

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R P.527-6
(09/2021)

**Características eléctricas de
la superficie de la Tierra**

Serie P
Propagación de las ondas radioeléctricas



Unión
Internacional de
Telecomunicaciones

Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión (sonora)
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2022

© UIT 2022

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R P.527-6

Características eléctricas de la superficie de la Tierra

(1978-1982-1992-2017-2019-2021)

Cometido

En esta Recomendación se presentan métodos para modelizar las características eléctricas de la superficie de la Tierra, incluidas el agua pura, el agua salada, el hielo, el suelo y la vegetación, para frecuencias hasta 1 000 GHz, de manera sistemática a partir de la evaluación de la permitividad relativa compleja. En todos los casos la conductividad puede calcularse como una función de la frecuencia y la temperatura a partir de esas evaluaciones. La información anterior sobre las características eléctricas por debajo de 30 MHz, en términos de permitividad y conductividad, se mantiene en el Adjunto del Anexo 1 por su relación con las Recomendaciones UIT-R P.368 y UIT-R P.832. La nueva modelización es totalmente compatible con dicha información anterior.

Palabras clave

Permitividad compleja, conductividad, profundidad de penetración, superficie de la Tierra, agua, vegetación, suelo, hielo

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que las características eléctricas se pueden expresar por medio de tres parámetros: la permeabilidad magnética, μ , la permitividad eléctrica, ϵ , y la conductividad eléctrica, σ ;
- b) que la permeabilidad de la superficie de la Tierra, μ , se puede considerar normalmente como igual a la permeabilidad en el vacío;
- c) que las propiedades eléctricas de la superficie de la Tierra pueden expresarse mediante la permitividad compleja ϵ , de manera equivalente, mediante la parte real y la parte imaginaria de la permitividad compleja;
- d) que es necesario conocer la profundidad de penetración en función de la frecuencia;
- e) que es necesario conocer las características eléctricas de la superficie de la Tierra para diversos aspectos de la modelización de la propagación, incluidas la intensidad de la señal por onda de superficie, la reflexión en el suelo en el terminal terrenal y la interferencia entre estaciones aeronáuticas y/o en vehículos espaciales debida a la reflexión o la dispersión en la superficie de la Tierra, y para aplicaciones de ciencias de la Tierra;
- f) que la Recomendación UIT-R P.368 contiene las curvas de propagación por onda de superficie entre 1 MHz y 30 MHz en distintas condiciones de superficie caracterizadas por la permitividad y la conductividad eléctrica;
- g) que la Recomendación UIT-R P.832 contiene un atlas mundial de la conductividad eléctrica del suelo para frecuencias inferiores a 1 MHz,

recomienda

que se emplee la información indicada en el Anexo 1 para modelizar las características eléctricas de la superficie de la Tierra.

Anexo 1

1 Introducción

En el presente Anexo se presentan métodos de predicción de las características eléctricas de los diferentes tipos de superficie de la Tierra siguientes para frecuencias hasta 1 000 GHz:

- Agua.
- Agua de mar (es decir, salada).
- Hielo seco y húmedo.
- Suelo seco y húmedo (combinación de arena, arcilla y limo).
- Vegetación (por encima y por debajo del punto de congelación).

2 Permitividad compleja

La superficie de la Tierra puede caracterizarse por tres parámetros:

- la permeabilidad magnética, μ ;
- la permitividad eléctrica, ε ; y
- la conductividad eléctrica¹, σ .

La permeabilidad magnética mide la capacidad de un material para soportar la formación de un campo magnético dentro de sí mismo en respuesta a la aplicación de un campo magnético, es decir, la densidad de flujo magnética, B , dividida por la intensidad de campo magnético, H . La permitividad eléctrica mide la capacidad de un material para oponerse a un campo eléctrico, es decir, la densidad de flujo eléctrica, D , dividida por la intensidad de campo eléctrica, E . La conductividad eléctrica mide la capacidad de un material para conducir una corriente eléctrica, es decir, la relación entre la densidad de corriente del material y el campo eléctrico que causa el flujo de corriente.

Dada una onda plana incidente, $\vec{E}(r, t) = \vec{E}_0 e^{j(\omega t - k \cdot r)}$, con una frecuencia radial, ω , un tiempo, t , una permeabilidad magnética, μ , una permitividad eléctrica, ε , y una conductividad eléctrica, σ , el vector numérico de la onda de propagación, \vec{k} , tiene una magnitud, k , que viene dada por la ecuación siguiente:

$$k = \sqrt{-j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} \quad (1a)$$

Los valores de permitividad, permeabilidad y conductividad en el vacío son:

- Permitividad en el vacío $\varepsilon_0 = 8,854\ 187\ 817 \times 10^{-12}$ (F/m)
- Permeabilidad en el vacío $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (N/A²)
- Conductividad en el vacío $\sigma_0 = 0,0$ (S/m)

Conviene definir de la siguiente manera los valores de permitividad relativa, ε_r , y de permeabilidad relativa, μ_r , con respecto a sus valores en el vacío:

- Permitividad relativa $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$
- Permeabilidad relativa $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$

¹ Se puntualiza conductividad eléctrica para diferenciarla de otras conductividades, como la conductividad térmica y la conductividad hidráulica. En adelante se denomina simplemente «conductividad».

donde ε y μ son la permitividad y la permitividad del medio asociadas. En esta Recomendación se supone que $\mu = \mu_0$, en cuyo caso $\mu_r = 1$.

Como se ve en la ecuación (1a) el número de onda depende de σ y ε , no de cada una de ellas por separado. Asimismo, la formulación de otros parámetros físicos que describen los distintos mecanismos de propagación de las ondas radioeléctricas, como la sección transversal de dispersión, los coeficientes de reflexión y los ángulos de refracción, depende de los valores de esta combinación. Además, la raíz cuadrada de esta combinación es equivalente a la formulación del índice de refracción utilizada para caracterizar la troposfera y la ionosfera. El índice de refracción también se utiliza para caracterizar distintos materiales en las bandas de frecuencias ópticas y de ondas milimétricas. Por consiguiente, para simplificar las formulaciones que describen los distintos mecanismos de propagación y normalizar la terminología de las características eléctricas en las distintas bandas de frecuencias, la combinación $\varepsilon - \frac{j\sigma}{\omega}$ se define como la permitividad compleja y se utiliza para describir las características eléctricas de las sustancias.

Si bien la permitividad de se refiere a ε , la permitividad relativa se refiere a ε_r y la permitividad compleja, definida como $\varepsilon'_r - j\varepsilon''_r$, se refiere a:

$$\varepsilon'_r - j\varepsilon''_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (1b)$$

donde ε puede ser compleja.

En la ecuación (1b), ε'_r es la parte real de la permitividad compleja y ε''_r es la parte imaginaria de la permitividad compleja. La parte real de la permitividad relativa compleja, ε'_r , se asocia con la energía almacenada cuando la sustancia se expone a un campo electromagnético. La parte imaginaria de la permitividad relativa compleja, ε''_r , influye en la absorción de energía y se conoce como factor de pérdida. El signo menos en la ecuación (1b) se asocia con un campo electromagnético dependiente en el tiempo de $e^{2j\pi ft}$ (f es la frecuencia en Hz y t es el tiempo en segundos). Si la dependencia del tiempo es $e^{-2j\pi ft}$, el signo menos (-) en la ecuación (1b) se sustituye por un signo más (+).

En frecuencias superiores a 1 000 GHz, la disipación en la superficie de la Tierra se atribuye al movimiento de carga traslacional (corriente de conducción) o al movimiento de carga vibracional (vibración del dipolo), y la parte imaginaria de la permitividad relativa compleja, ε''_r , puede descomponerse en dos términos:

$$\varepsilon''_r = \varepsilon''_d + \frac{\sigma}{2\pi f\varepsilon_0} \quad (2)$$

donde ε''_d representa la disipación por la corriente de desplazamiento asociada a la vibración del dipolo y $\frac{\sigma}{2\pi f\varepsilon_0}$ representa la disipación debida a la corriente de conducción.

