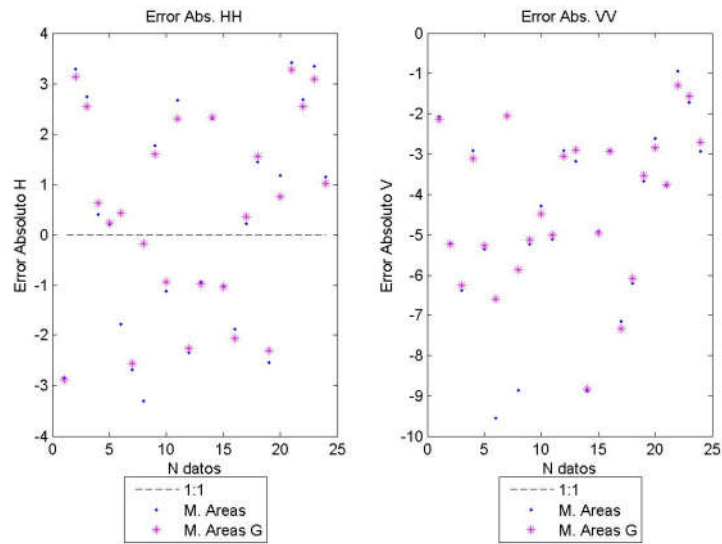


Figura 48: Plot errores absolutos

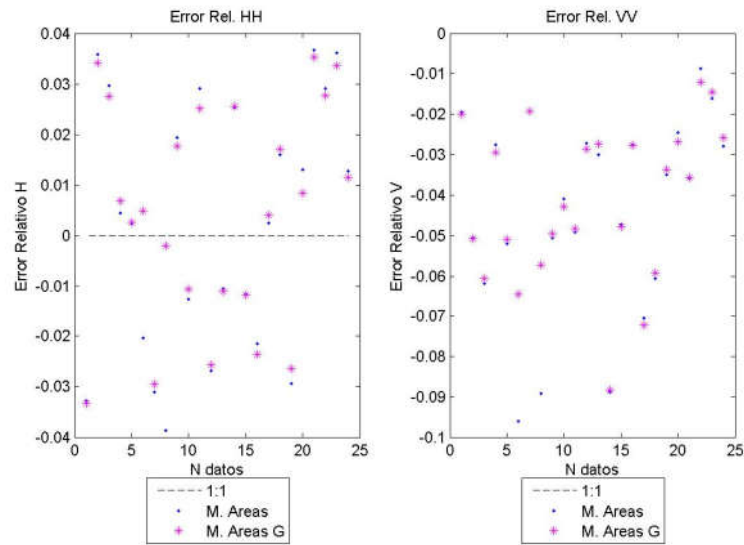


Figura 49: Plots de los errores relativos

Los datos que nos proporciona esta zona de estudio, nos dan unos errores medios tanto en polarización H como en V , en los dos métodos, es decir áreas y ganancias, muy parecidos. En polarización H , el método de áreas tiene un error medio de -0.26 , mientras su RMSE es 2.21 , mientras que el método de ganancias, su error es -0.44 y su RMSE es 1.97 . En polarización V , el método de áreas proporciona un error de 4.53 y un RMSE de 5.09 , mientras que el de ganancias obtiene un 4.28 con un RMSE de 4.68 .

Las diferencias entre los datos de Aquarius y SMOS decrecen en el mar y se hacen más patentes en zonas cálidas de tierra.

La correlación entre los datos es bastante baja y contrasta con las correlaciones en tierra, que pueda deberse a las diferencias de ciclos estacionales en los dos satélites.

PARK-FALLS SENTIDO ASCENDENTE

POLARIZACIÓN H

YEAR	JDAY	AQ	AREAS	AE	RE	GANANCIA	AE	RE	TVDI	AE	RE
2012	8	253,33	246,80	-6,53	-0,02	247,51	-5,82	-0,02			
2012	36	255,15	241,27	-13,88	-0,06	252,04	-3,11	-0,01			
2012	85	243,75	233,03	-10,72	-0,04	233,78	-9,97	-0,04			
2012	134	246,99	235,53	-11,46	-0,05	240,78	-6,21	-0,02			
2012	162	259,89	242,28	-17,61	-0,07	243,67	-16,22	-0,06			
2012	190	257,96	255,58	-2,38	-0,01	255,97	-1,99	-0,01			
2012	211	260,29	249,94	-10,35	-0,04	250,64	-9,65	-0,04			
2012	239	262,21	251,63	-10,57	-0,04	252,91	-9,30	-0,03			
2012	337	247,00	240,25	-6,75	-0,028	241,53	-5,47	-0,02			
2012	365	253,82	239,99	-13,83	-0,06	240,50	-13,31	-0,05			
2014	19	255,30	249,47	-5,83	-0,02	249,56	-5,74	-0,02			
2014	40	254,29	245,35	-8,93	-0,03	246,01	-8,28	-0,03			
2014	68	255,17	249,25	-5,91	-0,02	249,19	-5,97	-0,02			
2015	4	246,25	244,25	-2,00	-0,01	245,12	-1,13	-0,004			
2015	32	246,44	242,57	-3,87	-0,01	243,27	-3,17	-0,01			
2015	60	249,83	249,21	-0,62	-0,002	250,77	0,93	0,004			
2015	109	236,09	229,13	-6,96	-0,03	230,74	-5,35	-0,02			

Tabla 29: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Park Falls con órbitas ascendentes y polarización H.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
A	ÁREAS	8,13	9,30	0,037	8,13	3,21	0,77	0,60	0,0002
A	GANANCIAS	6,46	7,72	0,03	6,57	2,59	0,79	0,63	0,0001

Tabla 30: Errores de los datos anteriores

PARK-FALLS SENTIDO ASCENDENTE

POLARIZACIÓN V

YEAR	JDA Y	AQ	AREAS	AE	RE	GANANCIAS	AE	RE	TVD I	A E	R E
2012	8	256,54	263,05	6,51	0,02	264,10	7,56	0,03			
2012	36	257,67	250,12	-7,55	-0,03	261,56	3,88	0,01			
2012	85	249,68	243,20	-6,47	-0,02	244,07	-5,61	-0,02			
2012	134	252,16	237,28	-14,88	-0,06	242,39	-9,77	-0,04			
2012	162	264,05	254,28	-9,77	-0,04	255,62	-8,43	-0,03			
2012	190	262,48	249,40	-13,07	-0,05	250,44	-12,03	-0,05			
2012	211	263,97	253,47	-10,50	-0,04	254,13	-9,84	-0,04			
2012	239	265,74	259,77	-5,97	-0,02	260,26	-5,48	-0,02			
2012	337	250,57	239,21	-11,35	-0,05	240,39	-10,18	-0,042			
2012	365	256,31	248,90	-7,41	-0,03	249,34	-6,96	-0,03			
2014	19	257,64	246,38	-11,26	-0,04	246,78	-10,86	-0,04			
2014	40	256,55	247,84	-8,71	-0,03	248,49	-8,06	-0,03			
2014	68	258,82	251,55	-7,27	-0,029	251,85	-6,97	-0,03			
2015	4	250,07	246,48	-3,59	-0,01	247,27	-2,79	-0,01			
2015	32	250,97	249,35	-1,62	-0,006	249,78	-1,20	-0,005			
2015	60	253,28	247,28	-5,99	-0,02	249,15	-4,13	-0,01			
2015	109	242,72	240,44	-2,28	-0,01	241,02	-1,69	-0,007			

Tabla 31: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Park Falls con órbitas ascendentes y polarización V.

RESULTADOS

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
A	ÁREAS	7,13	8,64	0,03	7,89	3,07	0,70	0,48	0,002
A	GANANCIAS	5,44	7,49	0,03	6,79	2,64	0,68	0,46	0,003

Tabla 32: Errores de los datos anteriores

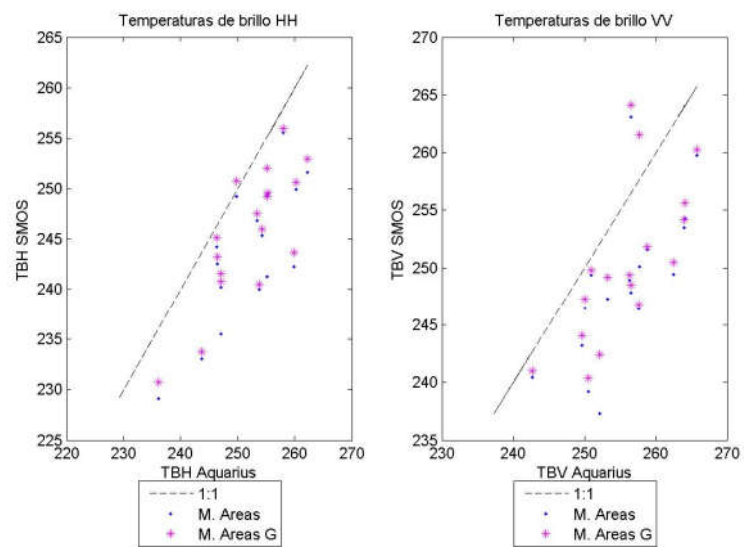


Figura 50: Plot datos de temperatura

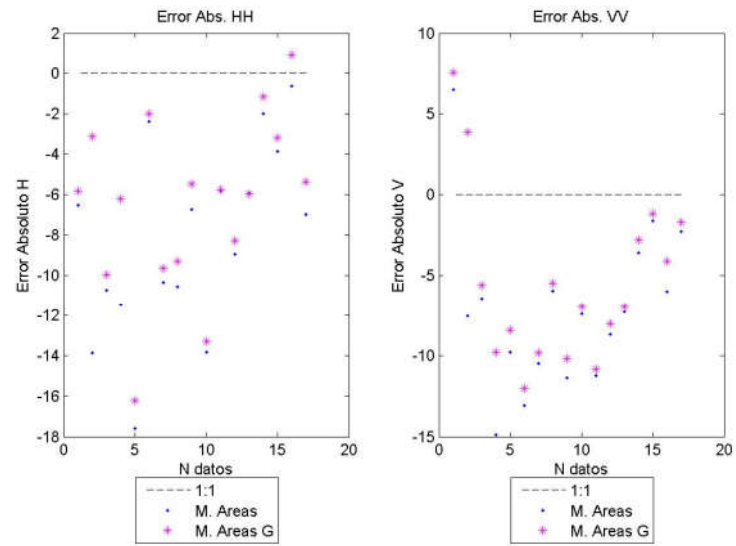


Figura 51: Plot errores absolutos

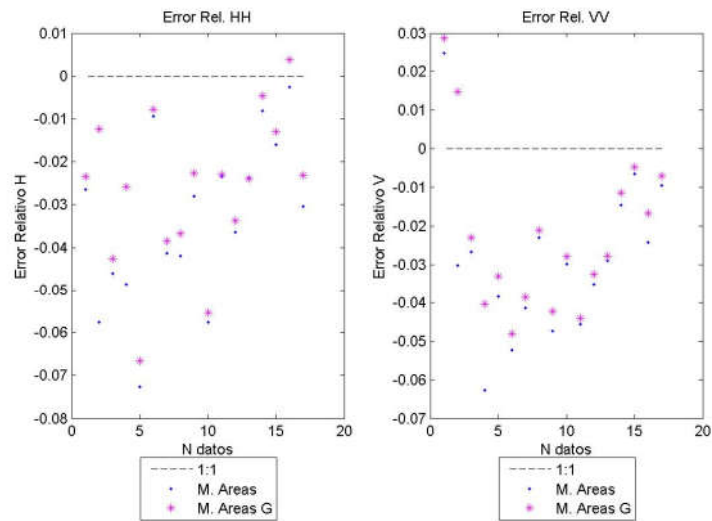


Figura 52: Plots de los errores relativos

En Park Falls, los errores medios en polarización H son 8.13 en el de áreas y 6.46 en el de ganancias. También se obtienen un RMSE de 9.30 y un R^2 de 0.60 con el primer método y un 7.72 y 0.63 respectivamente con el segundo.

En polarización V, los errores son 7.13 y 5.44 para el de áreas y el de ganancias. El RMSE es de 8.64 y R^2 de 0.48 para el primero y un 7.49 y 0.46 para el segundo.

En las dos polarizaciones, se da el caso que los datos de Aquarius son mayores que los obtenidos con SMOS.

