4 MEDIDAS

4.1 INTRODUCCIÓN TEÓRICA: COMPORTAMIENTO DIELÉCTRICO DE SUELOS HÚMEDOS Y SALINOS

En el marco de nuestro proyecto, es indispensable estudiar la influencia de la humedad y de la salinidad sobre la permitividad de los suelos. Numerosos estudios han sido realizados sobre este tema, siendo los primeros principalmente estudios empíricos que no intentaban explicar los resultados según la composición minearológica de los suelos. Idealmente, el modelo debería tener en cuenta los efectos observados para diversos componentes de los suelos sobre el comportamiento dieléctrico del sistema suelo-agua-aire en función de la frecuencia. Las fórmulas tradicionales consideraban sólo una mezcla de agua pura y suelo, por lo tanto no permitían caracterizar el comportamiento en el caso de suelos de diferentes compacidades, en los que existan poros de distintos tamaños.

El primer modelo que ofrece una fórmula experimental completa a 1.4 GHz y a 5 GHz es el modelo de Wang y Schmugge [11] (1980). Es también el primer modelo que considera que el estudio de la constante dieléctrica compleja puede hacerse en dos regiones diferentes: para ello se define el parámetro W_t como el valor de transición de la tasa de humedad. Es el valor a partir del cuál la constante dieléctrica aumenta considerablemente cuando la tasa de humedad aumenta. Las dos regiones son, por tanto, las tasas de humedad menores y mayores que W_t. Además, es posible establecer una correlación entre W_t y la composición del suelo, mediante el *punto de marchitez* (contenido de agua en el suelo para el cual una planta se mantiene permanentemente marchitada a no ser que se le añada agua a ese suelo).

$$\varepsilon_1(\theta_v) = \theta_v \cdot \varepsilon_{x1}(\theta_v) + (\phi - \theta_v)\cdot\varepsilon_a + (1-\phi)\cdot\varepsilon_s \qquad \theta_v \le W_t$$

with

$$\varepsilon_{x1}(\theta_v) = \varepsilon_i + (\varepsilon_w - \varepsilon_i)\cdot\frac{\theta_v}{W_t}\cdot\gamma$$

$$\gamma = -0.57\cdot WP + 0.481$$

$$WP = 0.06774 - 0.00064\cdot S + 0.00478\cdot C$$

$$\varepsilon_2(\theta_v) = W_t\cdot\varepsilon_{x2} + (\theta_v - W_t)\cdot\varepsilon_w + (\phi - \theta_v)\cdot\varepsilon_a + (1-\phi)\cdot\varepsilon_s \qquad \theta_v > W_t$$

with

$$\varepsilon_{x2} = \varepsilon_i + (\varepsilon_w - \varepsilon_i)\cdot\gamma$$

$$W_t(S,C) = 0.49\cdot WP + 0.165$$

donde
θ_v = tasa de humedad
ε_1 = constante dieléctrica para tasas de humedad menores que W_t
ε_2 = constante dieléctrica para tasas de humedad mayores que W_t
ε_a = constante dieléctrica del aire (1)
ε_i = constante dieléctrica del hielo (3.2)
ε_w = constante dieléctrica del agua pura (81)
φ = porosidad
WP = tasa de humedad en el punto de marchitez (presión de vapor saturante = 15 bars)
S = contenido de arena del suelo seco, en porcentaje
C = contenido de arcilla del suelo seco, en porcentaje
W_t = valor de transición de la tasa de humedad.
γ = parámetro de ajuste ligado a WP.

El problema del modelo de Wang y Schmugge es que no considera la variación de la permitividad en función de la frecuencia y que la predicción de la parte imaginaria de la permitividad no es consistente. Sin embargo, este modelo merece nuestra atención por ser el primero que demuestra la importancia del estudio en dos regiones diferentes.