La corriente de conducción es el movimiento de traslación global de las cargas libres y es la única corriente a frecuencia cero (es decir, cc). La corriente de conducción es superior a la corriente de desplazamiento en frecuencias inferiores a la frecuencia de transición, f_t , y la corriente de desplazamiento es superior a la corriente de conducción en frecuencias superiores a la frecuencia de transición, f_t . La frecuencia de transición, f_t , definida como la frecuencia en que las corrientes de conducción y desplazamiento son iguales, es:

$$f_t = \frac{\sigma}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon''_d} \quad (3)$$

Para las sustancias dieléctricas no conductoras (sin pérdidas) $\sigma = 0$, por lo que $\epsilon_r'' = \epsilon_d''$. Para algunas de esas sustancias, como el suelo seco y la vegetación seca, $\epsilon_d'' = 0$, por lo que $\epsilon_r'' = 0$ independientemente de la frecuencia, que es el caso considerado en el § 2.1.2.3 de la Recomendación UIT-R P.2040. Por otra parte, para algunas otras sustancias no conductoras, como el agua pura y la nieve seca, ϵ_d'' , por lo que ϵ_r'' es igual a cero sólo en la frecuencia cero. Por consiguiente, el § 2.1.2.3 de la Recomendación UIT-R P.2040 no puede aplicarse a esas sustancias.

Para las sustancias dieléctricas conductoras (con pérdidas), como el agua de mar y el suelo húmedo, la conductividad eléctrica, σ , tiene valores finitos distintos de cero. Por consiguiente, a medida que la frecuencia tiende a cero, la parte imaginaria de la permitividad relativa compleja de esas sustancias tiende a ∞ , como puede inferirse de la ecuación (3). En este caso, es más fácil trabajar con la conductividad, σ , que con la parte imaginaria de la permitividad relativa compleja, que puede expresarse a partir de la ecuación (2) tras poner $\epsilon_d'' = 0$, de la siguiente manera:

$$\sigma = 2\pi\epsilon_0 f \epsilon_r'' = 0,05563 f_{\text{GHz}} \epsilon_r'' \quad (3a)$$

siendo f_{GHz} la frecuencia en GHz. La generalización de la formulación anterior a otras frecuencias, con la ecuación (12) de la Recomendación UIT-R P.2040, da la suma de dos términos: un término da la conductividad eléctrica y el otro término representa la disipación de potencia asociada a la corriente de desplazamiento.

En esta Recomendación se dan métodos de predicción de las partes real e imaginaria de la permitividad relativa compleja, ϵ_r' y ϵ_r'' ; y en las figuras se muestran ejemplos de las tendencias de las partes real e imaginaria de la permitividad relativa compleja en función de la frecuencia en distintas condiciones medioambientales.

2.1 Suelo en capas

Los modelos del § 5 se aplican a suelos subsuperficiales homogéneos, aunque la subsuperficie raramente es homogénea. En realidad está integrada por múltiples capas de distinto espesor y diferentes características eléctricas que se deben tomar en consideración introduciendo el concepto de parámetros efectivos para representar el suelo homogéneo. Los parámetros efectivos pueden utilizarse con las curvas de propagación por onda de superficie sobre terreno liso homogéneo que figuran en la Recomendación UIT-R P.368.

3 Profundidad de penetración

El grado en que las capas inferiores influyen en las características eléctricas efectivas de la superficie de la Tierra depende de la profundidad de penetración de la energía radioeléctrica, δ , que se define como la profundidad a la que la amplitud de la intensidad de campo de la radiación electromagnética dentro de un material cae a 1/e (alrededor del 37%) de su valor original en la superficie (o, más exactamente, justo debajo de la superficie). La profundidad de penetración, δ , en un medio homogéneo de permitividad relativa compleja, ϵ_r ($\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$) se obtiene mediante la siguiente ecuación:

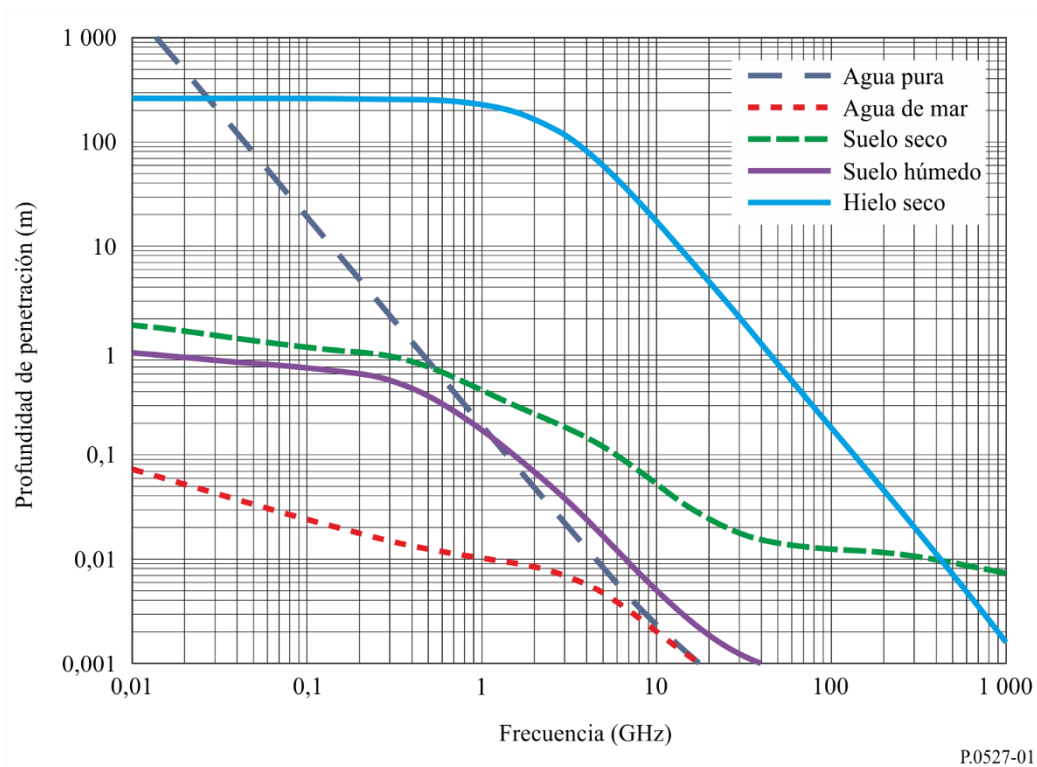
$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{(\epsilon_r')^2 + (\epsilon_r'')^2} - \epsilon_r'}} \quad (m) \quad (4)$$

donde λ es la longitud de onda en metros. Téngase en cuenta que, a medida que la parte imaginaria de la permitividad relativa compleja en la ecuación (4) tiende a cero, la profundidad de penetración tiende a infinito.

En la Fig. 1 se muestran los valores típicos de la profundidad de penetración como una función de la frecuencia para distintos tipos de componentes de la superficie de la Tierra, incluidas el agua pura, el agua salada, el suelo seco, el suelo húmedo y el hielo seco. La profundidad de penetración para el agua pura y el agua salada se calcula a 20°C y la salinidad del agua salada es de 35 g/kg. La profundidad de penetración para suelo seco y suelo húmedo asume que el contenido volumétrico de agua es 0,07 y 0,5, respectivamente. Los demás parámetros del suelo son idénticos a los de la Fig. 7. La profundidad de penetración del hielo seco se calcula a 0°C.

FIGURA 1

Profundidad de penetración de las superficies en función de la frecuencia



P.0527-01

4 Factores que determinan las características eléctricas efectivas del suelo

Los valores efectivos de las características eléctricas del suelo vienen determinados por la naturaleza del suelo, su contenido de humedad, su temperatura, su estructura geológica general y la frecuencia de la radiación electromagnética incidente.

4.1 Naturaleza del suelo

Si bien se ha establecido, en numerosas mediciones, que los valores de las características eléctricas del suelo varían con la naturaleza del suelo, esta variación puede deberse a su capacidad para absorber y retener la humedad más que a la composición química del suelo. Se ha demostrado que la greda, que normalmente tiene una conductividad del orden de 10^{-2} S/m, puede llegar al secarse a tener una conductividad de 10^{-4} S/m, que es del mismo orden que la del granito.

4.2 Contenido de humedad

El contenido de humedad del suelo es el factor que más determina la permitividad y la conductividad del suelo. Se ha demostrado en mediciones de laboratorio que, a medida que aumenta el contenido de humedad del suelo a partir de un valor bajo, la permitividad y la conductividad del suelo aumentan y alcanzan sus valores máximos al aproximarse el contenido de humedad a los valores normales del suelo de que se trata. A profundidades iguales o superiores a 1 m, la humedad del suelo en un lugar determinado suele ser constante. Aunque la humedad puede aumentar durante los periodos de lluvia, la humedad vuelve a su valor típico cuando cesa la lluvia gracias al drenaje del suelo y la evaporación superficial.