SAHARA-SUR-CHAD SENTIDO ASCENDENTE

POLARIZACIÓN H

YEA R	JDA Y	AQ	AREAS	AE	RE	GANAN CIA	AE	RE	TV DI	A E	R E
2012	47	281,81	265,82	-15,98	-0,06	274,84	-6,97	-0,02			
2012	103	285,44	284,73	-0,71	-0,002	285,34	-0,10	-0,0003			
2012	152	229,36	219,54	-9,81	-0,04	220,40	-8,96	-0,04			
2012	180	260,32	253,45	-6,87	-0,03	253,98	-6,34	-0,02			
2012	229	226,00	211,35	-14,65	-0,07	212,10	-13,90	-0,06			
2012	306	273,85	269,05	-4,80	-0,02	270,33	-3,52	-0,01			
2012	355	275,49	265,72	-9,77	-0,03	266,31	-9,17	-0,03			
2013	66	282,73	269,83	-12,90	-0,05	269,97	-12,76	-0,05			
2013	94	283,77	274,09	-9,68	-0,03	274,16	-9,61	-0,03			
2013	143	284,44	275,09	-9,34	-0,03	275,00	-9,43	-0,03			
2013	220	216,79	218,60	1,81	0,008	218,92	2,13	0,010			
2013	241	224,30	220,90	-3,39	-0,01	221,24	-3,05	-0,01			
2013	269	260,61	245,46	-15,15	-0,06	252,96	-7,65	-0,03			
2013	346	278,07	265,47	-12,597	-0,05	265,66	-12,406	-0,04			

Tabla 33: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Sahara-Sur con órbitas ascendentes y polarización H.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
A	AREAS	8,85	10,29	0,04	9,10	3,47	0,98	0,95	1,64E-09
A	GANANCIAS	7,27	8,57	0,03	7,57	2,90	0,98	0,97	2,92E-10

Tabla 34: Errores de los datos anteriores

SAHARA-SUR-CHAD SENTIDO ASCENDENTE

POLARIZACIÓN V

YEAR	JDA Y	AQ	AREAS	AE	RE	GANANCIA	AE	RE	TVD I	A E	R E
2012	47	290,97	263,08	-27,89	-0,10	273,29	-17,67	-0,06			
2012	103	294,92	290,06	-4,86	-0,01	290,82	-4,10	-0,01			
2012	152	248,98	234,38	-14,60	-0,06	235,16	-13,81	-0,06			
2012	180	273,39	256,21	-17,18	-0,07	256,42	-16,97	-0,06			
2012	229	244,30	229,46	-14,84	-0,06	230,43	-13,87	-0,06			
2012	306	283,89	276,79	-7,10	-0,02	278,58	-5,31	-0,02			
2012	355	284,56	266,47	-18,10	-0,07	267,78	-16,78	-0,06			
2013	66	291,75	272,05	-19,70	-0,07	272,14	-19,62	-0,07			
2013	94	293,97	272,97	-21,00	-0,07	272,84	-21,13	-0,08			
2013	143	294,49	288,09	-6,40	-0,02	286,96	-7,53	-0,02			
2013	220	234,12	230,24	-3,88	-0,01	230,28	-3,84	-0,01			
2013	241	241,28	222,10	-19,17	-0,08	223,30	-17,97	-0,08			
2013	269	273,19	256,76	-16,42	-0,06	265,64	-7,54	-0,03			
2013	346	286,83	270,36	-16,477	-0,06	271,34	-15,50	-0,06			

Tabla 35: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Sahara-Sur con órbitas ascendentes y polarización V.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
A	ÁREAS	14,83	16,26	0,06	14,83	5,41	0,95	0,90	1,74E-07
A	GANANCIAS	12,97	14,22	0,05	12,97	4,74	0,96	0,93	3,44E-08

Tabla 36: Errores de los datos anteriores

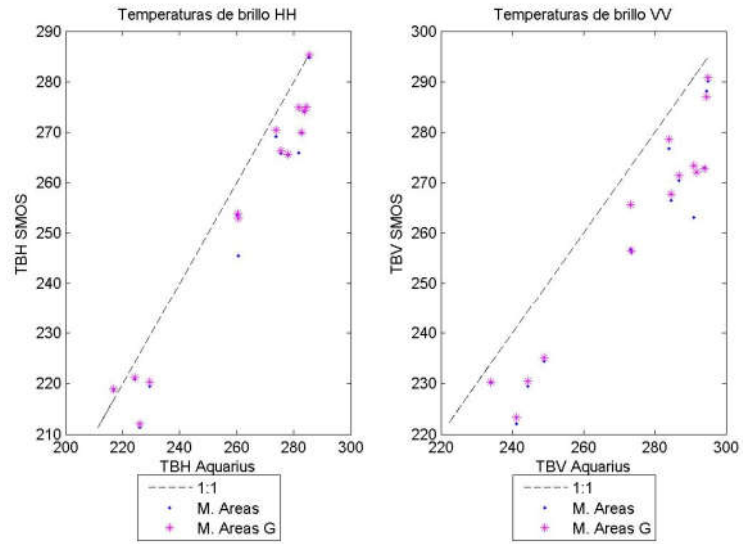


Figura 53: Plot datos de temperatura

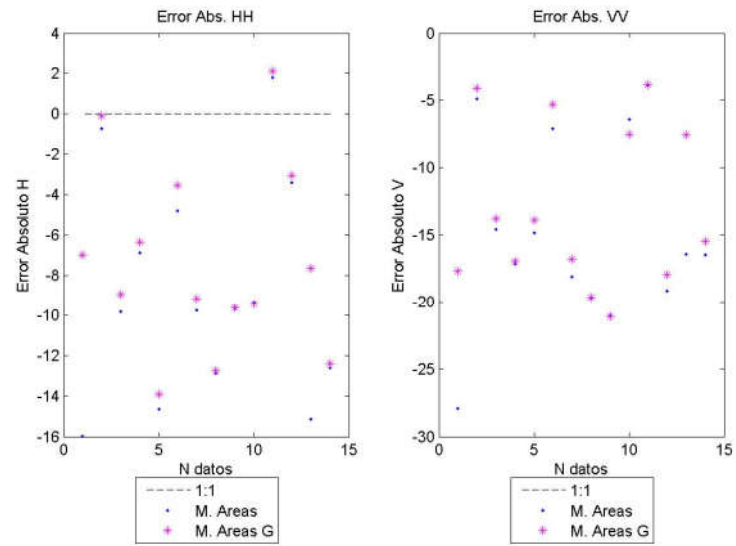


Figura 54: Plot errores absolutos

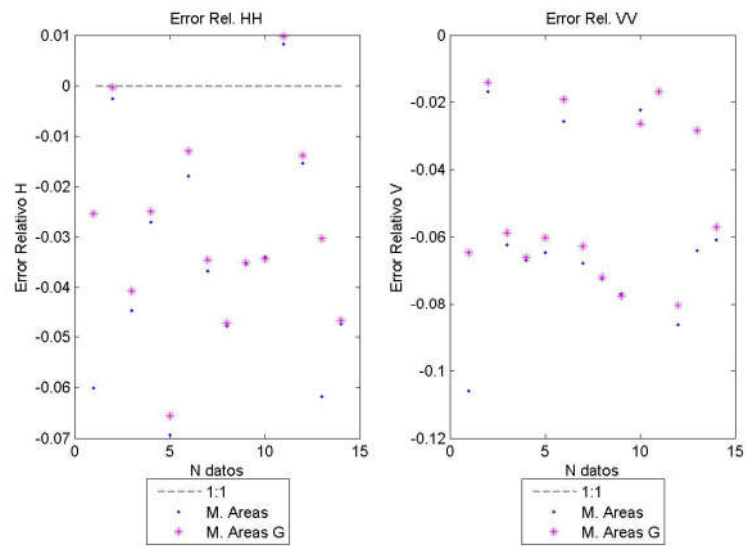


Figura 55: Plots de los errores relativos

En la zona de África Central- Chad, se encuentra ubicada la zona de estudio. En polarización H se ha obtenido un error medio con el método de áreas de 8.85, y un RMSE de 10.29. La correlación es 0.95. El método de ganancias, obtiene mejores resultados, un error medio de 7.27, un RMSE de 8.57 y una correlación de 0.97.

En polarización vertical, se obtienen peores resultados. El método de áreas tiene un error de 14.83, un RMSE de 16.26 y una correlación de 0.90, mientras que el método de ganancias consigue mejorar a un 12.97 el error medio, un 14.22 el RMSE y un 0.93 en el coeficiente de correlación.

En polarización V, todos los datos de Aquarius son mayores que los que se obtienen con SMOS, en polarización H, también ocurre lo mismo salvo en un caso.

Aquarius tiene temperaturas más altas que SMOS, y estas diferencias se acentúan en zonas cálidas.

SANTA RITA SENTIDO ASCENDENTE

POLARIZACIÓN H

YEA R	JDA Y	AQ	AREAS	AE	RE	GANANCI A	AE	RE	TVD I	A E	R E
2012	21	257,24	247,63	-9,60	-0,04	252,11	-5,13	-0,02			
2012	49	239,71	229,25	-10,46	-0,04	233,45	-6,26	-0,02			
2012	77	270,89	263,12	-7,77	-0,03	271,60	0,71	0,002			
2012	154	281,71	270,02	-11,69	-0,04	279,15	-2,55	-0,010			
2012	175	284,06	278,75	-5,31	-0,02	280,87	-3,19	-0,01			
2012	252	252,78	245,82	-6,96	-0,03	247,09	-5,69	-0,02			
2012	329	268,25	249,72	-18,53	-0,07	258,06	-10,19	-0,04			
2013	12	255,37	242,04	-13,32	-0,05	249,45	-5,91	-0,02			
2013	40	258,78	246,93	-11,85	-0,05	249,47	-9,31	-0,04			
2013	89	274,52	263,03	-11,49	-0,04	271,10	-3,42	-0,01			
2013	166	276,77	257,72	-19,05	-0,07	266,2	-10,52	-0,04			

RESULTADOS

2013	243	253,63	242,91	-10,72	-0,04	244,41	-9,22	-0,04			
2013	264	262,00	256,19	-5,80	-0,02	262,35	0,35	0,001			
2013	271	274,57	271,09	-3,48	-0,01	275,07	0,50	0,002			
2013	320	269,20	262,64	-6,56	-0,02	262,48	-6,72	-0,02			
2015	24	253,38	254,36	0,98	0,004	254,60	1,21	0,005			
2015	73	262,33	259,20	-3,13	-0,01	259,94	-2,39	-0,010			

Tabla 37: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Santa Rita con órbitas ascendentes y polarización H.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
A	ÁREAS	9,10	10,42	0,04	9,22	3,48	0,91	0,82	4,48E-07
A	GANANCIAS	4,57	5,94	0,02	4,90	1,87	0,95	0,91	2,20E-09

Tabla 38: Errores de los datos anteriores

SANTA RITA SENTIDO ASCENDENTE

POLARIZACIÓN V

YE R	JDA Y	AQ	AREA S	AE	RE	GANANCI A	AE	RE	TVD I	A E	R E
2012	21	266,69	253,01	-13,68	-0,05	257,90	-8,79	-0,03			
2012	49	251,97	242,15	-9,82	-0,04	246,49	-5,47	-0,02			
2012	77	278,28	254,84	-23,44	-0,09	263,37	-14,91	-0,05			
2012	154	290,40	268,48	-21,92	-0,08	276,51	-13,89	-0,05			
2012	175	292,47	281,34	-11,13	-0,04	283,82	-8,66	-0,03			
2012	252	265,17	258,09	-7,08	-0,03	259,31	-5,86	-0,02			
2012	329	276,53	261,12	-15,41	-0,06	269,88	-6,65	-0,02			
2013	12	263,52	247,24	-16,27	-0,06	254,73	-8,79	-0,03			
2013	40	268,00	258,54	-9,46	-0,03	261,64	-6,35	-0,02			
2013	89	281,36	266,13	-15,23	-0,06	274,27	-7,08	-0,02			
2013	166	286,72	269,90	-16,82	-0,06	278,37	-8,35	-0,03			

RESULTADOS

2013	243	266,48	260,35	-6,13	-0,02	262,15	-4,32	-0,01			
2013	264	272,59	251,57	-21,03	-0,08	257,61	-14,98	-0,06			
2013	271	282,90	263,77	-19,13	-0,07	267,98	-14,92	-0,05			
2013	320	277,72	272,19	-5,53	-0,02	271,83	-5,89	-0,02			
2015	24	263,71	261,13	-2,58	-0,01	260,89	-2,81	-0,01			
2015	73	271,20	268,25	-2,94	-0,01	268,99	-2,21	-0,01			