El propio Wang definió un enfoque diferente cuando consideró que el sistema suelo-agua podía ser descrito según una relajación de tipo Debye en una banda finita de frecuencia de micro-ondas. Cuando los

parámetros ε_s (constante dieléctrica estática de la mezcla) y ε_∞ (límite de alta frecuencia) se estiman correctamente, este método reproduce con bastante exactitud el comportamiento dieléctrico entre 0.3 GHz y 1.4 GHz con dos parámetros: la anchura de banda de la energía de activación de la solución y la frecuencia de relajación principal de la mezcla para una frecuencia y un contenido del suelo determinados.

- *Materiales que contienen agua*: La mayoría de los materiales naturales, como los suelos, la vegetación o la nieve, son mezclas de un material anfitrión, de aire y de agua. La parte real de la permitividad del agua, ε_w', es siempre un orden de magnitud superior a la de los materiales secos y la parte imaginaria, al menos dos órdenes de magnitud superior (especialmente para frecuencias superiores a 10 GHz.) A causa del gran contraste entre las permitividades, el comportamiento dieléctrico de la mezcla está dominado por el comportamiento del agua. El comportamiento de la mezcla puede describirse mediante las fórmulas de Debye:

$$\varepsilon_m^{'} = \varepsilon_{m\infty} + \frac{(\varepsilon_{m0} - \varepsilon_{m\infty})}{1 + (2\pi f \tau_m)^2}$$

$$\varepsilon_m^{''} = 2\pi f \tau_m \frac{(\varepsilon_{m0} - \varepsilon_{m\infty})}{1 + (2\pi f \tau_m)^2}$$

donde
ε_{m0}, ε_∞ y τ_m son función de la constante dieléctrica del material anfitrión, ε_h, de la tasa de humedad y de la forma de las inclusiones de agua y son calculables empíricamente.

- *Agua salina*: El agua salina es agua que contiene sales disueltas. La salinidad S de una solución se define como la masa total de sal sólida en gramos disuelta en un kilogramo de solución. S se expresa en partes por mil (‰). La normalidad N está relacionada con la salinidad según la fórmula:

$$N_{sw} = AS_{sw}\left[1.707\times10^{-2} + 1.205\times10^{-5}S_{sw} + 4.058\times10^{-9}S_{sw}^2\right],\ S_{sw}<260‰$$

donde
A=1 para una solución de NaCl
A=0.941 para el agua marina, que incluye otras sales.

El método que se presenta es válido para un rango de salinidad que comprende del 4 al 35‰, bastante útil para el agua marina.

Las partes real e imaginaria de la permitividad de una solución salina se calculan con las fórmulas siguientes (fórmulas de Debye):

$$\varepsilon_{sw}^{'} = \varepsilon_{sw\infty} + \frac{\varepsilon_{sw0} - \varepsilon_{sw\infty}}{1 + (2\pi f \tau_{sw})^2}$$

$$\varepsilon_{sw}^{''} = \frac{2\pi f \tau_{sw}(\varepsilon_{sw0} - \varepsilon_{sw\infty})}{1 + (2\pi f \tau_{sw})^2} + \frac{\sigma_i}{2\pi\varepsilon_0 f}$$

donde
σ_i es la conductividad iónica de la solución
ε_0 es la permitividad del espacio libre ($8.8\text{x}10^{-12}$ S/m)

Según Stogryn [13](1971) $\varepsilon_{sw\infty} = \varepsilon_{w\infty} = 4.9$

La dependencia de ε_{sw0} con S_{sw} y la temperatura, T, viene dada por:

$$\varepsilon_{sw0}(T, S_{sw}) = \varepsilon_{sw0}(T,0) * a(T,S_{sw})$$

donde:

$$\varepsilon_{sw0}(T,0) = 87.134 - 1.949\times10^{-1}T - 1.276\times10^{-2}T^2 + 2.491\times10^{-4}T^3$$

$$a(T,S_{sw}) = 1.0 + 1.613\times10^{-5}TS_{sw} - 3.656\times10^{-3}S_{sw} + 3.210\times10^{-5}S_{sw}^2 - 4.232\times10^{-7}S_{sw}^3$$

Estas expresiones son válidas para un rango de salinidad entre 4 y 35‰.