El contenido de humedad típico de un suelo puede variar considerablemente de un lugar a otro, ya que las diferencias en la estructura geológica general hacen que el drenaje sea diferente.

4.3 Temperatura

Las mediciones en laboratorio de las características eléctricas del suelo han demostrado que, a bajas frecuencias, la conductividad aumenta aproximadamente en un 3% por grado Celsius, mientras que la permitividad es aproximadamente constante sea cual sea la temperatura. En el punto de congelación se produce generalmente una gran disminución tanto de la conductividad como de la permitividad.

4.4 Variación estacional

La variación estacional sobre las características eléctricas de la superficie del suelo se debe principalmente a la variación del contenido de agua y la temperatura en la capa superior del suelo.

5 Métodos de predicción de permitividad relativa compleja

En las siguientes subcláusulas ofrecen métodos para predecir la permitividad relativa compleja de las siguientes superficies de la Tierra:

- Agua pura (§ 5.1.1).
- Agua de mar (es decir, salada) (§ 5.1.2).
- Hielo puro (§ 5.1.3.1).
- Salmuera de hielo marino (§ 5.1.3.2)
- Hielo marino (hielo del primer año y hielo de varios años) (§ 5.1.3.3).
- Nieve (nieve seca y nieve húmeda) (§ 5.1.4)
- Espuma del mar (§ 5.1.5)
- Suelo (combinación de arena, arcilla, limo y agua) (§ 5.2).
- Vegetación (por encima y por debajo del punto de congelación) (§ 5.3).

En esta cláusula los subíndices de las partes real e imaginaria de la permitividad relativa compleja son «*pw*» para el agua pura (*pure water* en inglés), «*sw*» para agua de mar (*sea water* en inglés), «*ice*» para hielo puro, «*b*» para salmuera de hielo marino, «*m*» para hielo marino, «*ds*» para nieve seca (*dry snow* en inglés), «*ws*» la nieve húmeda (*wet snow* en inglés), «*f*» para espuma del mar (*foam* en inglés), y «*soil*» para suelo. La permitividad relativa compleja del agua pura, el agua de mar, el hielo puro y la salmuera de hielo marino se basan en las características de sus elementos específicos y, en consecuencia, la permitividad relativa compleja del hielo marino, la nieve, la espuma del mar, el suelo y la vegetación se basan en la mezcla de dos o más elementos.

5.1 Agua

En esta subcláusula se presentan métodos para predecir la permitividad relativa compleja del agua pura, el agua de mar, la espuma del mar, el hielo (hielo puro, salmuera de hielo marino y hielo marino) y la nieve (nieve seca y nieve húmeda).

Las cláusulas 5.1.1 y 5.1.2 son válidas para temperaturas de $-4^{\circ}\text{C} \leq T \leq 40^{\circ}\text{C}$ y salinidades de $0 \text{ ppt} \leq S \leq 40 \text{ ppt}$, siendo *ppt* partes por mil.

5.1.1 Agua pura

La permitividad relativa compleja del agua pura, ϵ_{pw} , es una función de la frecuencia, f_{GHz} (GHz), y de la temperatura, T ($^{\circ}\text{C}$):

$$\epsilon_{pw} = \epsilon'_{pw} - j \epsilon''_{pw} \quad (5)$$

$$\epsilon'_{pw} = \frac{\epsilon_s - \epsilon_1}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_1)^2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_{\infty}}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_2)^2} + \epsilon_{\infty} \quad (6)$$

$$\epsilon''_{pw} = \frac{(f_{\text{GHz}}/f_1)(\epsilon_s - \epsilon_1)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_1)^2} + \frac{(f_{\text{GHz}}/f_2)(\epsilon_1 - \epsilon_{\infty})}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_2)^2} \quad (7)$$

donde:

$$\epsilon_s = 77,66 + 103,3\theta \quad (8)$$

$$\epsilon_1 = 0,0671\epsilon_s \quad (9)$$

$$\epsilon_{\infty} = 3,52 - 7,52\theta \quad (10)$$

$$\theta = \frac{300}{T + 273,15} - 1 \quad (11)$$

y f_1 y f_2 son las frecuencias de relajación de Debye:

$$f_1 = 20,20 - 146,4\theta + 316\theta^2 \quad (\text{GHz}) \quad (12)$$

$$f_2 = 39,8 f_1 \quad (\text{GHz}) \quad (13)$$

5.1.2 Agua de mar

La permitividad relativa compleja del agua de mar (salada), ϵ_{sw} , es una función de la frecuencia, f_{GHz} (GHz), la temperatura, T ($^{\circ}\text{C}$), y la salinidad S (g/kg o ppt)².

$$\epsilon_{sw} = \epsilon'_{sw} - j \epsilon''_{sw} \quad (14)$$

$$\epsilon'_{sw} = \frac{\epsilon_{ss} - \epsilon_{1s}}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{1s})^2} + \frac{\epsilon_{1s} - \epsilon_{\infty s}}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{2s})^2} + \epsilon_{\infty s} \quad (15)$$

$$\epsilon''_{sw} = \frac{(f_{\text{GHz}}/f_{1s})(\epsilon_{ss} - \epsilon_{1s})}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{1s})^2} + \frac{(f_{\text{GHz}}/f_{2s})(\epsilon_{1s} - \epsilon_{\infty s})}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{2s})^2} + \frac{18\sigma_{sw}}{f_{\text{GHz}}} \quad (16)$$

² «ppt» quiere decir «partes por mil».

donde:

$$\varepsilon_{ss} = \varepsilon_s \exp(-3,33330 \times 10^{-3}S + 4,74868 \times 10^{-6}S^2) \quad (17)$$

$$f_{1s} = f_1 \left(1 + S \left(\begin{array}{l} 2,3232 \times 10^{-3} - 7,9208 \times 10^{-5}T + 3,6764 \times 10^{-6}T^2 \\ + 3,5594 \times 10^{-7}T^3 + 8,9795 \times 10^{-9}T^4 \end{array} \right) \right) \quad (\text{GHz}) \quad (18)$$

$$\varepsilon_{1s} = \varepsilon_1 \exp(-6,28908 \times 10^{-3}S + 1,76032 \times 10^{-4}S^2 - 9,22144 \times 10^{-5}TS) \quad (19)$$

$$f_{2s} = f_2 \left(1 + S(-1,99723 \times 10^{-2} + 1,81176 \times 10^{-4}T) \right) \quad (\text{GHz}) \quad (20)$$

$$\varepsilon_{\infty s} = \varepsilon_{\infty} \left(1 + S(-2,04265 \times 10^{-3} + 1,57883 \times 10^{-4}T) \right) \quad (21)$$

Los valores de ε_s , ε_1 , ε_{∞} , f_1 y f_2 se obtienen de las ecuaciones (8), (9), (10), (12) y (13). Además, σ_{sw} viene dado por:

$$\sigma_{sw} = \sigma_{35} R_{15} R_{T15} \quad (\text{S/m}) \quad (22)$$

$$\sigma_{35} = 2,903602 + 8,607 \times 10^{-2} T + 4,738817 \times 10^{-4} T^2$$

$$-2,991 \times 10^{-6} T^3 + 4,3047 \times 10^{-9} T^4 \quad (23)$$

$$R_{15} = S \frac{(37,5109 + 5,45216S + 1,4409 \times 10^{-2} S^2)}{(1004,75 + 182,283 S + S^2)} \quad (24)$$