Tabla 39: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Santa Rita con órbitas ascendentes y polarización V.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
A	ÁREAS	12,80	14,32	0,05	12,80	4,64	0,80	0,63	0,0001
A	GANANCIAS	8,23	9,16	0,03	8,23	2,98	0,92	0,85	1,08E-07

Tabla 40: Errores de los datos anteriores

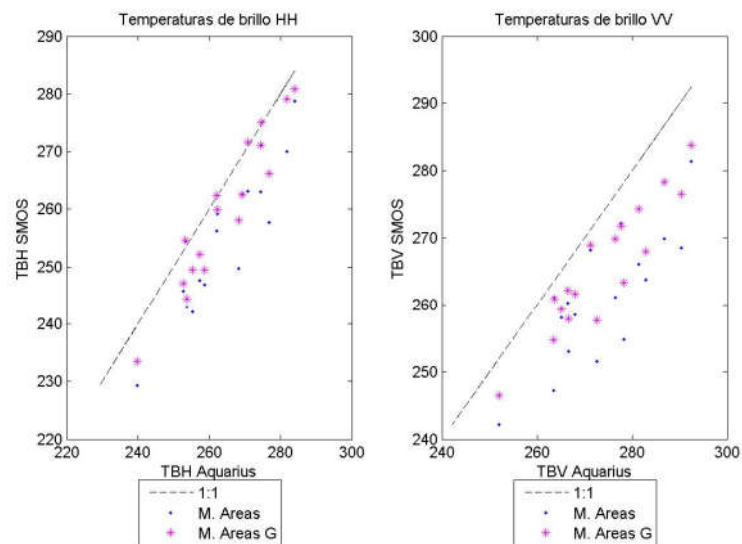


Figura 56: Plot datos de temperatura

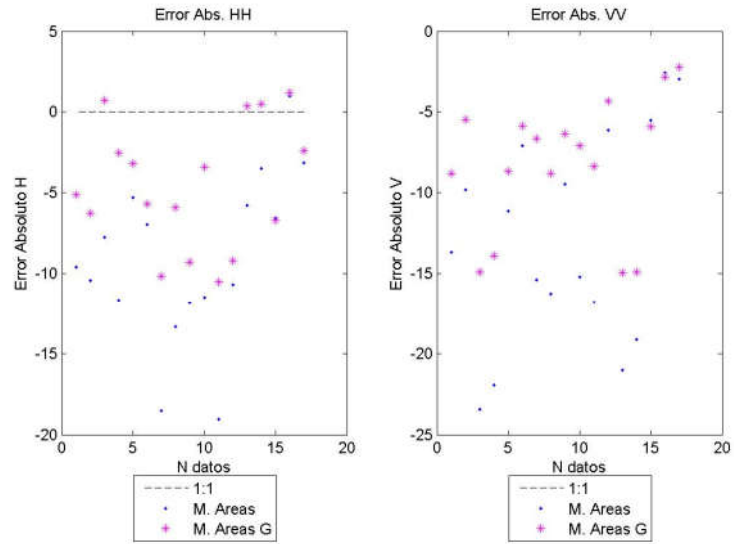


Figura 57: Plot errores absolutos

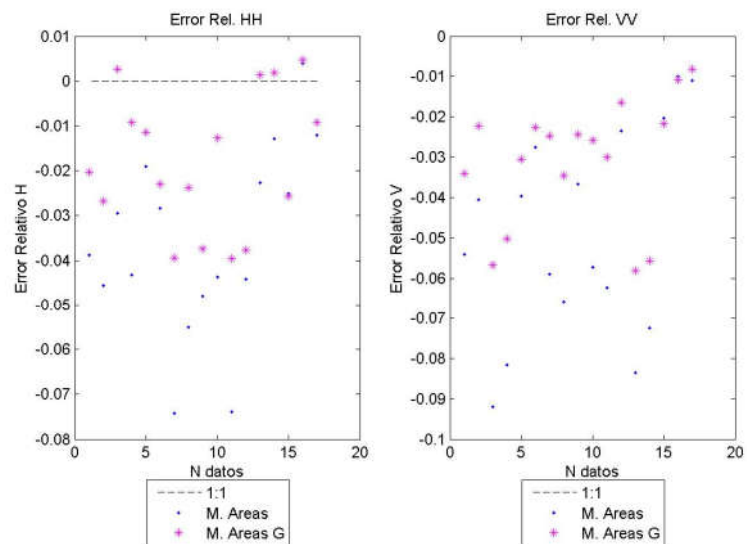


Figura 58: Plots de los errores relativos

Santa Rita es una zona de validación de los satélites SMOS y SMAP. En el sentido ascendente y en la polarización H, el método de áreas obtiene un 9.10 en el error medio, un 10.42 en RMSE y coeficiente de correlación de 0.82, mientras que el método de ganancias consigue reducir el error medio a la mitad, un 4.57, un RMSE de 5.94 y hay un aumento de la correlación de 9 puntos, siendo 0.91.

En polarización V, el método de áreas obtiene un error medio de 12.80, un RMSE de 14.32 y un coeficiente de correlación de 0.63. El método de ganancias consigue mejorar los resultados, dejando el error medio en un 8.23, un RMSE de 9.16 y aumentando la correlación en 22 puntos, siendo 0.85.

También ocurre que en polarización V y en la H salvo 4 casos, los datos de Aquarius son mayores que los que se obtienen con SMOS con los distintos métodos.

SANTA RITA SENTIDO DESCENDENTE

POLARIZACIÓN H

YEA R	JDA Y	AQ	AREA S	AE	RE	GANANCI A	AE	RE	TVD I	A E	R E
2012	3	263,51	258,50	-5,01	-0,02	258,80	-4,72	-0,02			
2012	52	264,33	255,73	-8,60	-0,03	256,13	-8,20	-0,03			
2012	80	233,92	231,33	-2,59	-0,01	232,20	-1,72	-0,007			
2012	101	283,31	272,92	-10,39	-0,04	273,24	-10,06	-0,03			
2012	108	278,83	278,87	0,04	0,0001	278,62	-0,20	-0,0007			
2012	129	285,76	271,75	-14,01	-0,05	272,02	-13,74	-0,05			
2012	178	280,47	271,33	-9,14	-0,03	272,19	-8,28	-0,03			
2012	206	266,84	255,85	-10,99	-0,04	256,34	-10,49	-0,04			
2012	255	250,54	240,38	-10,16	-0,04	240,15	-10,39	-0,04			

RESULTADOS

2012	311	278,23	272,82	-5,41	-0,02	272,75	-5,48	-0,02			
2012	332	273,56	263,26	-10,30	-0,04	263,28	-10,28	-0,04			
2012	360	251,87	246,01	-5,86	-0,02	246,08	-5,79	-0,02			
2013	15	256,14	251,09	-5,05	-0,02	250,84	-5,30	-0,02			
2013	43	239,17	234,06	-5,11	-0,02	232,87	-6,30	-0,03			
2013	92	281,71	269,97	-11,74	-0,04	278,44	-3,27	-0,01			
2013	120	287,35	281,31	-6,03	-0,02	281,93	-5,41	-0,02			
2013	169	293,11	293,25	0,13	0,0004	293,24	0,13	0,0004			
2013	225	282,35	282,16	-0,19	-0,0007	282,53	0,18	0,0006			
2013	246	273,40	260,00	-13,39	-0,05	261,86	-11,53	-0,04			
2013	323	274,93	269,86	-5,07	-0,02	270,05	-4,88	-0,02			
2014	35	264,29	254,38	-9,90	-0,04	254,46	-9,83	-0,04			
2014	84	279,61	270,42	-9,19	-0,03	270,55	-9,06	-0,03			
2015	27	258,19	260,70	2,51	0,01	260,97	2,78	0,01			
2015	48	256,07	251,92	-4,15	-0,01	251,43	-4,64	-0,02			
2015	76	273,14	269,46	-3,67	-0,01	269,32	-3,82	-0,01			
2015	125	274,09	275,95	1,86	0,007	275,87	1,782	0,006			
2015	153	286,37	284,76	-1,60	-0,005	284,53	-1,84	-0,006			

Tabla 41: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Santa Rita con órbitas descendentes y polarización H.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
D	ÁREAS	6,04	7,56	0,03	6,37	2,36	0,95	0,91	1,53E-14
D	GANANCIAS	5,57	7,02	0,02	5,93	2,20	0,96	0,92	2,27E-15

Tabla 42: Errores de los datos anteriores

SANTA RITA SENTIDO DESCENDENTE

POLARIZACIÓN V

YEAR	JDAY	AQ	AREAS	AE	RE	GANANCIAS	AE	RE	TVDI	AE	RE
2012	3	272,54	259,98	-12,55	-0,05	260,27	-12,26	-0,05			
2012	52	273,41	265,52	-7,89	-0,03	266,09	-7,32	-0,03			
2012	80	247,43	238,42	-9,01	-0,04	238,90	-8,53	-0,03			
2012	101	291,15	282,49	-8,66	-0,03	282,20	-8,95	-0,03			
2012	108	286,31	275,78	-10,53	-0,04	275,64	-10,66	-0,04			
2012	129	293,78	285,36	-8,42	-0,03	285,47	-8,31	-0,03			
2012	178	292,22	281,22	-11,00	-0,04	281,88	-10,34	-0,03			
2012	206	277,71	267,59	-10,12	-0,04	267,84	-9,87	-0,03			
2012	255	263,45	257,79	-5,66	-0,02	257,66	-5,79	-0,02			
2012	311	286,42	274,11	-12,31	-0,04	274,28	-12,15	-0,04			
2012	332	282,05	274,71	-7,34	-0,02	274,40	-7,65	-0,03			
2012	360	262,63	250,47	-12,16	-0,05	251,06	-11,56	-0,04			
2013	15	264,87	258,97	-5,90	-0,02	259,10	-5,77	-0,02			
2013	43	250,65	245,04	-5,61	-0,02	244,28	-6,37	-0,02			
2013	92	289,38	271,11	-18,27	-0,07	280,26	-9,11	-0,03			
2013	120	295,23	287,86	-7,37	-0,02	288,32	-6,90	-0,02			
2013	169	301,89	294,30	-7,59	-0,02	294,86	-7,03	-0,02			
2013	225	292,97	288,04	-4,92	-0,02	288,04	-4,92	-0,02			
2013	246	284,67	270,23	-14,43	-0,05	272,05	-12,61	-0,04			
2013	323	283,85	277,07	-6,78	-0,02	276,89	-6,95	-0,02			
2014	35	273,54	258,53	-15,01	-0,06	258,81555	-14,72	-0,05			
2014	84	287,71	281,76	-5,95	-0,02	281,70	-6,01	-0,02			
2015	27	268,63	264,24	-4,392	-0,01	264,46	-4,17	-0,0			
2015	48	268,44	261,31	-7,13	-0,03	261,06	-7,38	-0,03			
2015	76	282,50	276,45	-6,05	-0,02	276,5572	-5,94	-0,02			
2015	125	284,39	279,51	-4,88	-0,02	279,04	-5,35	-0,02			
2015	153	295,56	292,49	-3,07	-0,01	292,20	-3,36	-0,01			

Tabla 43: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Santa Rita con órbitas descendentes y polarización V.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
D	ÁREAS	8,63	9,34	0,03	8,63	3,09	0,96	0,93	2,79E-16
D	GANANCIAS	8,15	8,61	0,03	8,15	2,92	0,98	0,96	4,36E-19