La fórmula del tiempo de relajación tiene la misma forma:

$$\tau_{sw}(T, S_{sw}) = \tau_{sw}(T,0) * b(T, S_{sw})$$

donde

$\tau_{sw}(T,0) = \tau_w(T)$, tiempo de relajación del agua pura

$$b(T, S_{sw}) = 1.0 + 2.282\times10^{-5} TS_{sw} - 7.638\times10^{-4} S_{sw}$$
$$- 7.760\times10^{-6} S_{sw}^2 + 1.105\times10^{-8} S_{sw}^3$$

Estas expresiones son válidas para 0≤T≤40°C y 0≤S_{sw}≤157‰

El único parámetro del modelo que queda por determinar es la conductividad iónica. Para el agua marina, σ_i, fue calculado por Weyl (1964) y después corregido por Stogryn [13](1971).

$$\sigma_i(T, S_{sw}) = \sigma_i(25, S_{sw}) e^{-\phi}$$

donde

σ_i (25,S_{sw}) es la conductividad iónica del agua marina a 25°C.

$$\sigma_i(25, S_{sw}) = S_{sw}[0.18252 - 1.4619\times10^{-3} S_{sw} + 2.093\times10^{-5} S_{sw}^2$$
$$- 1.282\times10^{-7} S_{sw}^3]$$

Φ depende de Ssw y de Δ=25-T

$$\Phi = \Delta[2.033\times10^{-2} + 1.266\times10^{-4}\Delta + 2.464\times10^{-6}\Delta^2$$
$$- S_{sw}\left(1.849\times10^{-5} - 2.551\times10^{-7}\Delta + 2.551\times10^{-8}\Delta^2\right)]$$

Estas expresiones son válidas para 0≤S_{sw}≤40‰.

4.2 MEDIDAS DE LA TASA DE HUMEDAD

Para caracterizar bien el comportamiento dieléctrico de las evaporitas, es necesario realizar medidas de arena con diferentes tasas de humedad. Hemos hecho las medidas sobre el analizador ANRITSU 37325A con la ayuda del programa VEE de Agilent Technologies que permite utilizar el ordenador para controlar la actuación del analizador. Para ello, se debe conectar el analizador con un ordenador mediante el puerto USB de este último, sobre el que se ha realizado un programa que permite ver y guardar automáticamente sobre Excel las medidas de una forma automática. Para medir hemos utlizado la sonda SMA, ya que la sonda SP es utilizable sólo para medidas en el interior de líquidos. Para las medidas hemos utilizado seis muestras de arena de la Duna de Pyla, situada en las inmediaciones de Arcachon (Gironde, Francia) y hemos verificado antes de añadir agua que su comportamiento en la medida es idéntico. Por lo tanto, podemos decir que se trata de seis muestras diferentes de la misma arena.

Para calcular la cantidad de agua que es necesario añadir a cada muestra para obtener las tasas de humedad deseadas, hemos utilizado la densidad de la arena, ρ_{arena}=1.74 g/cm^3 y hemos pesado la arena para conocer su volumen. La cantidad de agua, en volumen, se calcula como vemos a continuación:

$$V_w = m_v * V_{sable} = m_v * \frac{Poids_{sable}}{\rho_{sable}}$$

donde m_v representa la tasa de humedad.

Hemos hecho el análisis para ocho valores diferentes de la tasa de humedad (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 30%, 45% y 60%):

En teoría, el aumento de la tasa de humedad (aumento de la cantidad de agua) va a convertir el medio en más conductor, por lo tanto la permitividad va a aumentar. La razón es que la permitividad del agua es mucho más fuerte (84-j4, aprox. para el agua destilada) que la permitividad de la arena (3.4-j0.05, aprox.). La pequeña ε' de la arena provoca que la reflexión sea débil y la pequeña ε'' provoca que la atenuación sea débil, es decir, que la profundidad de penetración de cualquier onda en el medio aumentará y para la señal EM la arena es como si fuera transparente. Sin embargo, el comportamiento en el agua es totalmente diferente: la elevada ε' provoca una fuerte reflexión y la elevada ε'' hace aumentar la atenuación. El resultado es que la señal EM no se puede propagar en el agua.