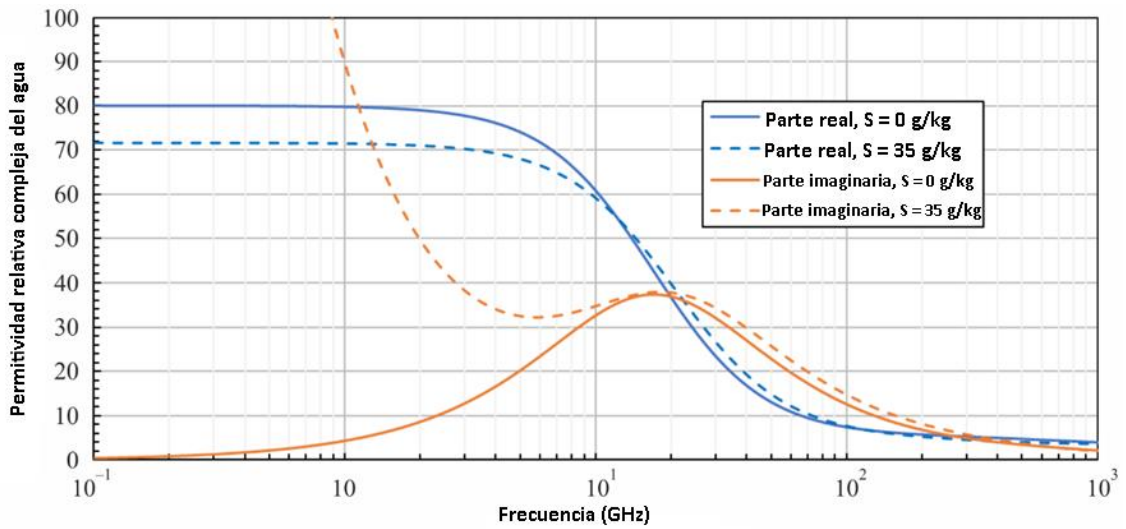
$$R_{T15} = 1 + \frac{\alpha_0(T-15)}{(\alpha_1+T)} \quad (25)$$

$$\alpha_0 = \frac{(6,9431 + 3,2841S - 9,9486 \times 10^{-2} S^2)}{(84,850 + 69,024 S + S^2)} \quad (26)$$

$$\alpha_1 = 49,843 - 0,2276 S + 0,198 \times 10^{-2} S^2 \quad (27)$$

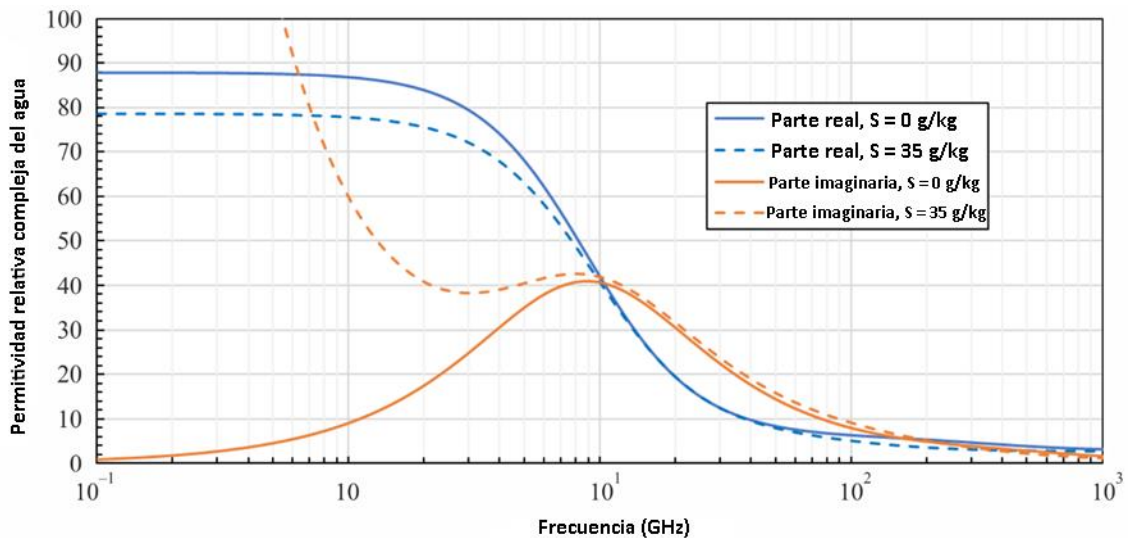
La permitividad relativa compleja del agua pura que se obtiene con las ecuaciones (5) a (7) es un caso especial de las ecuaciones (14) a (16) donde $S = 0$. Las permitividades relativas complejas del agua pura ($S = 0$ g/kg) y del agua de mar ($S = 35$ g/kg) en función de la frecuencia se muestran en la Fig. 2 para $T = 20^\circ\text{C}$ y en la Fig. 3 para $T = 0^\circ\text{C}$.

FIGURA 2
Permitividad relativa compleja del agua pura y del agua de mar en función de la frecuencia
($T = 20^{\circ}\text{C}$)



P.0527-02

FIGURA 3
Permitividad relativa compleja del agua pura y del agua de mar en función de la frecuencia
($T = 0^{\circ}\text{C}$)



P.0527-03

5.1.3 Hielo

En esta cláusula se presentan métodos para predecir la permitividad relativa compleja del hielo puro, salmuera de hielo marino y hielo marino.

5.1.3.1 Hielo puro

El hielo puro está compuesto por agua pura congelada (es decir, $-60^{\circ}\text{C} \leq T_{ice} \leq 0^{\circ}\text{C}$). La permitividad relativa compleja del hielo puro, ϵ_{ice} , viene dada por:

$$\epsilon_{ice} = \epsilon'_{ice} - j \epsilon''_{ice} \quad (28)$$

La parte real de la permitividad relativa compleja del hielo puro, ϵ'_{ice} , es una función de la temperatura, T_{ice} (°C), y es independiente de la frecuencia:

$$\epsilon'_{ice} = 3,1884 + 0,00091 T_{ice} \quad (29)$$

y la parte imaginaria de la permitividad relativa compleja del hielo puro, ϵ''_{ice} , es una función de la temperatura, T_{ice} (°C), para frecuencias, f_{GHz} (GHz), hasta 1 000 GHz:

$$\epsilon''_{ice} = \frac{A}{f_{GHz}} + B f_{GHz} \quad (30)$$

donde:

$$A = (0,00504 + 0,0062\theta)\exp(-22,1\theta) \quad (31)$$

$$B = \frac{0,0207}{T_{ice}+273,15} \frac{\exp(-\tau)}{(\exp(-\tau)-1)^2} + 1,16 \times 10^{-11} f_{GHz}^2 + \exp(-9,963 + 0,0372T_{ice}) \quad (32)$$

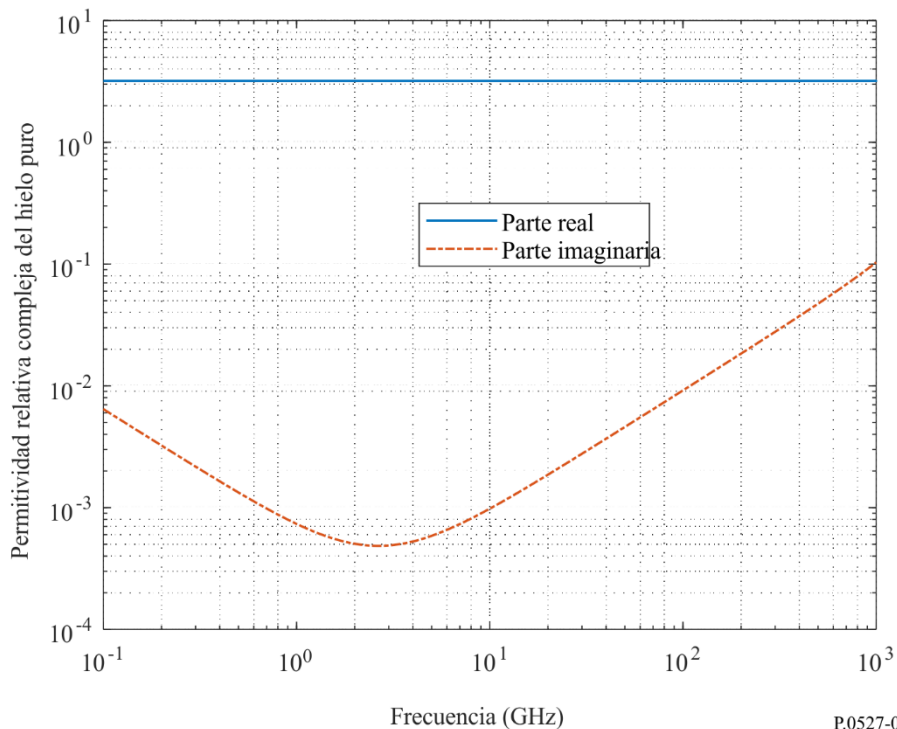
$$\tau = \frac{335}{T_{ice}+273,15} \quad (33)$$

y

$$\theta = \frac{300}{T_{ice}+273,15} - 1 \quad (34)$$

Las partes real (ϵ'_{ice}) e imaginaria (ϵ''_{ice}) de la permitividad relativa compleja del hielo puro en función de la frecuencia para $T_{ice} = 0^\circ\text{C}$ se muestran en la Fig. 4.