Tabla 44: Errores de los datos anteriores

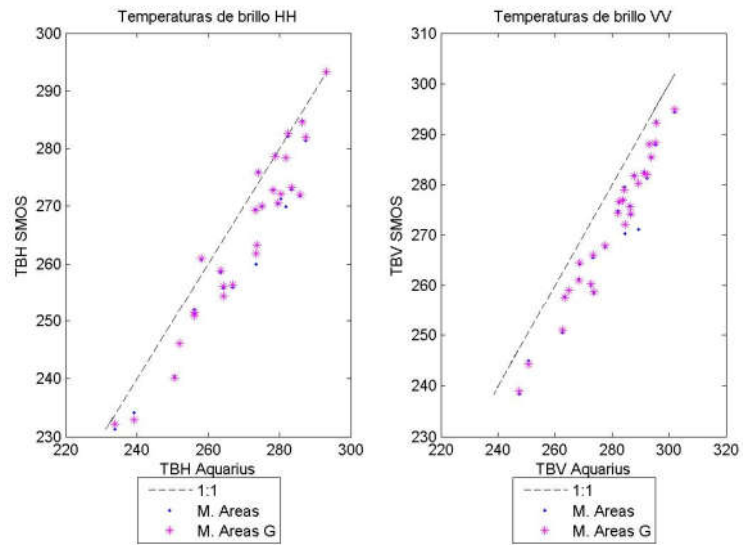


Figura 59: Plot datos de temperatura

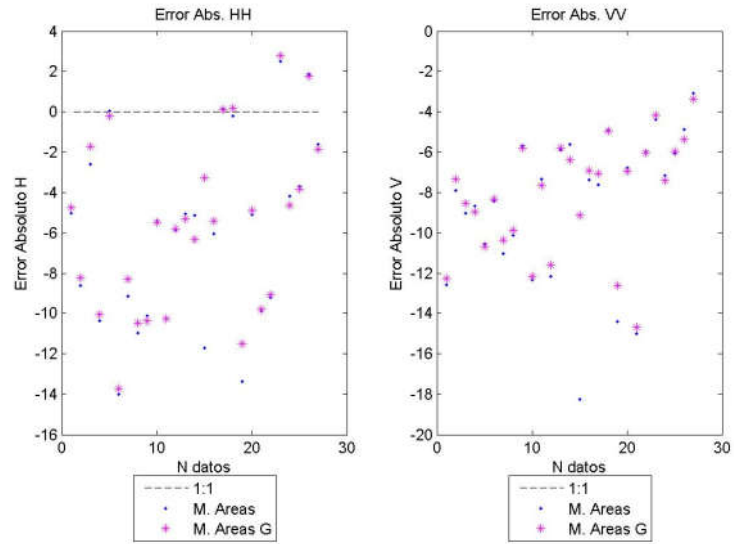


Figura 60: Plot errores absolutos

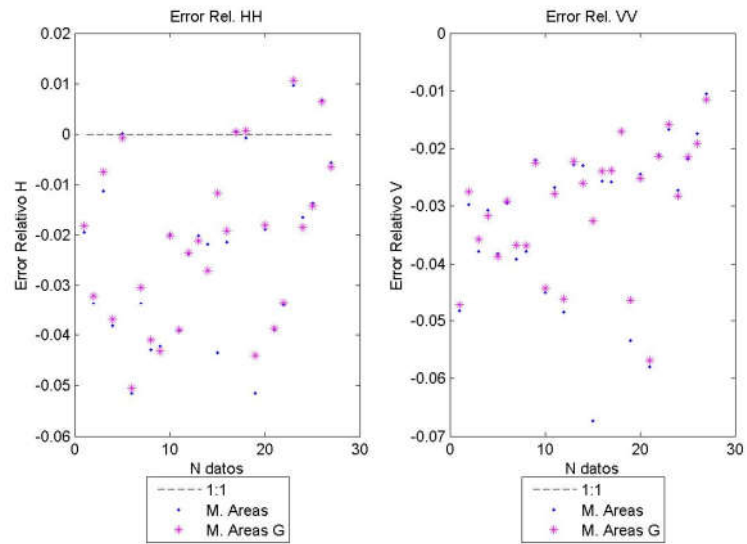


Figura 61: Plots de los errores relativos

En la misma zona, con sentido descendente y en polarización H, los errores medios pasan de 6.04 con el método de áreas a mejorar con un 5.57, utilizando el de ganancias. Los RMSE son 7.56 y 7.02 respectivamente, y las correlaciones son prácticamente iguales 0.91 y 0.92.

En polarización V, en los dos métodos se obtienen errores medios bastante parecidos, aunque con una ligera ventaja con el método de ganancias. Son 8.63 y 8.15 respectivamente. Los RMSE son 9.34 y 8.61, y los coeficientes de correlación 0.93 y 0.96.

Los datos de Aquarius son mayores que los obtenidos con SMOS.

SKY OAKS SENTIDO ASCENDENTE

POLARIZACIÓN H

YE R	JDA Y	AQ	AREAS	AE	RE	GANAN CIA	AE	RE	TV DI	A E	R E
2012	92	238,41	223,48	-14,93	-0,06	227,11	-11,29	-0,05			
2012	113	255,34	250,69	-4,65	-0,02	253,52	-1,82	-0,007			
2012	120	252,05	252,86	0,81	0,003	250,40	-1,64	-0,006			
2012	169	263,86	254,39	-9,47	-0,04	254,30	-9,55	-0,04			
2012	190	266,00	262,36	-3,64	-0,01	261,33	-4,67	-0,02			
2012	323	258,19	250,37	-7,82	-0,03	248,92	-9,27	-0,04			
2014	47	253,20	246,33	-6,87	-0,03	239,84	-13,36	-0,05			
2014	75	251,73	249,22	-2,50	-0,01	243,56	-8,17	-0,03			
2015	11	239,09	234,48	-4,61	-0,02	236,71	-2,37	-0,01			
2015	39	243,19	231,94	-11,25	-0,05	226,71	-16,48	-0,07			
2015	60	230,45	226,89	-3,56	-0,01	224,58	-5,86	-0,02			
2015	67	242,71	237,22	-5,48	-0,02	231,50	-11,21	-0,05			
2015	116	238,06	229,33	-8,73	-0,04	221,87	-16,19	-0,07			

Tabla 45: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de SkyOaks con órbitas ascendentes y polarización H.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
A	ÁREAS	6,36	7,49	0,03	6,49	2,62	0,94	0,89	1,21E-06
A	GANANCIAS	8,61	9,91	0,04	8,61	3,48	0,92	0,85	6,41E-06

Tabla 46: Errores de los datos anteriores

SKY OAKS SENTIDO ASCENDENTE

POLARIZACIÓN V

YEAR	JDAY	AQ	AREAS	AE	RE	GANANCIA	AE	RE	TVDI	AE	RE
2012	92	248,36	235,19	-13,17	-0,05	239,29	-9,07	-0,04			
2012	113	263,55	248,64	-14,90	-0,06	251,85	-11,70	-0,04			
2012	120	263,86	249,04	-14,81	-0,06	246,48	-17,38	-0,07			
2012	169	271,30	261,52	-9,78	-0,04	261,09	-10,21	-0,04			
2012	190	274,68	264,45	-10,23	-0,04	263,04	-11,63	-0,04			
2014	47	261,84	253,16	-8,68	-0,03	246,46	-15,38	-0,06			
2014	75	260,70	246,91	-13,79	-0,05	240,86	-19,85	-0,08			
2015	11	249,93	243,64	-6,30	-0,02	245,97	-3,96	-0,01			
2015	39	253,23	240,98	-12,25	-0,05	235,70	-17,52	-0,07			
2015	60	240,95	239,98	-0,96	-0,004	237,65	-3,30	-0,01			
2015	67	251,60	247,81	-3,79	-0,01	242,21	-9,39	-0,04			
2015	116	249,05	240,79	-8,25	-0,03	233,55	-15,50	-0,06			

Tabla 47: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de SkyOaks con órbitas ascendentes y polarización V.

Sentido	METODO	ME	RMSE	RRMSE	MAE	NMAE	R	R2	RP
A	ÁREAS	9,74	10,62	0,04	9,74	3,76	0,90	0,81	6,28E-05
A	GANANCIAS	12,07	13,08	0,05	12,07	4,66	0,86	0,73	0,0003

Tabla 48: Errores de los datos anteriores

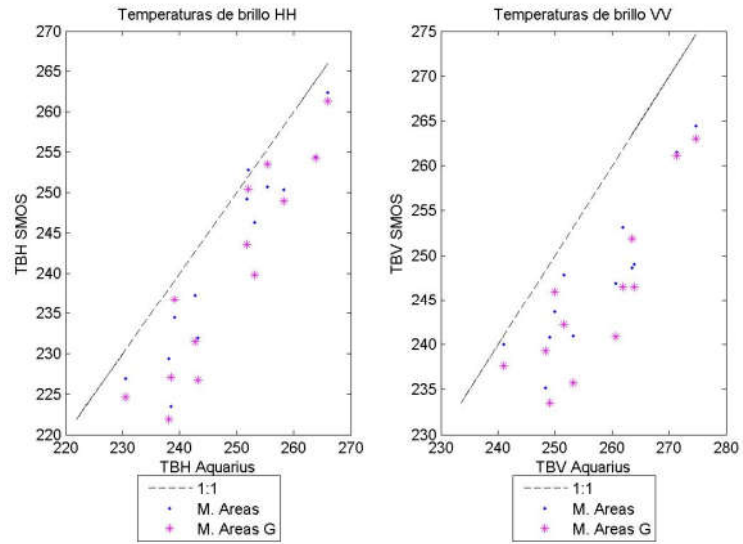


Figura 62: Plot datos de temperatura

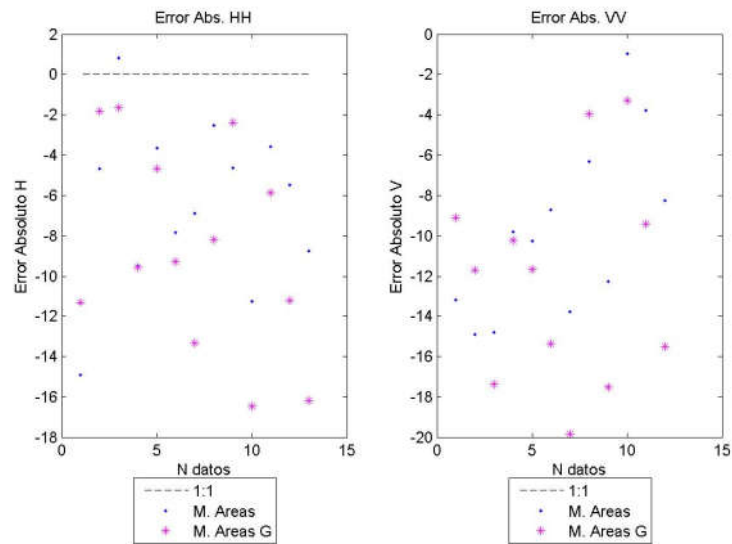


Figura 63: Plot errores absolutos

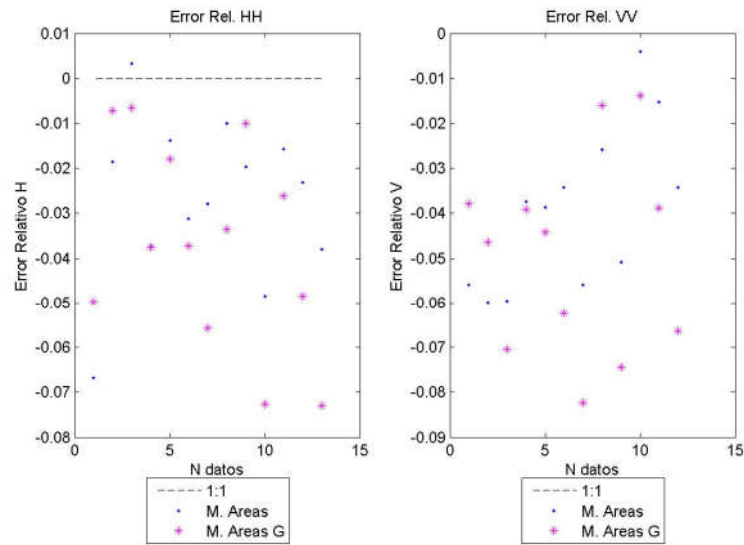


Figura 64: Plots de los errores relativos

Sky Oaks es la única zona de estudio en la que en polarización H, no se consigue mejorar los resultados con el método de ganancias. Siendo el error medio de 6.36, el RMSE de 7.49 y el R^2 de 0.89, con el método de áreas, mientras que con el método de ganancias es 8.61 el error medio, 9.91 el RMSE y un R^2 de 0.85.

Lo mismo ocurre en polarización V. Con el método de áreas, el error medio es 9.74, el RMSE es 10.62 y el R^2 es 0.81, mientras que con el método de ganancias se obtienen un 12.07 en el error medio, un 13.08 en el RMSE y un 0.73 en R^2 de 0.73.

En resumen, cuando se dispone de datos, siempre se obtienen mejores resultados con órbitas ascendentes que descendentes, mejor en polarización H que en polarización V.

Los mejores resultados se obtienen en la zona del Pacífico Sur con polarización H, confirmando la hipótesis que en temperaturas bajas, las diferencias de las observaciones de SMOS y Aquarius decrecen.

En cambio, los peores resultados se obtienen en el Sahara y Santa Rita, zonas desérticas o muy áridas, lo cual confirma que las diferencias entre SMOS y Aquarius crecen cuando aumenta la temperatura.