A causa de la inestabilidad que hemos detectado en el comportamiento de la sonda SMA vamos a hacer un ajuste de las curvas, según una ley de "smoothing" o "suavizado", de coeficiente 25%. Estos valores corregidos serán utilizados para hacer la normalización con respecto a la medida de referencia, que también será ajustada.

Podemos ver la diferencia entre las medidas con esta gráfica de arena seca:

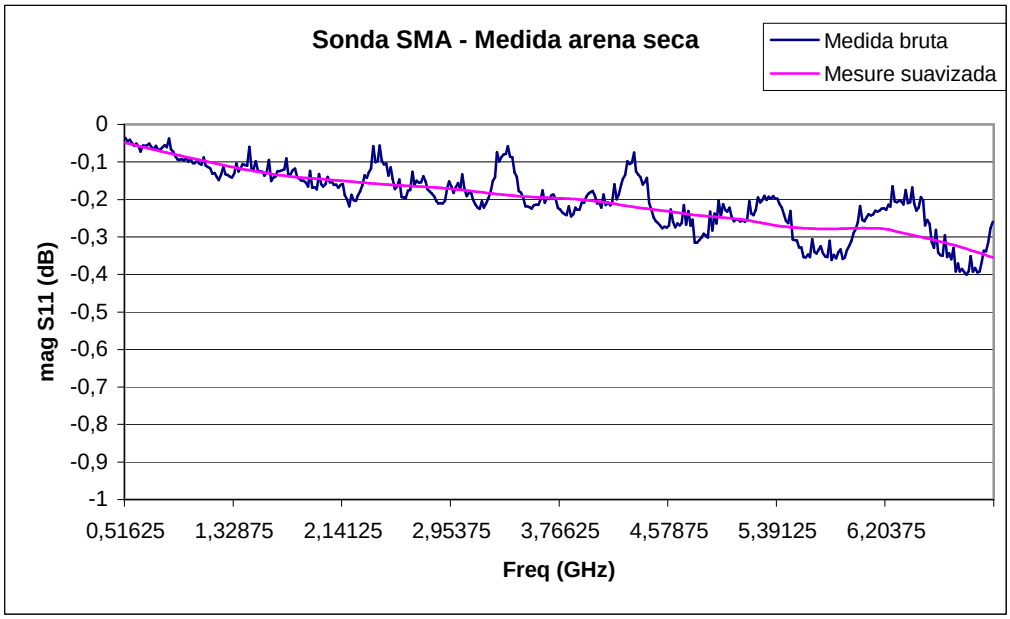

Fig. 4.1: Curva ajustada y sin ajustar (Excel)

En cuanto a los valores corregidos, presentan un comportamiento similar a lo que se esperaba a partir de la teoría. El efecto de la concentración de agua empieza a ser importante a partir del 20%. Podemos decir que la adición de agua no hace cambiar significativamente la permitividad hasta ese valor.