FIGURA 4
Permitividad relativa compleja del hielo puro en función de la frecuencia
($T_{ice} = 0^\circ\text{C}$)



5.1.3.2 Salmuera de hielo marino

La salmuera del hielo marino es agua pura con pequeñas gotas de sal disueltas que existe al formarse el hielo marino. La permitividad relativa compleja de la salmuera de hielo marino, ϵ_b , es:

$$\epsilon_b = \epsilon'_b - j\epsilon''_b \quad (35)$$

Para temperaturas $-30^\circ\text{C} \leq T_{ice} \leq -2^\circ\text{C}$ y frecuencias, f_{GHz} (GHz), hasta 1 000 GHz, ϵ'_b y ϵ''_b son:

$$\epsilon'_b = \epsilon_{b\infty} + \frac{\epsilon_{bs} - \epsilon_{b\infty}}{1 + (2\pi\tau f_{\text{GHz}})^2} \quad (36)$$

$$\epsilon''_b = \frac{2\pi\tau f_{\text{GHz}} (\epsilon_{bs} - \epsilon_{b\infty})}{1 + (2\pi\tau f_{\text{GHz}})^2} + \frac{18 \sigma_b}{f_{\text{GHz}}} \quad (37)$$

siendo:

$$\epsilon_{b\infty} = \frac{82,79 + 8,19 T_{ice}^2}{15,68 + T_{ice}^2} \quad (38a)$$

$$\epsilon_{bs} = \frac{939,66 - 19,068 T_{ice}}{10,737 - T_{ice}} \quad (38b)$$

$$2\pi\tau = 0,10990 + 0,13603 \times 10^{-2} T_{ice} + 0,20894 \times 10^{-3} T_{ice}^2 + 0,28167 \times 10^{-5} T_{ice}^3 \quad (38c)$$

T_{ice} ($^\circ\text{C}$) es la temperatura, y σ_b (S/m) es la conductividad dada por:

$$\sigma_b = \begin{cases} -T_{ice} \exp(0,5193 + 0,08755 T_{ice}), & T_{ice} \geq -22,9^\circ\text{C} \\ -T_{ice} \exp(1,0334 + 0,1100 T_{ice}), & T_{ice} < -22,9^\circ\text{C} \end{cases} \quad (39)$$

Las partes real (ϵ'_b) e imaginaria (ϵ''_b) de la permitividad relativa compleja de la salmuera de hielo marino en función de la frecuencia para $T_{ice} = -5^\circ\text{C}$ y -25°C se muestran en las Figs. 5 y 6, respectivamente.

FIGURA 5
Permitividad relativa compleja de la salmuera de hielo marino
en función de la frecuencia ($T_{ice} = -5^\circ\text{C}$)

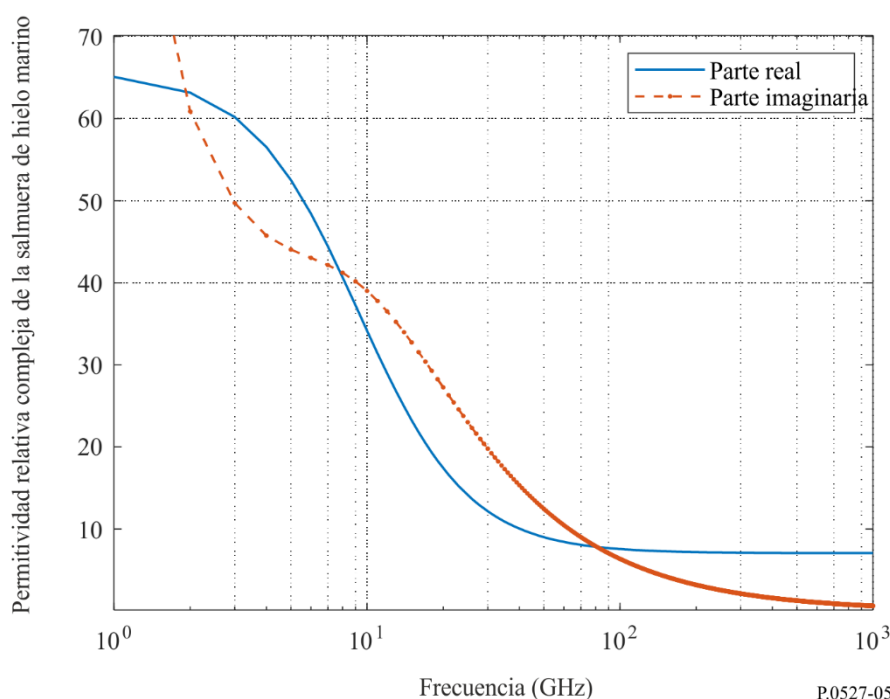
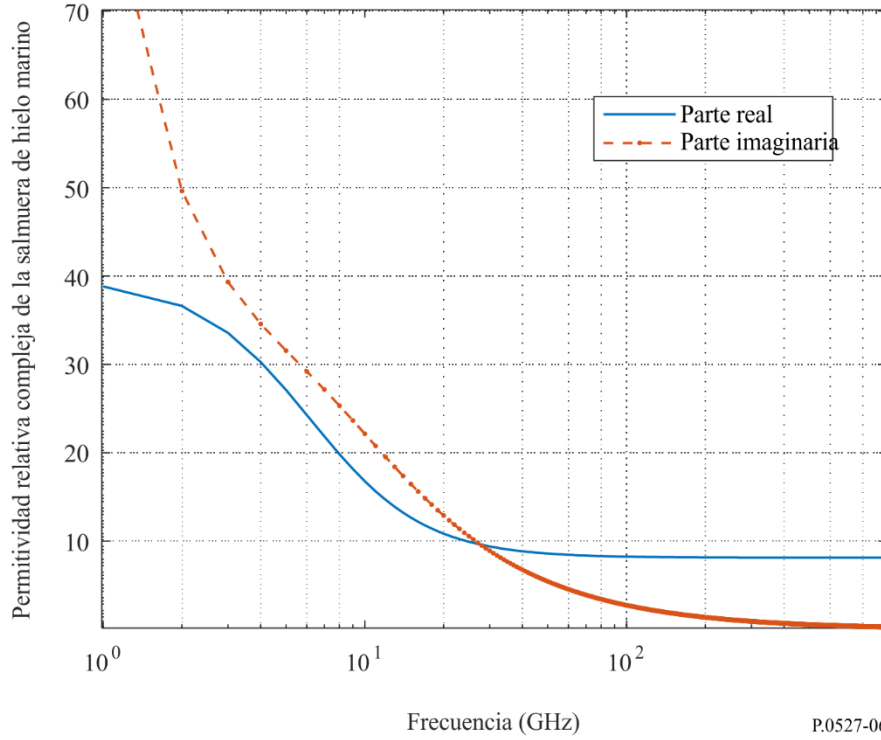


FIGURA 6
Permitividad relativa compleja de la salmuera de hielo marino
en función de la frecuencia ($T_{ice} = -25^{\circ}\text{C}$)



5.1.3.3 Hielo marino

Existen dos tipos de hielo marino: a) el hielo de primer año y b) hielo de varios años.

El hielo de primer año se compone de hielo puro y bolsas de salmuera, cuya forma depende de si el hielo de primer año es hielo frazil o hielo en columnas. El hielo frazil es un conjunto de cristales de hielo en forma de aguja separados y orientados al azar, al tiempo que el hielo en columnas es un conjunto de cristales de hielo en forma de aguja orientados verticalmente. El espesor máximo del hielo de primer año oscila entre 0,3 m y 2 m.

El hielo de varios años es hielo que ha logrado perdurar al menos durante una temporada de deshielo y contiene mucha menos salmuera y más bolsas de aire que el hielo de primer año. El espesor del hielo de varios años suele oscilar entre 2 y 4 m y las bolsas de aire tienen forma esférica.