En todas las zonas, el método que consigue reducir más las diferencias entre los datos de Aquarius y SMOS es el método de la ganancia. Si se consiguen datos con el método de TVDI, le sigue este método y por último el método de áreas.

Resultan sorprendentes los resultados que se consiguen en la zona de Santa Rita, con órbitas ascendentes y polarización H, en el que el método de ganancias consigue un error medio y RMSE que son la mitad de los que se consiguen con el método de áreas.

A continuación se muestran los *diagramas de Taylor* con todas las zonas estudiadas. Los diagramas de Taylor son un gran resumen visual de los resultados obtenidos ya que permiten evaluar múltiples aspectos de los modelos. En ellos aparecen los datos de la desviación estándar en el eje X, el coeficiente de correlación en el eje Y y el RMS (*Root Mean Square*) en los círculos punteados de color verde.

Los puntos que aparecen en los diagramas de Taylor anteriores se corresponden con las zonas de estudio. A = Amazonas Ascendente, B = Amazonas Descendente, C = España Ascendente, D = España Descendente, E = Fort Peck Ascendente, F = Marruecos Ascendente, G = Pacífico Sur Ascendente, H = ParkFalls Ascendente, I = Sahara Sur-Chad Ascendente, J = Santa Rita Ascendente, K = Santa Rita Descendente, L = Sky Oaks Ascendente.

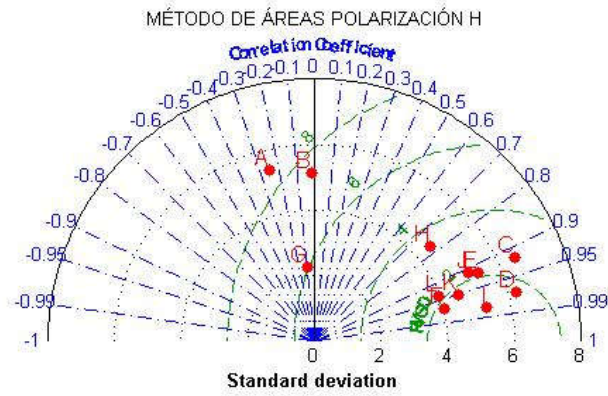


Figura 65: Diagrama de Taylor con los resultados obtenidos con el método de áreas en las zonas de estudio con la polarización H.

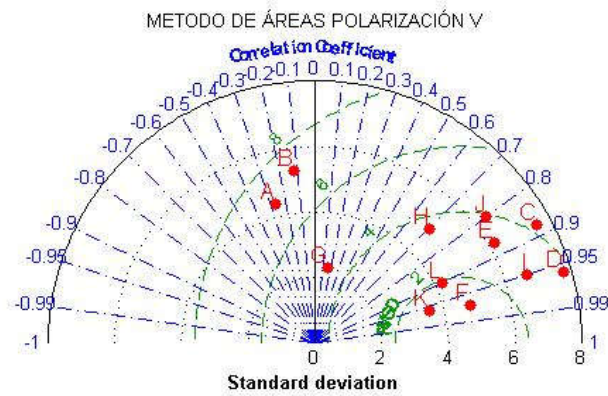


Figura 66: Diagrama de Taylor con los resultados obtenidos con el método de áreas en las zonas de estudio con la polarización V

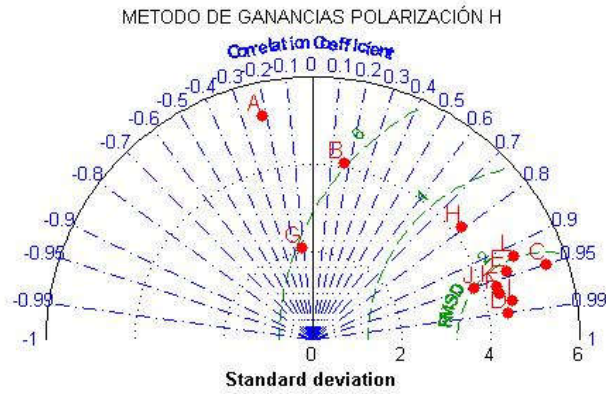


Figura 67: Diagrama de Taylor con los resultados obtenidos con el método de ganancias en las zonas de estudio con la polarización H

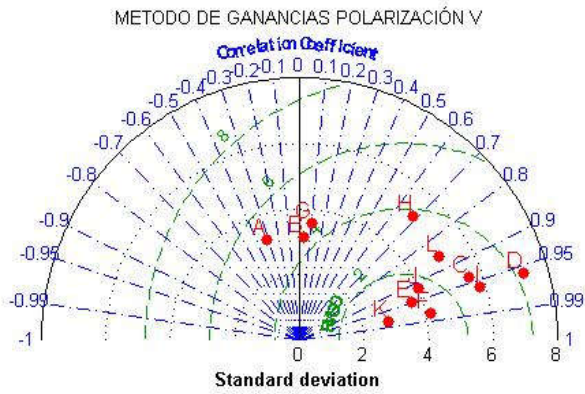


Figura 68: Diagrama de Taylor con los resultados obtenidos con el método de ganancias en las zonas de estudio con la polarización V.

En los diagramas de Taylor anteriores, se puede observar los resultados obtenidos en todas las zonas de estudio con los métodos de áreas y de matriz de ganancias. Las zonas en que se obtienen los resultados mejores serán los que tengan un coeficiente de correlación mayor y un valor de RMS más pequeño.

El método de áreas funciona bien en polarización H en las zonas C, D, E, F, H, I, J. En la polarización V, estos puntos se dispersan teniendo un mayor RMS.

En el método de matriz de ganancias, tanto en polarización H como en V, los puntos están más aglutinados, que en el método de áreas, siendo menor el RMS.

8. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han comparado las temperaturas de brillo de los instrumentos de dos misiones, SMOS y Aquarius. La comparativa pone a prueba los instrumentos de ambas misiones, aunque el satélite Aquarius dejó de ser operativo en Junio de 2015, la metodología desarrollada en este trabajo sería extensible para la comparación de otras misiones. Comparar los datos de temperaturas de brillo de dos satélites tan diferentes como SMOS y Aquarius, ha sido un desafío y ha hecho que se hayan tenido que resolver cuestiones como las distintas resoluciones espaciales y temporales de ambos. Se han desarrollado procedimientos automáticos para comparar los datos de los radiómetros partiendo de metodologías bien establecidas como son el método de áreas, el método de usos de suelo y el del índice TVDI, pero en el presente trabajo se introduce una nueva metodología, que llamamos de matriz de ganancia. La novedad de esta técnica reside en que se hace uso del diagrama de antena del instrumento. Hasta ahora se había comparado a nivel 1 principalmente con el método de las áreas. Al proyectar los barridos de Aquarius sobre los barridos de SMOS, varios pixeles de SMOS caben dentro de un pixel de Aquarius y, al hacer la comparativa, cada pixel de SMOS es observado con distinto ángulo por la antena del instrumento. La antena tiene una distribución angular de ganancia y tener en cuenta esta distribución de ganancia en el promediado de los pixeles de SMOS es una aportación muy significativa de este trabajo, haciendo asimismo una comparación con las técnicas tradicionales y más extendidas, como son las de las áreas y los usos del suelo. Hemos llamado a esta nueva técnica ***Método de Matriz de Ganancia***. También es importante decir que este trabajo ha sido posible al disponer de las medidas de

ganancia del instrumento del Aquarius, cedidas por el Dr. David LeVine, del Goddard Space Flight Center.

No menos importante ha sido la comparación con la metodología TVDI que, aunque es una técnica comúnmente utilizada, también es novedosa para esta comparativa, es la primera vez que se aplica para comparar los radiómetros de SMOS y Aquarius.

Se han desarrollado unos programas que permiten el análisis automático de los datos de SMOS y Aquarius, basados en Matlab y ArcGis y, tras aplicar las distintas metodologías, se ha observado una progresiva mejora en los resultados según aumentaba la complejidad de la técnica. Los resultados han ido mejorando progresivamente al aplicar el método de las áreas, el método de usos de suelo (sólo para la zona de España), el método del TVDI y, finalmente, el método de la matriz de ganancia.

Se han comparado resultados en nueve zonas de la Tierra, que son representativas de la realidad de la superficie terrestre, tanto continental como oceánica, desde la selva amazónica, al desierto del Shara, pasando por el océano Pacífico, y varias zonas de latitudes medias. Zonas de estudio también heterogéneas que permiten una comparativa global para ambos satélites.

Tras analizar los resultados observamos grandes diferencias en zonas de altas temperaturas, en este caso las mayores diferencias se han obtenido en el desierto del Sahara, en menor grado en otras zonas en las que el clima sin ser desértico, es casi desértico o muy árido como la zona cubierta de matorrales de Santa Rita (Arizona). El satélite Aquarius es el que estima más alta temperatura.

El método del TVDI obtiene resultados que claramente mejoran los que se obtenían con los de usos de suelo y los de las áreas. Si bien, como se ha comentado, el método de usos de suelo sólo fue probado en la zona de España. El método del

TVDI necesita los datos de un tercer sensor, MODIS, a bordo de los satélites Terra y Aqua de NASA, teniendo consiguientemente la dificultad de conjugar que haya datos en los tres sensores, para poder realizar la comparativa. Al tener más condicionantes, resulta más difícil, comparar con él, que con los otros dos métodos (áreas y ganancias). Su ventaja es que se pueden seguir las características de la superficie (continental en este caso) de una manera dinámica, no estática como en los usos del suelo.

Comparar los cuatro métodos, ha sido un proceso excluyente, pues se tenían que comparar los mismos datos, siendo esa la razón por la que, aunque se ha trabajado con datos de 2012 hasta 2015 (cuando dejó de funcionar Aquarius), se ha obtenido un número discreto de resultados.

La comparativa con las medidas de polarización horizontal arroja mejores resultados que con la polarización vertical, prácticamente en todas las zonas exceptuando las zonas del Amazonas y Park Falls. La explicación que encontramos a estas diferencias la asociaríamos a la existencia en dichas zonas de elementos que presentan elevación sobre el terreno y de alguna manera facilitan la salida de la componente vertical de la radiación a través de corrientes de superficie en vertical o elementos resonantes. Estas dos zonas tienen una cobertura de bosques muy importante.

En las zonas del Amazonas y Park Falls, no ha sido posible aplicar el método de TVDI, ya que los datos de temperaturas de MODIS (MOD11A2), estaban afectados por nubosidad. En otras zonas, el problema con el que nos hemos encontrado al aplicar TVDI ha sido que los datos no superaban los niveles de calidad suficientes para ser tenidos en cuenta (al representar TSS versus NDVI, el coeficiente de correlación era inferior a un 65% y se descartaban). En otras zonas, tener que comparar en unos días que fuesen comunes a todos los métodos ha

restringido mucho nuestro análisis, lo cual ha sido, de alguna manera, una limitación para el presente trabajo.

La única zona donde se obtienen resultados muy satisfactorios con el TVDI es la de España, y se observa que se reducen los errores respecto al método de las áreas. Esto es significativo porque, en principio, a esta zona la consideramos más heterogénea.

La zona en la que se obtienen los mejores resultados es la del Pacífico Sur con ambos métodos, con polarización horizontal, no se supera el 0.4 de error medio y con polarización vertical no supera los 4.6 de diferencia.

En la zona del Sahara, a pesar de ser homogénea, se obtienen unos errores y unas diferencias muy altas en los valores de temperatura entre los dos satélites, prueba de que a mayor temperatura, mayores son las diferencias entre los datos de SMOS y Aquarius. Esto ocurre en los dos métodos (áreas y ganancias) que se han obtenido resultados.

En la zona de Santa Rita resultan llamativos los resultados que se obtienen, pues se reducen a la mitad los errores y diferencias con el método de ganancias. Aunque en todas las zonas, el método de ganancias los reduce, nunca llega a ser la reducción del 50%

Los distintos métodos funcionan bien en latitudes medias, las gráficas de los diagramas de Taylor lo atestiguan. Con el método de matriz de ganancia los puntos de las zonas de latitudes medias reducen las diferencias y obtienen un coeficiente de correlación mayor, agrupándose en el diagrama de Taylor como una nube de puntos. Con el método de áreas, estos puntos están más dispersos y distantes.