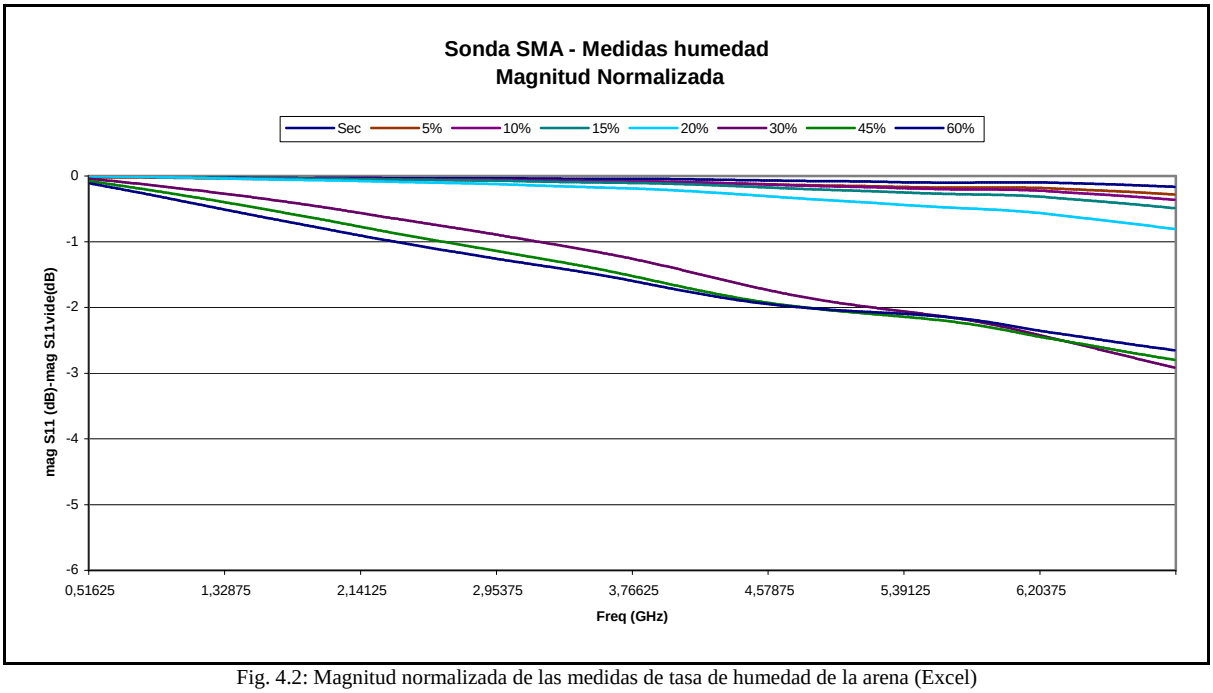

Fig. 4.2: Magnitud normalizada de las medidas de tasa de humedad de la arena (Excel)