Para el hielo de primer año, la fracción del volumen de salmuera, v_b , viene dada por:

$$v_b = \frac{\rho_{ice} S_{ice}}{F_1(T_{ice}) - \rho_{ice} S_{ice} F_2(T_{ice})} \quad (40)$$

siendo ρ_{ice} (g/cm^3) es la densidad del hielo marino, que viene dada por:

$$\rho_{ice} = 0,917 - 1,403 \times 10^{-4} T_{ice} \quad (41)$$

T_{ice} ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura del hielo, $-30^{\circ}\text{C} \leq T_{ice} \leq -2^{\circ}\text{C}$ y S_{ice} (ppt) es la salinidad del hielo marino, siendo:

$$S_{ice} = \begin{cases} 7,88 - 1,59 h_{ice}, & h_{ice} > 0,3573 \text{ m} \\ 14,24 - 19,39 h_{ice}, & h_{ice} \leq 0,3573 \text{ m} \end{cases} \quad (42)$$

y h_{ice} (m) es el espesor del hielo marino.. F_1 y F_2 se calculan de la siguiente manera mediante los coeficientes del Cuadro 1:

$$F_i(T_{ice}) = \alpha_0 + \alpha_1 T_{ice} + \alpha_2 T_{ice}^2 + \alpha_3 T_{ice}^3, \quad i = 1, 2 \quad (43)$$

CUADRO 1

Coeficientes α_0 , α_1 , α_2 y α_3

Coeficiente	$-30^{\circ}\text{C} \leq T_{ice} \leq -22,9^{\circ}\text{C}$		$-22,9^{\circ}\text{C} \leq T_{ice} \leq -2^{\circ}\text{C}$	
	$F_1(T_{ice})$	$F_2(T_{ice})$	$F_1(T_{ice})$	$F_2(T_{ice})$
α_0	9 899	8,547	-4,732	0,089 03
α_1	1 309	1,089	-22,45	-0,017 63
α_2	55,27	0,045 18	-0,639 7	-0,000 533
α_3	0,716	0,000 581 9	-0,010 74	-0,000 008 801

5.1.3.3.1 Permisividad relativa compleja del hielo de primer año

En esta subcláusula se proporcionan métodos para predecir la permitividad relativa compleja del hielo de primer año frazil y del hielo de primer año en columnas.

Los métodos de predicción de la permitividad relativa compleja que figuran en esta cláusula son aplicables a temperaturas de $-30^{\circ}\text{C} \leq T_{ice} \leq -2^{\circ}\text{C}$ y frecuencias máximas de 100 GHz.

a) Permisividad relativa compleja del hielo marino frazil

Con respecto al hielo frazil, en el que las bolsas de salmuera tienen forma de agujas orientadas al azar, la permitividad relativa compleja es isotrópica y viene dada por:

$$\epsilon_m = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (44)$$

siendo:

$$A = 3 \quad (45a)$$

$$B = (3 - 5v_b)(\epsilon_b - \epsilon_{ice}) \quad (45b)$$

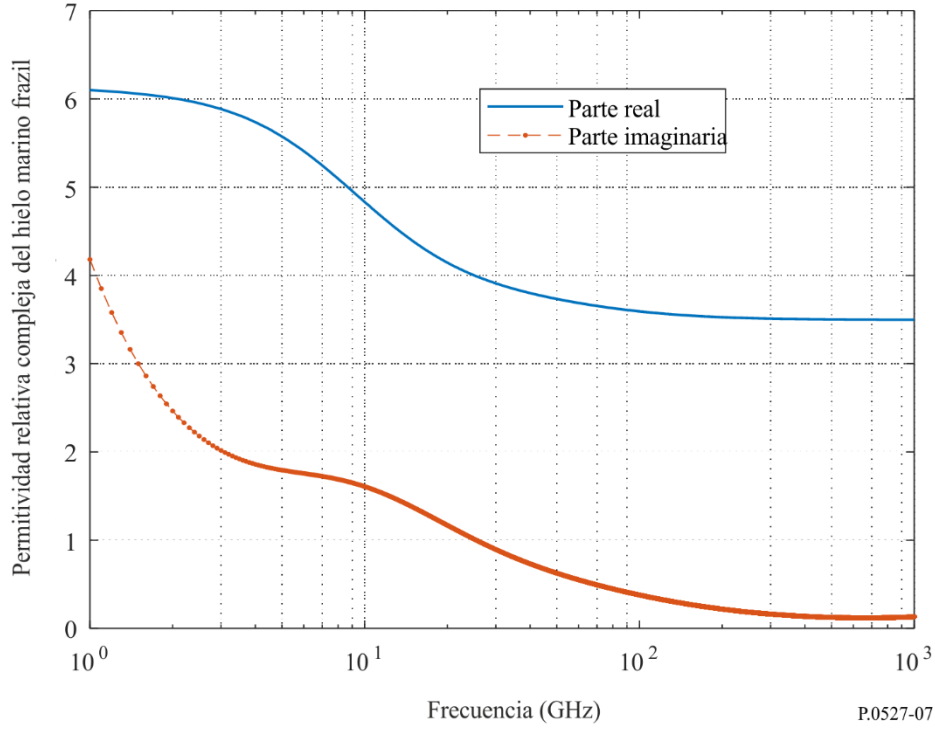
$$C = -(3 - v_b)\epsilon_b\epsilon_{ice} - v_b (\epsilon_b)^2 \quad (45c)$$

ϵ_{ice} , ϵ_b y v_b se calculan mediante las ecuaciones (28), (35) y (40), respectivamente.

En la Fig. 7 se muestran las partes real ($Re\{\epsilon_m\}$) e imaginaria ($Im\{\epsilon_m\}$) de la permitividad relativa compleja del hielo marino frazil de primer año en función de la frecuencia para $T_{ice} -5^{\circ}\text{C}$.

FIGURA 7

Permitividad relativa compleja del hielo marino frazil de primer año
en función de la frecuencia ($T_{ice} = -5^{\circ}\text{C}$ y $h_{ice} = 0,2$)



b) Permisividad relativa compleja del hielo en columnas

Con respecto al hielo en columnas, en el que las bolsas de salmuera tienen forma de agujas orientadas verticalmente, la permitividad relativa compleja es anisótropa. Los componentes ϵ_{mx} , ϵ_{my} , y ϵ_{mz} , para los que los ejes x y y son paralelos a la superficie de la Tierra y el eje z es normal a la superficie de la Tierra, vienen dados por:

$$\epsilon_{mx} = \epsilon_{my} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (46)$$

$$\epsilon_{mz} = \epsilon_{ice} + v_b (\epsilon_b - \epsilon_{ice}) \quad (47)$$

siendo:

$$A = 1 \quad (48a)$$

$$B = (1 - 2v_b)(\epsilon_b - \epsilon_{ice}) \quad (48b)$$

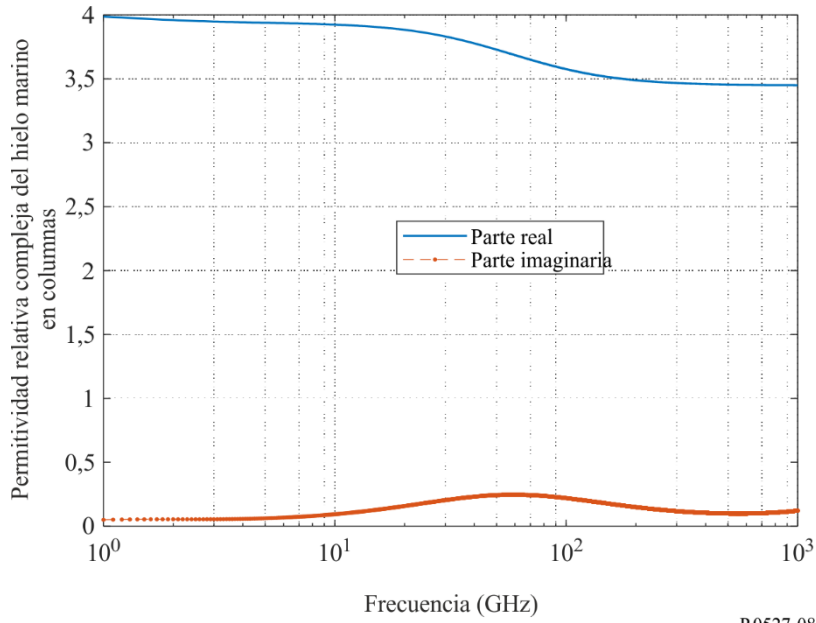
$$C = -\epsilon_b \epsilon_{ice} \quad (48c)$$

ϵ_{ice} , ϵ_b , y v_b se calculan mediante las ecuaciones (28), (35), y (40) respectivamente.

Las partes real ($Re\{\epsilon_{mx,y}\}$) e imaginaria ($Im\{\epsilon_{mx,y}\}$) de la permitividad relativa compleja del hielo marino en columnas en función de la frecuencia para $T_{ice} = -5^{\circ}\text{C}$ en sentidos horizontales (x e y) se muestran en la Fig. 8, y las partes real ($Re\{\epsilon_{mz}\}$) e imaginaria ($Im\{\epsilon_{mz}\}$) de la permitividad relativa compleja del hielo marino en columnas en función de la frecuencia para $T_{ice} = -5^{\circ}\text{C}$ en sentido vertical (z) se muestran en la Fig. 9.