9. BIBLIOGRAFÍA

[Balanis, 2005] Balanis, C.A. *Antenna Theory, Analysis and Design, Third Edition, Wiley- Interscience, pp. 1-114 , 2005.*

[Benlloch et al., 2015a] Benlloch, A., Tenjo, C., Navarro, E., López-Baeza, E., Comparison between Aquarius and SMOS brightness temperatures for the period 2012-2014 considering similar areas and according to land uses, *2nd SMOS Science Conference. Publicación: <http://congrexprojects.com/custom/15Co4/Poster/Posters%20smos.html>*

[Benlloch et al., 2015b] Benlloch, A., Tenjo, C., LeVine, D., E., López-Baeza, E., A preliminary approach towards the comparison between AQUARIUS and SMOS brightness temperatures for heterogeneous land areas, *2nd COSPAR Symposium Brazil - 2015 Water and Life in the Universe. Publicación: http://cosparbrazil2015.org/?page_id=4341*

[Berthon et al., 2013] Berthon, L., Mialon, A., Cabot, F., Kerr, Y., CATDS LEVEL 3. DATA PRODUCT DESCRIPTION. Soil Moisture and Brightness Temperature, SM-ESL, *Project code SO-TN-CB-CA-0001 ,version 2.a., 2013*

[Bindlish et al., 2013] Bindlish, R., Jackson, T., Zhao, T., Lagerloef, G., Le Vine, D., Yueh, S., and Kerr, Y., Inter-Comparison of Aquarius and SMOS Brightness Temperature Observations, *November 2013.*

[Brodzik et al., 2002] Brodzik, M.J. and Knowles, K.W., [EASE-Grid: A Versatile Set of Equal-Area Projections and Grids](#) M. Goodchild (Ed.) *Discrete Global Grids. Santa Barbara, California USA: National Center for Geographic Information & Analysis, 2002.*

[Brucker et al., 2014] Brucker, L., Dinnat, E.P., Picard, G., and Champollion, N., Effect of snow surface metamorphism on Aquarius L-Band Radiometer. Observations at Dome C, *Antarctica, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol 52, n°11, Novembre 2014.

[Camps et al., 2006] Camps, A., Skou, N., Torres, F., Corbella, I., Duffo, N., and Vall-llossera, M., Considerations About Antenna Pattern Measurements of 2-D Aperture Synthesis Radiometers, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol.3, N°2, April 2006

[Carlson et al., 1994] Carlson, T., Gillies, R., and Eileenm, P., A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover, *Remote Sensing Reviews* 9(1): 161-173, 1994.

[Chen et al., 2011] Chen, J., Chunzhi, W., Jiang, H., Mao, L. and Yu, Z., Estimating soil moisture using Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI) in the Huang-huai-hai (HHH) plain, *International Journal of Remote Sensing* vol 32, n° 4, pp.1165-1177, February 2011.

[Dinnat et al., 2011] Dinnat, E.P. and Matthaels, P., Impact of Antenna Pattern on Measurement of the Third Stokes Parameter from space at L-Band, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, February 2011.

[Dinnat et al., 2007] Dinnat, E.P. and Le Vine, D.M., Effects of the Antenna Aperture on Remote Sensing of Sea Surface Salinity at L-Band, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* vol n° 45 n° 7, July 2007.

[Farrar et al., 2012] Farrar, S., and Jones, W.L., Preliminary analysis of the Aquarius/SAC-D Microwave Radiometer (MWR) antenna

temperature: Possible antenna pattern issue, *Proceedings of IEEE Southeastcon, Orlando, FL, 2012, pp. 1-4, 2012.*

[Font et al., 2004] Font, J., Lagerloef, G., LeVine, D., Camps, A., and Zanife, O., The Determination of Surface Salinity with the European SMOS Space Mission, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004.

[Gabarro, 2004] Gabarro, C., Study of salinity retrieval errors for the SMOS misión, Tesis doctoral Carolina Gabarró, 2004.

[Garcia et al., 2007] Garcia, S.G., Baille, A., Gonzalez, M.M., Martinez, V., Urrea, M., Hernandez, Z., and Tanguy, M., Desarrollo y aplicación de indicadores de alerta temprana frente a sequías a escala regional desde MODIS, *TELEDETECCIÓN. Ed Martin*, 2007.

[Gourrion et al., 2013] Gourrion, J., Guimbar, S., Portabella, M., and Sabia, R., Toward an Optimal Estimation of the SMOS Antenna-Frame Systematic Errors, . *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing vol.51 n° 9. September 2013.*

[Holzman et al., 2012a] Holzman, M.E., Rivas,R., y Piccolo, M.C., Utilización de imágenes de temperatura radiativa e índice de vegetación mejorado para el estudio de las condiciones hídricas en la región pampeana, *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 28: 25-33. ISSN: 1851-7838. www.asagai.org.ar/revista ,2012.

[Holzman et al., 2012b] Holzman, M. E. y Rivas, R., Estimación del estrés hídrico en cultivos y su relación con el rendimiento, *1º Congreso Argentino de Teledetección, 18 a 21 se septiembre, Córdoba, Argentina.* http://cms.iafe.uba.ar/tele/tele_congreso/Poster/Agricultura/, 2012.

[Holzman et al., 2013] Holzman, M. y Rivas, R., Evaluación de la humedad del suelo mediante imágenes de temperatura radiativa e índice de vegetación, *VI Seminario Hispano-Latinoamericano sobre*

temas actuales en Hidrología Subterránea. En: Temas actuales en Hidrología Subterránea 2013, Editorial de la Universidad de La Plata, pp. 219-224, 2013.

[Holzman et al., 2014a] Holzman, M.E., Rivas, R. and Piccolo, M.C., Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28: 181-192. ISSN: 0303-2434.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243413001748>,

2014.

[Holzman et al., 2014b] Holzman, M.E., Rivas, R. y Bayala, M., Subsurface soil moisture estimation by VI-LST method, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. ISSN: 1545-598X (en prensa). DOI: 10.1109/LGRS.2014.2314617,2014.

[Kim et al., 2008] Kim, S.B.and Wentz, F.J., Brightness temperature retrieval with scale-model antenna patterns of the aquarius l-band radiometer," *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Boston, MA, pp. II-1184-II-1187, doi: 10.1109/IGARSS.2008.4779212,2008.

[Kraus, 1988] Kraus,J.D., Antennas, ed.mcgraw-hill, 2nd ed, 1988.

[LeVine et al., 2015] LeVine, D., Dinnat, E.P., Meissner, T.,Yueh, S.H., Wentz, F.J., Torrubio, S.E., and Lagerloef, G., Status of Aquarius/SAC-D and Aquarius Salinity Retrievals, *IEEE Journal of Selected Topics in applied earth observations and remote sensing vol 8, n° 12. Diciembre 2015.*

[LeVine et al., 2007] LeVine, D.M., Jacob,S.D., de Mattheis, P., and Abraham, S., The Influence of Antenna Pattern on Faraday Rotation in Remote Sensing at L-Band, *IEEE Transactions on Geoscience and*

Remote Sensing, vol. 45, no. 9, pp. 2737-2746, Sept. 2007.
doi: 10.1109/TGRS.2007.898237

[Macelloni et al., 2013] Macelloni G., Brogioni, M., Pettinato, S., Monti,F., and Casal, F., L-Band Brightness Temperature at Dome-C Antarctica: Intercomparison Between DOMEX-3, SMOS and Aquarius Data, *SMOS & Aquarius Science Workshop, 15-17 April 2013, IFREMER, Brest, France*.

[McMullan et al., 2008] McMullan, K.D., Brown,M.A.,Martin-Neira, M., Lemancnyk, J., SMOS. The payload, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 46(3), 594 -605 April 2008

[Pablos et al., 2014] Pablos, M., Piles,M., Gonzalez-Gambau, V.,Vall-llosera, M.,Camps,A., and Martinez,J., SMOS and Aquarius Radiometers: Intercomparison over Selected Targets, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol 7,núm 9,pp. 3833-3844, 2014.

[PO.DAAC, 2015] PO.DAAC, Aquarius data user's guide. Aquarius Dataset Version 4.0, Document AQ-010-UG-00082015, *California Institute of Technology, 2015*.

[Pozar, 2012] Pozar,D.M., *Microwave engineering*, ed. Wiley, 2012.

[Price, 1990] Price, J.C., Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration, . *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28, 940–948, 1990.

[Sanchez et al., 2013] Sanchez, M., y Carbacho, L., Aproximación a la determinación del déficit hídrico en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile, a partir de imágenes MODIS y datos meteorológicos". *Revista de Geografía Norte Grande*, 55: 109-124 (2011039), <http://www.redalyc.org/pdf/300/30028714008.pdf>, 2013.

[Sandholt et al., 2002] Sandholt, I., Rasmussen, K., and Andersen, J., A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status, *Remote Sensing of environment* 79 (2002) 213-224, 2002.

[Santos et al., 2012] Santos, A., Biswas, S., and Jones, L., Aquarius/SAC-D Microwave Radiometer Brightness Temperature Validation, conference paper: Oceans, DOI: 10.1109/OCEANS.2012.6404830, 2012.

[Schwank et al., 2002] Schwank, M.; Wiesmann, A.; Werner, C.; Mätzler, C.; Weber, D.; Murk, A.; Völksch, I.; Wegmüller, U. 2010. ELBARA II, an L-Band Radiometer System for Soil Moisture Research. *Sensors* 2010, 10, 584-612

[SIOSE, 2017] SIOSE, 2017. Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España, Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT), Instituto Geográfico Nacional

[Stone, W., 2002] Stone, W. editor. 2002. Review of Radio Science, 1999-2002: Advances in 3G Mobile Communications, Cryptography and Computer Security, EMC for Integrated Circuits, Remote Sensing, Radio Astronomy. Wiley, New York 2002.

[Trenberth et al., 2008] Trenberth, K.E., Fasullo, J.T., Kiehl, J., Earth's global energy budget, *American Meteorological Society*, July 2008

[Ulaby et al., 1981] Ulaby, F.T., Moore, R.K., Fung, A.K., Microwave Remote Sensing Active and Passive, vol I, Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry, ed. Artech House Inc, 1981.

[Vazquez, 2013] Vazquez, P., Comparación de índices de estrés hídrico, a partir de información captada por el sensor MODIS, en la región pampeana argentina, *Cuadernos geográficos* 52(2013-1), 46-68, 2013.

[Wan, 2006] Wan, Z., Modis Land Surface Temperature Products User's guide, *ICESSE, University of California, Santa Barbara*, September

[Wentz et al., 2000] Wentz, F.J and Meissner, T. Algorithm Theoretical Basis document (ATBD) for AMSR-E, Version 2. Remote Sensing Systems, Santa Rosa, CA, 2000.

[Wentz et al., 2011] Wentz, F.J. and LeVine, D., Algorithm Theoretical Basis Document. Aquarius Level-2 Radiometer Algorithm, *RSS Technical Report 011811, January 2011*

<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20150000372.pdf>
(last accessed 18/04/2017).

https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/81149/Early_view_JGR_Antarctica.pdf (last accessed 18/04/2017).

<http://www.the-cryosphere.net/8/905/2014/tc-8-905-2014.pdf> (last accessed 18/04/2017).

ftp://ftp.esr.org/pub/people/lagerloef/Aquarius/Lagerloef_etal_OS4.9_v1.pptx (last accessed 18/04/2017).

http://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/ScienceTeams/atelier_alti-glaciologie/2015/13_SMOS_cryo_Mialon.pdf (last accessed 18/04/2017).

<https://nsidc.org/data/aquarius/research.html> (last accessed 18/04/2017).

Lista de Figuras

Figura 1: Balance energético

Figura 2: Radiación cuerpo negro

Figura 3: Noise Power Source in a typical radiometer

Figura 4: Configuración del satélite SMOS

Figura 5: Figura generada por SMOS End-to-End Performance Simulator

Figura 6: Footprint de SMOS

Figura 7: Footprints de los tres rayos de Aquarius.

Figura 8: Imagen de la ubicación de la zona de estudio del Amazonas

Figura 9: Imagen de la ubicación de la zona de estudio de España

Figura 10: Imagen de la ubicación de la zona de estudio de Fort Peck

Figura 11: Imagen de la ubicación de la zona de estudio de Marruecos

Figura 12: Imagen de la ubicación de la zona de estudio de Pacifico

Figura 13: Imagen de la ubicación de la zona de estudio de Park Falls

Figura 14: Imagen de la ubicación de la zona de estudio del Sahara

Figura 15: Imagen de la ubicación de la zona de estudio de Santa Rita

Figura 16: Imagen de la ubicación de la zona de estudio de SkyOaks

Figura 17: Usos del suelo de la zona de España, con las elipses del footprint de Aquarius y los 6 píxeles de SMOS

Figura 18: Elipses de los 12 datos de 2012 sobre la malla EASE en la zona de estudio de España

Figura 19: Plots TSS vs. NDVI de unos datos del 2012 que se han considerado en el trabajo

Figura 20: TVDI obtenido de los datos de los plots anteriores

Figura 21: 6 clases de TVDI

Figura 22: Proyección de los ángulos θ y ρ

Figura 23: Dibujo (1) de la trigonometría necesaria para la proyección de las coordenadas de la matriz G.