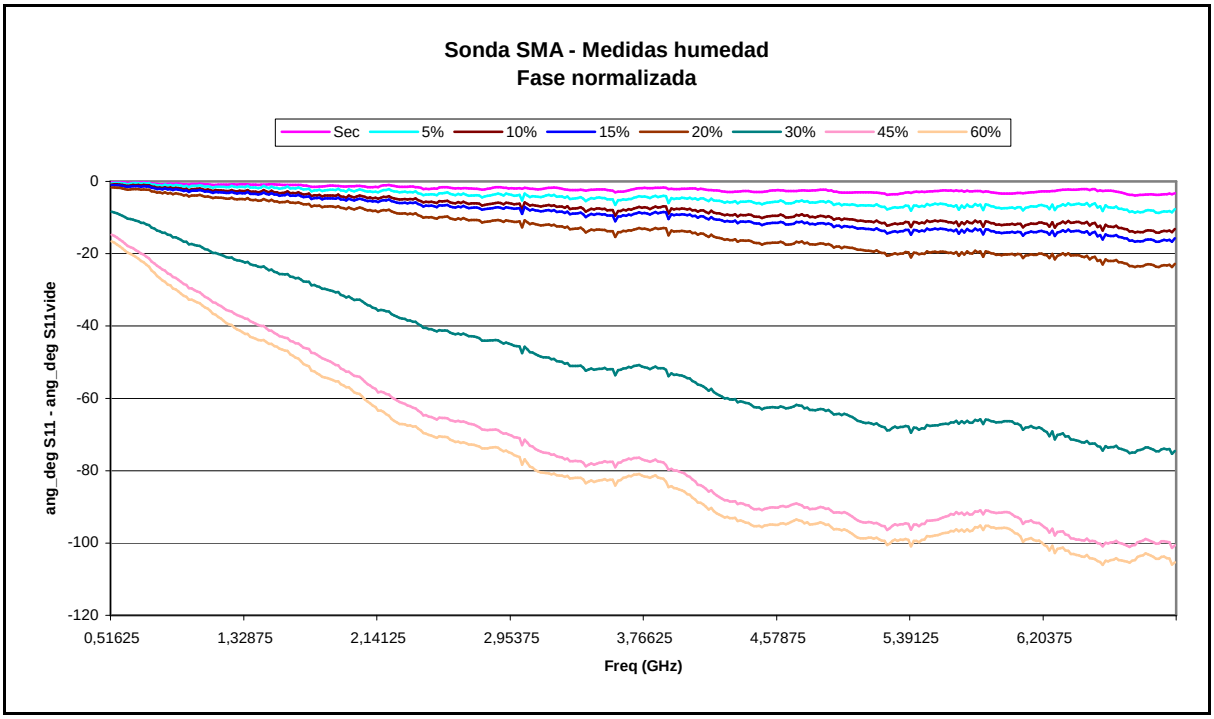

Fig. 4.3: Fase normalizada de las medidas de tasa de humedad de la arena (Excel)

4.3 MEDIDAS DE SALINIDAD

El objetivo de este estudio es conocer la influencia de las sales en solución en la permitividad de la arena. Para ello, vamos a repetir las medidas de las diferentes tasas de humedad para diferentes valores de la salinidad (0‰, 20‰, 40‰, 60‰, 80‰, 100‰ et 120‰).

En teoría, la adición de sales en solución va a causar la aparición de cargas iónicas libres, por lo tanto la conductividad será mayor y habrá más pérdidas (ε'' más elevada). El análisis de los modelos propuestos en la sección 4.1 nos muestra que a partir de un valor de transición habrá una inversión en el comportamiento de ε'' (de hecho, la parte imaginaria de la permitividad va a ser mayor a baja frecuencia que a alta frecuencia, es decir, la permitividad desciende con la frecuencia, al contrario que en todos los casos que hemos visto hasta ahora). En las curvas notaremos este fenómeno en que hay más pérdidas en BF, es decir, la magnitud será más pequeña y

aumentará con la frecuencia. Vamos a presentar los resultados para una salinidad del 100‰, un valor fuerte, con el cuál se podrán ya observar los efectos.

Hemos seguido el mismo proceso para hacer las medidas que en el caso anterior. Hemos utilizado el analizador ANRITSU 37325A, con la ayuda del programa VEE y la sonda SMA. Ha sido necesario igualmente hacer un post-tratamiento de las medidas con el programa KaleidaGraph para encontrar curvas de tendencia (suavizado al 25%). Hemos considerado que la medida con la arena seca no es significativa para la adición de sal puesto que el efecto de dicha adición sólo es importante cuando hay agua que disuelva la sal y provoque la aparición de iones. Para intentar encontrar un valor más preciso de la tasa de humedad de transición (que sabíamos que se encontraba entre el 20% y el 30%) hemos añadido una medida al 25% de humedad:

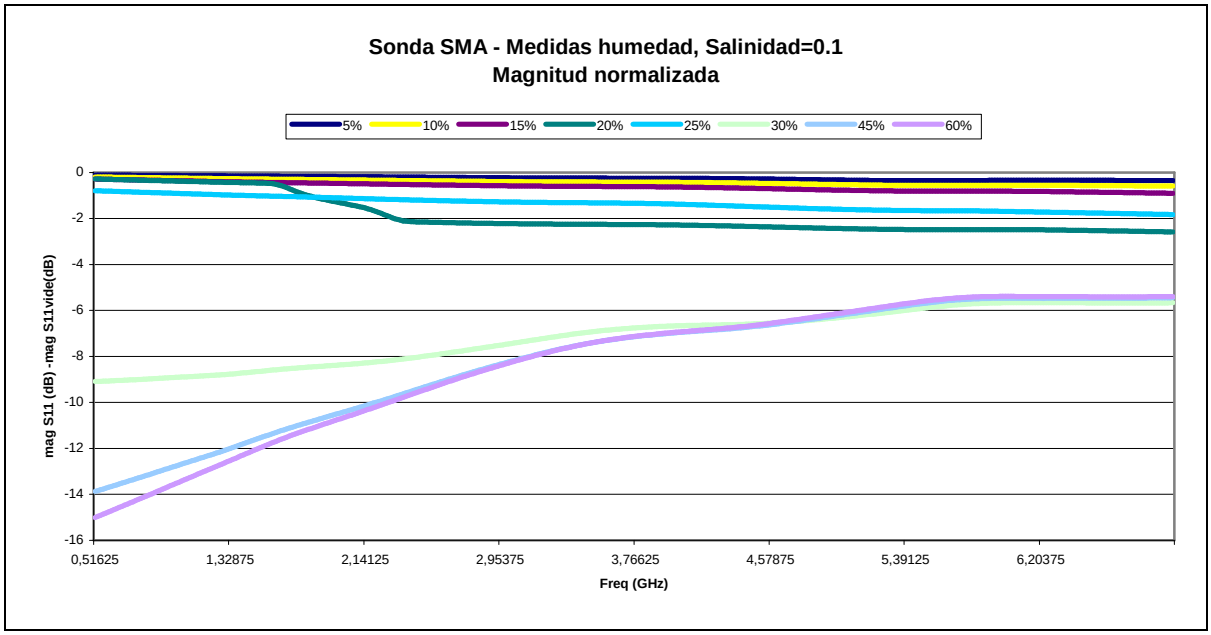

Fig. 4.4: Medidas de humedad con S=100‰. Magnitud normalizada (Excel)

En las gráficas de magnitud que hemos presentado, se aprecia con total claridad el efecto que buscábamos, la inversión en el comportamiento de la parte imaginaria de la permitividad a partir de un cierto valor de la tasa de humedad: vemos que a partir de m_v=30%, las curvas de magnitud son crecientes en vez de decrecientes, es decir, hay más pérdidas (ε'' más fuerte) a baja frecuencia. Veremos a continuación que en la fase no se producen estos efectos:

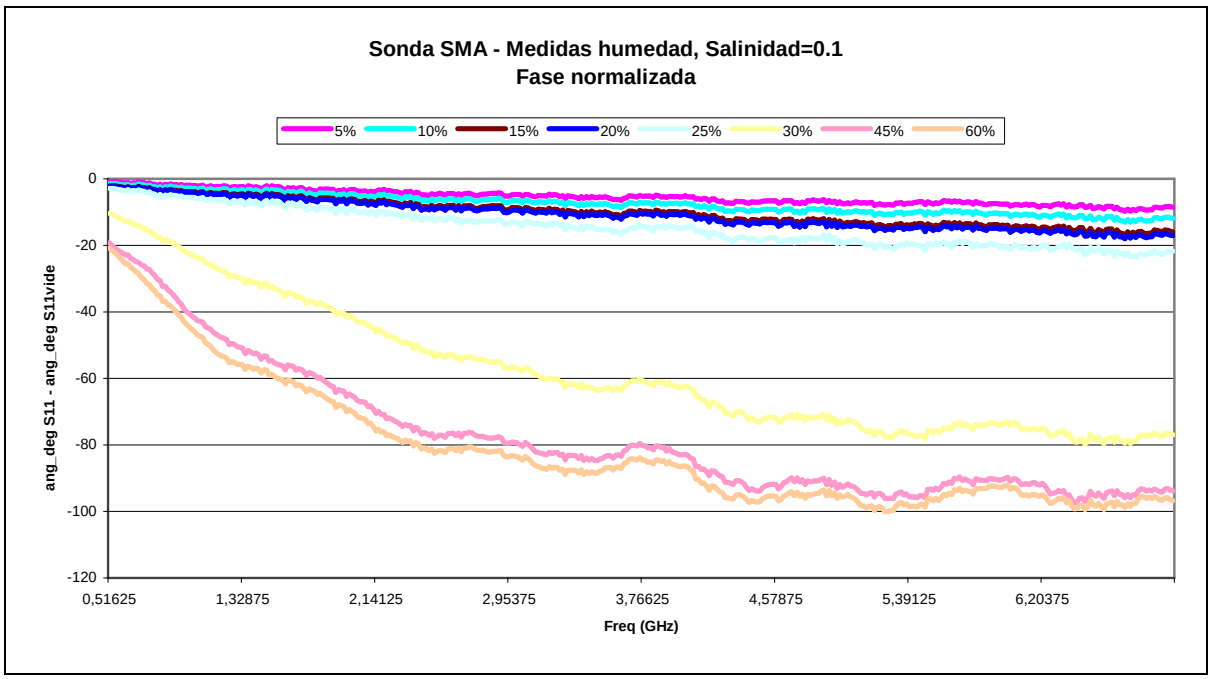

Fig. 4.5: Medidas de humedad con S=100‰. Fase normalizada (Excel)

Mirando las gráficas podemos ver que el valor de transición se encuentra sin duda alguna entre el 25% y el 30%, por lo que mediremos unas tasas de humedad del 27%, 28% y 29% para intentar encontrarlo con más precisión:

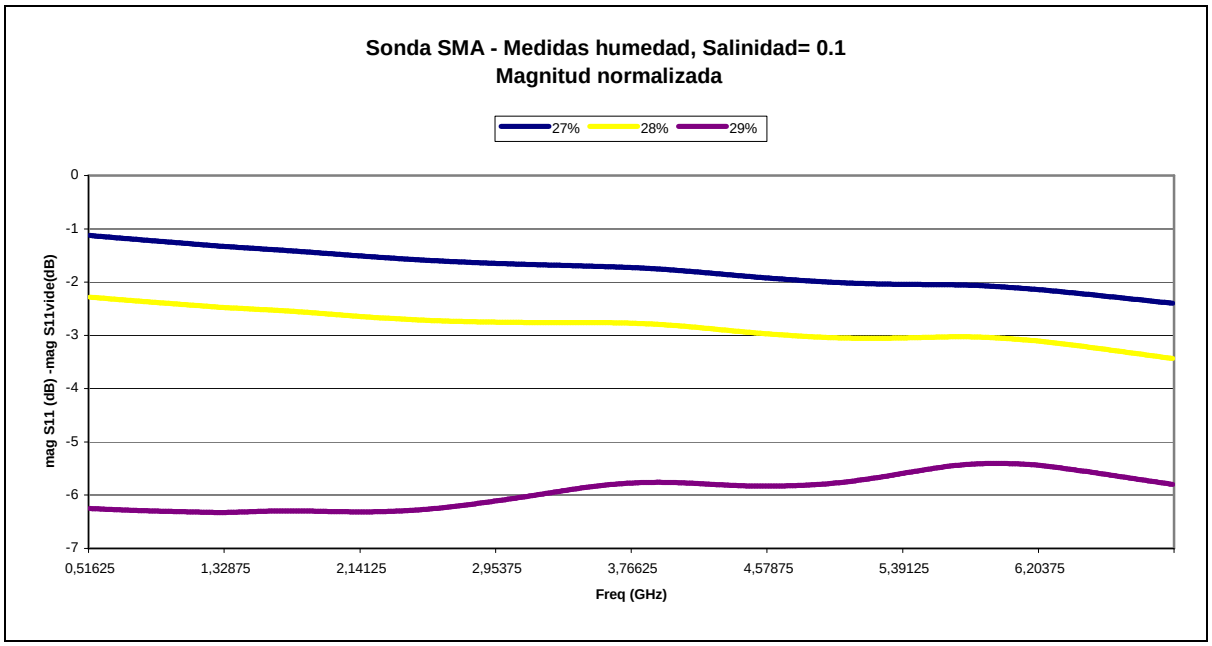

Fig. 4.6: Medidas de humedad con S=100‰. Magnitud normalizada (Excel)

Ahora podemos decir que el valor de transición es del 29%, ya que es el primer valor que ya presenta la inversión de comportamiento. En el capítulo siguiente utilizaremos el programa en MATLAB para obtener las permitividades que corresponden a estos valores medidos.