FIGURA 8

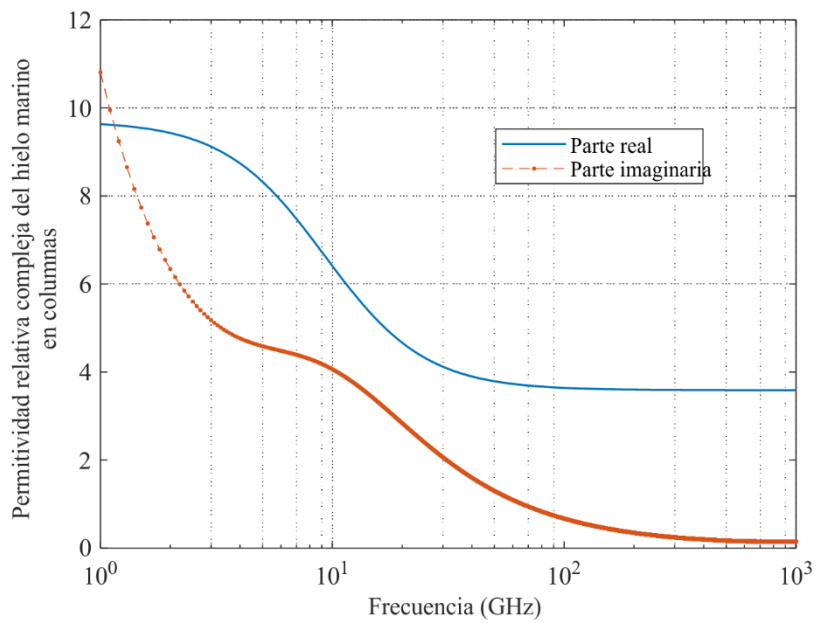
Permitividad relativa compleja del hielo marino en columnas del primer año en sentido horizontal (x e y) en función de la frecuencia ($T_{ice} = -5^{\circ}\text{C}$ y $h_{ice} = 0,2$ m)



P.0527-08

FIGURA 9

Permitividad relativa compleja del hielo marino en columnas del primer año en sentido vertical (z) en función de la frecuencia ($T_{ice} = -5^{\circ}\text{C}$ y $h_{ice} = 0,2$ m)



P.0527-09

5.1.3.3.2 Permisividad relativa compleja del hielo de varios años

En relación con el hielo de varios años, que es una mezcla de hielo puro y bolsas de aire esféricas, la permitividad relativa compleja, ϵ_m , es isotrópica y viene dada por:

$$\epsilon_m = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (49)$$

siendo:

$$A = 2 \quad (50a)$$

$$B = 1 - 2\epsilon_{ice} - 3v_a(1 - \epsilon_{ice}) \quad (50b)$$

$$C = -\epsilon_{ice} \quad (50c)$$

ϵ_{ice} es la permitividad relativa compleja del hielo puro de la ecuación (28), y v_a es la fracción de volumen de aire.

El método de predicción de la permitividad relativa compleja anteriormente especificado es aplicable para temperaturas de $-30^\circ\text{C} \leq T \leq -2^\circ\text{C}$ y frecuencias máximas de 100 GHz.

5.1.4 Nieve

Los métodos de predicción de la permitividad relativa compleja que figuran en esta cláusula son aplicables para temperaturas de $-60^\circ\text{C} \leq T \leq 0^\circ\text{C}$ y frecuencias máximas de 100 GHz.

5.1.4.1 Nieve seca

La permitividad relativa compleja de la nieve seca, ϵ_{ds} , viene dada por:

$$\epsilon_{ds} = \epsilon'_{ds} - j\epsilon''_{ds} \quad (51)$$

siendo:

$$\epsilon'_{ds} = \begin{cases} 1 + 1,9\rho_{ds}, & \rho_{ds} \leq 0,5 \text{ g/cm}^3 \\ 0,51 + 2,88\rho_{ds}, & \rho_{ds} \geq 0,5 \text{ g/cm}^3 \end{cases} \quad (52)$$

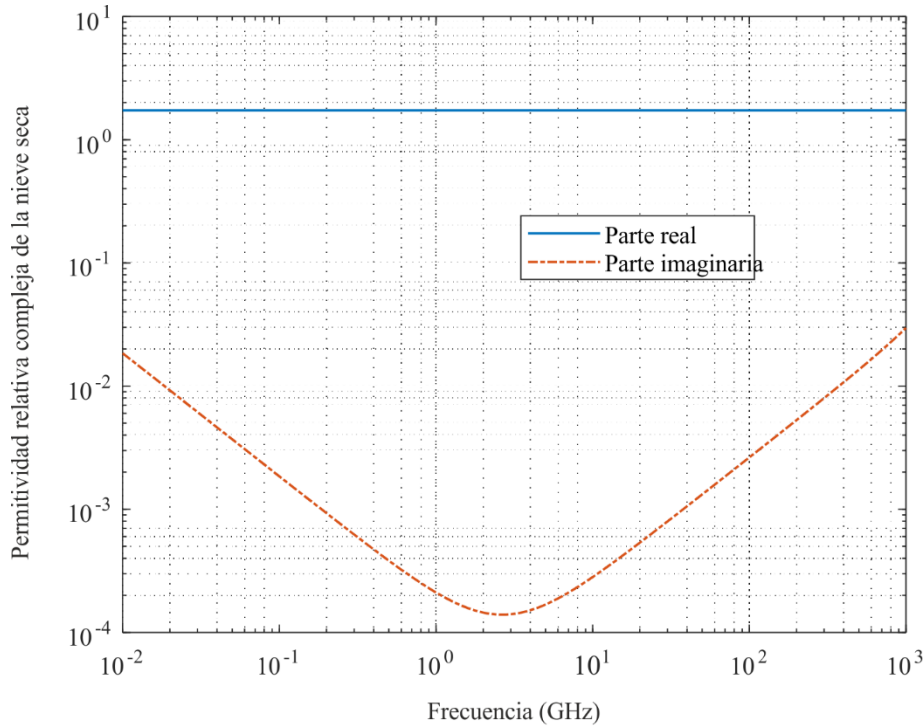
$$\epsilon''_{ds} = 3\epsilon''_{ice} f_{ice} \frac{(\epsilon'_{ds})^2 (2\epsilon'_{ds} + 1)}{(\epsilon'_{ice} + 2\epsilon'_{ds}) [\epsilon'_{ice} + 2(\epsilon'_{ds})^2]} \quad (53)$$

ρ_{ds} es la densidad de la nieve seca en g/cm^3 , y $f_{ice} = \rho_{ds}/\rho_{ice}$, siendo $\rho_{ice} = 0,916 \text{ g/cm}^3$.

Las partes real (ϵ'_{ds}) e imaginaria (ϵ''_{ds}) de la permitividad relativa compleja de la nieve seca en función de la frecuencia para $\rho_{ds} = 0,4 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{ice} = 0,916 \text{ g/cm}^3$, y $T_{ice} = -10^\circ\text{C}$ se muestran en la Fig. 10.

FIGURA 10

Permitividad relativa compleja de la nieve seca en función de la frecuencia
 ($\rho_{ds} = 0,4 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{ice} = 0,916 \text{ g/cm}^3$, y $T_{ice} = -10^\circ\text{C}$)