Figura 24: Dibujo (2) de la trigonometría necesaria para la proyección de las coordenadas de la matriz G.

Figura 25: Dibujo (3) de la trigonometría necesaria para la proyección de las coordenadas de la matriz G.

Figura 26: Dibujo (4) de la trigonometría necesaria para la proyección de las coordenadas de la matriz G.

Tabla 1: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona del Amazonas con órbitas ascendentes y polarización H.

Tabla 2: Errores de los datos anteriores

Tabla 3: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona del Amazonas con órbitas ascendentes y polarización V.

Tabla 4: Errores de los datos anteriores

Figura 27: Plot de los datos de temperaturas de brillo

Figura 28: Plot de los errores absolutos

Figura 29: Plot de los errores relativos

Tabla 5: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona del Amazonas con órbitas descendentes y polarización H.

Tabla 6: Errores de los datos anteriores

Tabla 7: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona del Amazonas con órbitas descendentes y polarización V.

Tabla 8: Errores de los datos anteriores

Figura 30: Plot de los datos de temperaturas de brillo

Figura 31: Plot de los errores absolutos

Figura 32: Plot de los errores relativos

Tabla 9: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de España con órbitas ascendentes y polarización H.

Tabla 10: Errores de los datos anteriores

Tabla 11: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de España con órbitas ascendentes y polarización V.

Tabla 12: Errores de los datos anteriores

Figura 33: Plot de los datos de temperaturas de brillo

Figura 34: Plot de los errores absolutos

Figura 35: Plot de los errores relativos

Tabla 13: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de España con órbitas descendentes y polarización H.

Tabla 14: Errores de los datos anteriores

Tabla 15: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de España con órbitas descendentes y polarización V.

Tabla 16: Errores de los datos anteriores

Figura 36: Plot de los datos de Aquarius y los estimados por usos de suelo

Figura 37: Plots con las temperaturas obtenidas con el método de los usos del suelo y el de áreas, los errores residuales, y los errores relativos

Figura 38: Plot de los datos de temperaturas de brillo

Figura 39: Plot de los errores absolutos

Figura 40: Plot de los errores relativos

Tabla 17: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de FortPeck con órbitas ascendentes y polarización H.

Tabla 18: Errores de los datos anteriores

Tabla 19: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de FortPeck con órbitas ascendentes y polarización V.

Tabla 20: Errores de los datos anteriores

Figura 41: Plot de los datos de temperaturas de brillo

Figura 42: Plot de los errores absolutos

Figura 43: Plot de los errores relativos

Tabla 21: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Marruecos con órbitas ascendentes y polarización H.

Tabla 22: Errores de los datos anteriores

Tabla 23: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Marruecos con órbitas ascendentes y polarización V.

Tabla 24: Errores de los datos anteriores

Figura 44: Plot de los datos de temperaturas de brillo

Figura 45: Plot de los errores absolutos

Figura 46: Plot de los errores relativos

Tabla 25: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Pacífico-Sur con órbitas ascendentes y polarización H.

Tabla 26: Errores de los datos anteriores

Tabla 27: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Pacífico-Sur con órbitas ascendentes y polarización V.

Tabla 28: Errores de los datos anteriores

Figura 47: Plot de los datos de temperaturas de brillo

Figura 48: Plot de los errores absolutos

Figura 49: Plot de los errores relativos

Tabla 29: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de ParkFalls con órbitas ascendentes y polarización H.

Tabla 30: Errores de los datos anteriores

Tabla 31: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de ParkFalls con órbitas ascendentes y polarización V.

Tabla 32: Errores de los datos anteriores

Figura 50: Plot de los datos de temperaturas de brillo

Figura 51: Plot de los errores absolutos

Figura 52: Plot de los errores relativos

Tabla 33: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Sahara- Sur con órbitas ascendentes y polarización H.

Tabla 34: Errores de los datos anteriores

Tabla 35: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Sahara- Sur con órbitas ascendentes y polarización H.

Tabla 36: Errores de los datos anteriores

Figura 53: Plot de los datos de temperaturas de brillo

Figura 54: Plot de los errores absolutos

Figura 55: Plot de los errores relativos

Tabla 37: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Santa Rita con órbitas ascendentes y polarización H.

Tabla 38: Errores de los datos anteriores

Tabla 39: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Santa Rita con órbitas ascendentes y polarización V.

Tabla 40: Errores de los datos anteriores

Figura 56: Plot de los datos de temperaturas de brillo

Figura 57: Plot de los errores absolutos

Figura 58: Plot de los errores relativos

Tabla 41: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Santa Rita con órbitas descendentes y polarización H.

Tabla 42: Errores de los datos anteriores

Tabla 43: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de Santa Rita con órbitas descendentes y polarización H.

Tabla 44: Errores de los datos anteriores

Figura 59: Plot de los datos de temperaturas de brillo

Figura 60: Plot de los errores absolutos

Figura 61: Plot de los errores relativos

Tabla 45: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de SkyOaks con órbitas ascendentes y polarización H.

Tabla 46: Errores de los datos anteriores

Tabla 47: Datos y errores absoluto y relativo que se han obtenido en la zona de SkyOaks con órbitas ascendentes y polarización V.

Tabla 48: Errores de los datos anteriores

Figura 62: Plot de los datos de temperaturas de brillo

Figura 63: Plot de los errores absolutos

Figura 64: Plot de los errores relativos

Figura 65: Diagrama de Taylor con los resultados obtenidos con el método de áreas en las zonas de estudio con la polarización H.

Figura 66: Diagrama de Taylor con los resultados obtenidos con el método de áreas en las zonas de estudio con la polarización V.

Figura 67: Diagrama de Taylor con los resultados obtenidos con el método de ganancias en las zonas de estudio con la polarización H.

Figura 68: Diagrama de Taylor con los resultados obtenidos con el método de ganancias en las zonas de estudio con la polarización V.

Figura 69: Distintas perspectivas de la proyección de la matriz G11

Figura 70: Proyección de las matrices G12 y G13

Figura 71: Proyección de la matriz G14

Figura 72: Proyección de las matrices G21 y G22

Figura 73: Proyección de las matrices G23 y G24

Figura 74: Proyección de las matrices G31 y G32

Figura 75: Distintas perspectivas de la proyección de la matriz G33

Figura 76: Proyección de la matriz G34

Figura 77: Proyección de las matrices G41 y G42

Figura 78: Proyección de la matriz G43

Figura 79: Distintas perspectivas de la proyección de la matriz G44

Figura 80: Proyección de las coordenadas de la matriz G

Lista de ACRONIMOS

SMOS (**S**oil **M**oisture **O**cean **S**alinity)

CATDS (**C**entre **A**val de **T**raitement et des **D**onnées **S**MOS)

ESA (**E**uropean **S**pace **A**gency)

UDP (**U**ser **D**ata **P**roduct)

PO.DAAC (**P**hysical **O**ceanography **D**istributed **A**ctive **A**rchive **C**enter)

SMAP (**S**oil **M**oisture **A**ctive **P**assive)

NASA (**N**ational **A**eronautics and **S**pace **A**dministration)

RFI (**R**adio **F**recuency **I**nterference)

ARF (**A**ntenna **R**eference **F**rame)

CNES (**C**entre **N**ational d'Etudes **S**patiales)

MIRAS (**M**icrowave **I**maging **R**adiometer by **A**perture **S**ynthesis)

PROTEUS (Plate-forme **R**econfigurable pour l'**O**bservation, les **T**elecommunications **E**t les **U**sages **S**cientifiques)

EADS- CASA (**C**ontrucciones **A**eronauticas **S**A)

LICEF (**L**ight weight **C**ost **E**ffective **F**ront-end)

FOV (**F**ield **O**f **V**iew)

PSU (**P**ractical **S**alinity **U**nits)

GODAE (**G**lobal **O**cean **D**ata **A**ssimilation **E**xperiment)

UNESCO (**U**nited **N**ations **E**ducational, **S**cientific and **C**ultural **O**rganization)

EASE-grid (**E**qual **A**rea **S**calable **E**arth grid)

CONAE (**CO**misión Nacional Actividades Espaciales)

SSS (**S**ea Surface Salinity)

AMSR-E (Advanced **M**icrowave Scanning Radiometer For **EO**S)

ATBD (**A**lgorithm **T**heoretical **B**asis **D**ocuments)

AGS (Aquarius **G**round Segment)

NCRS (**S**catterometer Normalized **R**adar Cross- **S**ection)

MODIS (**MO**Derate Resolution **I**maging Spectoradiometer)

LAI (Leaf Area Index)

NDVI (Normalized **D**ifference **V**egetation **I**ndex)

EVI (**E**nhanced **V**egetation **I**ndex)

HDF (**H**ierarchical **D**ata **F**ormat)

LST (**L**and Surface **T**emperature)

TVDI (Temperature **V**egetation **D**ryness **I**ndex)

SURFRAD (**SUR**face **RAD**iation)

SRER (**S**anta **R**ita **E**xperimental **R**ange)

USDA (**U**nited **S**tates **D**eartment of **A**griculture)

SIOSE (**S**istema de **I**nformación sobre **O**cupación del **S**uelo de **E**spaña)

ECEF (**E**arth-**C**entered, **E**arth- **F**ixed)

RMSD (**R**oot **M**ean **S**quare **D**eviation)

MAE (**M**ean **A**bsolute **E**rror)

ME (**M**edian **E**rror)

RRMSD (**R**elative **R**oot **M**ean **S**quare **D**eviation)

NMAE (**N**ormalized **M**ean **A**bsolute **E**rror)

AE (**A**bsolute **E**rror)

RE (**R**elative **E**rror)

ANEXO

La ganancia de la antena de Aquarius fue cedida por el equipo técnico de la misión [<https://aquarius.nasa.gov/>]. Los datos facilitados contenían información de la ganancia de la antena para las componentes co-polar, y la polarización cruzada para las dos polarizaciones de la antena. Estos datos se nos dieron referenciados a las coordenadas de la armadura-anclaje de la antena al satélite. Nos fue facilitado un archivo con los datos $g_1, g_{1h}, g_2, g_{2h}, g_3, g_{3h}, g_4, g_{4h}$ y las coordenadas en *Antenna Reference Frame* (ARF): \phiView_ARF_deg y \thetaView_ARF_deg .

A partir de esos datos se construyeron las 16 matrices de ganancia, teniendo en cuenta las siguientes fórmulas:

$$g_{11} = g_1 + i g_2; \% \text{ copol}$$

$$g_{21} = g_3 + i g_4; \% \text{ crosspol}$$

$$g_{22} = g_{1h} + i g_{2h}; \% \text{ co-pol}$$

$$g_{12} = g_{3h} + i g_{4h}; \% \text{ cross-pol}$$

$$c_{g11} = \text{conj}(g_{11});$$

$$c_{g12} = \text{conj}(g_{12});$$

$$c_{g2} = \text{conj}(g_{22});$$

$$c_{g21} = \text{conj}(g_{21});$$

Matrix G

$$G(1,1) = \text{abs}(g11).^2;$$

$$G(1,2) = \text{abs}(g21).^2;$$

$$G(1,3) = \text{real}(g11.*c_g21);$$

$$G(1,4) = -\text{imag}(g11.*c_g21);$$

$$G(2,1) = \text{abs}(g12).^2;$$

$$G(2,2) = \text{abs}(g22).^2;$$

$$G(2,3) = \text{real}(c_g22.*g12);$$

$$G(2,4) = -\text{imag}(c_g22.*g12);$$

$$G(3,1) = 2*\text{real}(g11.*c_g12);$$

$$G(3,2) = 2*\text{real}(c_g22.*g21);$$

$$G(3,3) = \text{real}((g11.*c_g22) + (g21.*c_g12));$$

$$G(3,4) = -\text{imag}((g11.*c_g22) - (g21.*c_g12));$$

$$G(4,1) = 2*\text{imag}(g11.*c_g12);$$

$$G(4,2) = 2*\text{imag}(c_g22.*g21);$$

$$G(4,3) = \text{imag}((g11.*c_g22) + (g21.*c_g12));$$

$$G(4,4) = \text{real}((g_{11} \cdot c_{g22}) - (g_{21} \cdot c_{g12}));$$

A continuación se muestra la representación tridimensional y los *plots* de las 16 matrices de ganancia. El *footprint* de Aquarius se encuentra representado con una elipse de trazo negro. Aunque la escala de colores en todos los gráficos, es la misma, los valores que representan no son iguales. Los colores fríos representan valores bajos y los cálidos los valores más altos. En el título de todas las gráficas, se dice el valor máximo que alcanza la matriz.

La matriz G11 es la matriz de polarización V, tiene un valor máximo de 909,82. Los valores máximos se encuentran concentrados dentro del *footprint* de Aquarius.

Igual ocurre con la matriz G22 que es la matriz de polarización H, tiene un valor máximo de 896,64 y, al igual que pasaba con la G11, los valores más altos de la matriz se encuentran dentro del *footprint*.

Las matrices de polarización cruzada G12 tiene un máximo de 4,86, G13 un máximo de 15,71 y G14 un máximo de 37,66. Todas ellas tienen en común que los valores máximos quedan fuera completamente o casi del *footprint* de Aquarius. La matriz G12 tiene dos figuras de forma casi elíptica con los valores altos, mientras que G13 y G14 solo tiene una figura con los valores altos.

La matriz G21 tiene un máximo de 3,95 y tiene dos zonas fuera del *footprint* de Aquarius, en las que están los valores más altos, la matriz G23 tiene un máximo de 15,05 y la G24 un máximo de 36,73. Ambas matrices tienen una zona angular donde se concentran los máximos.

La matriz G31 tiene un máximo de 22,16, y tiene la mitad del *footprint* de Aquarius. Igual ocurre con la matriz G32, que tiene un máximo de 36,15.

Aparece una figura invertida, debido a los valores negativos en la matriz G33. Tiene un máximo de 0,31. Se da la circunstancia que dentro del *footprint* de Aquarius, se encuentran los valores más pequeños. La matriz G34 tiene un máximo de 9,42 y los máximos se distribuyen casi simétricamente.

Por último, la matriz G41 tiene un valor máximo de 76,73, con la mitad del *footprint* de Aquarius con valores elevados. Ocurre igual con G42 con un máximo de 77,01. La matriz G43 tiene dos zonas angulares con valores altos casi simétricas y la matriz G44 tiene un máximo de 0,41, aparece con una figura invertida debido a sus valores negativos. Los valores más pequeños se encuentran dentro del *footprint* de Aquarius.

En las siguientes figuras se representan las matrices $G1i$, y $G2i$, mostrando su proyección sobre el suelo con los *footprints* de SMOS y Aquarius.

MATRICES G DE AQUARIUS

Matrices G11, G12, G13, G14

Proyeccion de la matriz G11
sobre el footprint de Aquarius. Valor máximo 909.8208

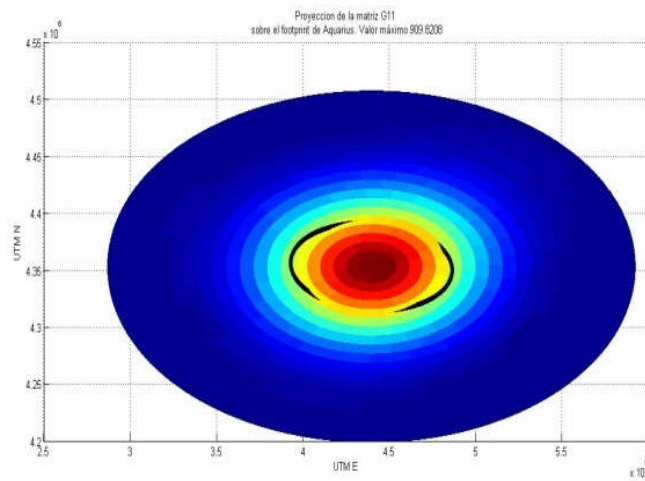
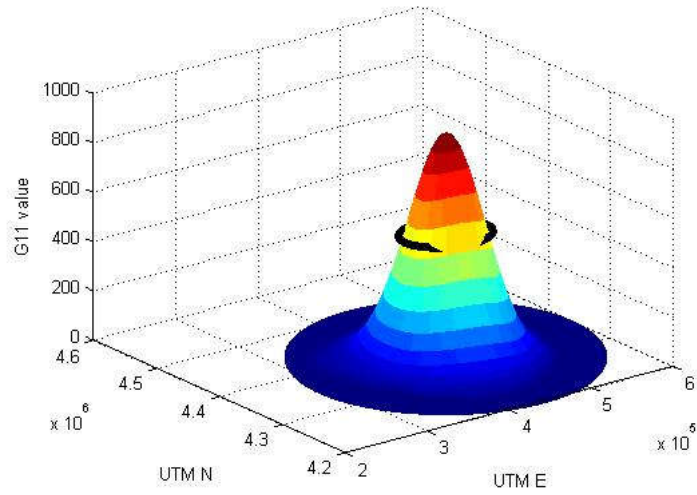


Figura 69: Distintas perspectivas de la proyección de la matriz $G11$, en línea negra se delimita el footprint de Aquarius

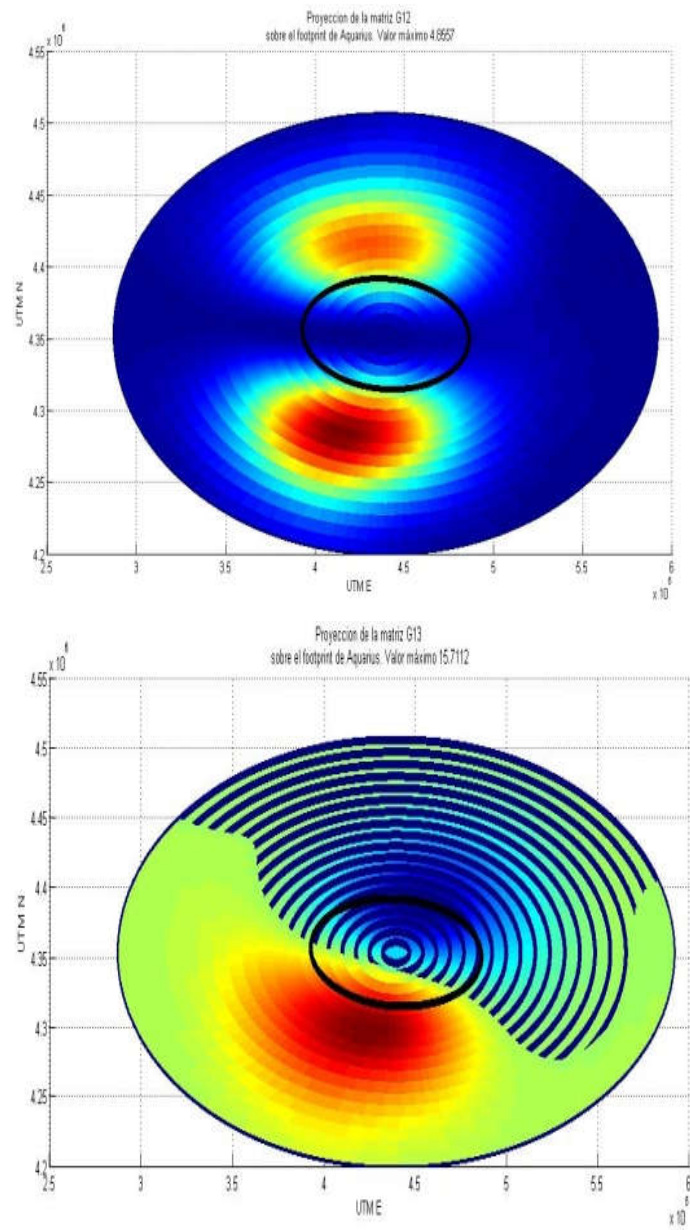


Figura 70: Proyección de las matrices G12 y G1, en línea negra se delimita el footprint de Aquarius

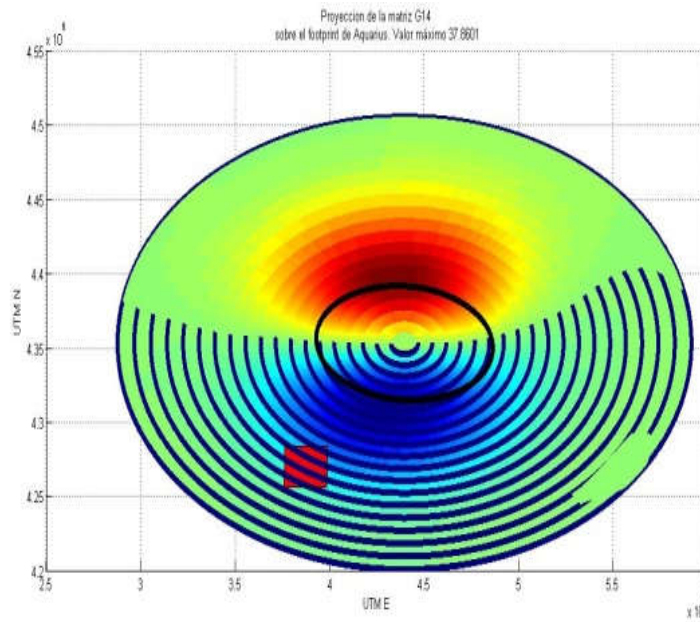


Figura 71: Proyección de las matrices G14, se observa en rojo el footprint de SMOS

Matrices G21,G22 ,G23,G24

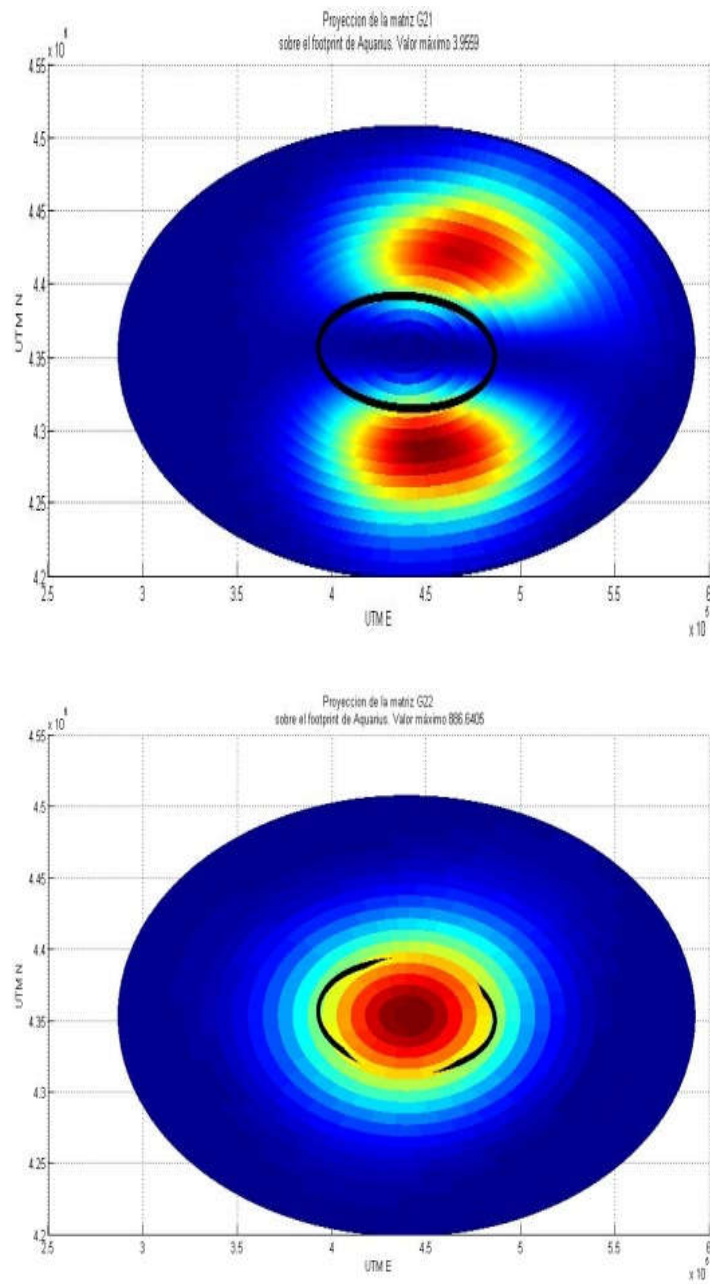


Figura 72: Proyección de las matrices G21 y G22