P.0527-10

5.1.4.2 Nieve húmeda

La nieve húmeda es una mezcla de nieve seca y agua pura. La permitividad relativa compleja de la nieve húmeda, ϵ_{ws} , viene dada por:

$$\epsilon_{ws} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (54)$$

siendo:

$$A = 2 \quad (55a)$$

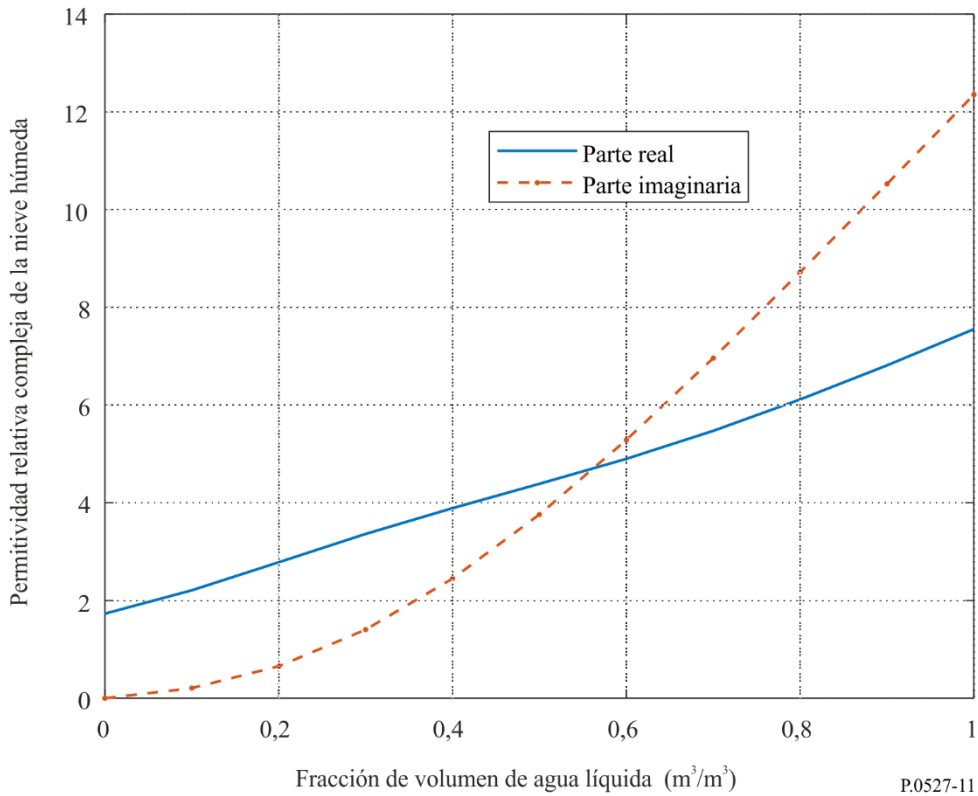
$$B = \epsilon_{pw} - 2\epsilon_{ds} - 3F_{wc}(\epsilon_{pw} - \epsilon_{ds}) \quad (55b)$$

$$C = -\epsilon_{pw}\epsilon_{ds} \quad (55c)$$

F_{wc} ($0 \leq F_{wc} \leq 1$) es la fracción de volumen de agua líquida (m^3/m^3); y ϵ_{pw} y ϵ_{ice} son las permitividades relativas complejas del agua pura y la nieve seca de las ecuaciones (5) y (51), respectivamente. Las partes real ($Re\{\epsilon_{ws}\}$) e imaginaria ($Im\{\epsilon_{ws}\}$) de la permitividad relativa compleja de la nieve húmeda en función de la fracción de volumen de agua líquida para $f_{\text{GHz}} = 60 \text{ GHz}$ y $T = 0^\circ\text{C}$ se muestra en la Fig. 11.

FIGURA 11

Permisividad relativa compleja de la nieve húmeda frente a la fracción de volumen de agua líquida
($f_{GHz} = 60 \text{ GHz}$ y $T = 0^\circ\text{C}$)



P.0527-11

5.1.5 Espuma del mar

La espuma del mar, resultado de la agitación del agua del mar que provocan las olas al romper en la costa, está compuesta por agua de mar y burbujas de aire atrapadas en ella. La permisividad relativa compleja de la espuma del mar, ϵ_f , viene dada por:

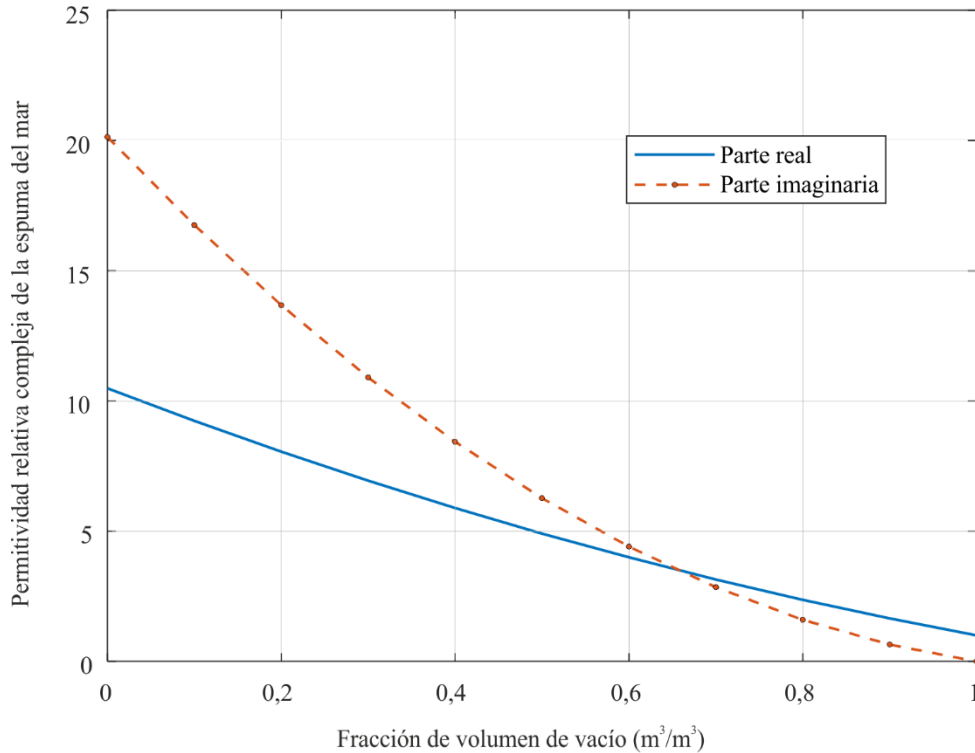
$$\epsilon_f = (f_a + (1 - f_a) \sqrt{\epsilon_{sw}})^2 \quad (56)$$

siendo f_a ($0 \leq f_a \leq 1$) la fracción de volumen de vacío, y ϵ_{sw} la permisividad relativa compleja del agua de mar de la ecuación (14). La fracción de volumen de vacío (m^3/m^3), relación entre el volumen de burbujas de aire y el volumen total, alcanza su valor máximo en la interfaz aire-espuma y su valor mínimo en la interfaz espuma-agua de mar. El método de predicción de la permisividad relativa compleja en la ecuación (56) es aplicable para temperaturas de $-4^\circ\text{C} \leq T \leq 40^\circ\text{C}$ y frecuencias máximas de 100 GHz.

Las partes real ($Re\{\epsilon_f\}$) e imaginaria ($Im\{\epsilon_f\}$) de la permisividad relativa compleja de la espuma del mar en función de la fracción de volumen de vacío para $f_{GHz} = 60 \text{ GHz}$, $S = 35 \text{ ppt}$, y $T = 20^\circ\text{C}$ se muestran en la Fig. 12.

FIGURA 12

Permitividad relativa compleja de la espuma del mar en función de la fracción de volumen de vacío
($f_{\text{GHz}} = 60 \text{ GHz}$, $T = 20^\circ\text{C}$, y $S = 35 \text{ ppt}$)



P.0527-12

5.2 Suelo

La permitividad relativa compleja del suelo, ϵ_{soil} , es una función de la frecuencia, f_{GHz} (GHz), la temperatura, T ($^\circ\text{C}$), la composición del suelo y el contenido volumétrico de agua.

La composición del suelo se caracteriza por los porcentajes volumétricos de los siguientes constituyentes del suelo seco, disponibles de estudios en el terreno y análisis en laboratorio:

a) $P_{\text{sand}} = \%$ arena, b) $P_{\text{clay}} = \%$ arcilla y c) $P_{\text{silt}} = \%$ limo.

La composición del suelo también se caracteriza por: a) la gravedad específica (es decir, la densidad de masa del suelo dividida por la densidad de masa del agua) de la mezcla seca de constituyentes del suelo, ρ_s (g/cm^3); b) el contenido volumétrico de agua, m_v (el volumen de agua dividido por el volumen total del suelo para una muestra dada del mismo (m^3/m^3)); y c) la densidad global ρ_b (g/cm^3) (es decir la masa de suelo para un volumen dado del mismo). Aunque la densidad global del suelo, ρ_b , no es fácil medirla directamente, puede derivarse de los porcentajes de los componentes secos. Si no se dispone de una función de pseudotransferencia local, se puede utilizar la siguiente función de pseudotransferencia empírica:

$$\rho_b = 1,07256 + 0,078886 \ln(P_{\text{sand}}) + 0,038753 \ln(P_{\text{clay}}) + 0,032732 \ln(P_{\text{silt}}) \quad (57)$$

Si el porcentaje de cualquier componente es inferior al 1%, debe omitirse el término correspondiente en la ecuación (57). Los porcentajes de los componentes de los términos incluidos deben sumar el 100%.

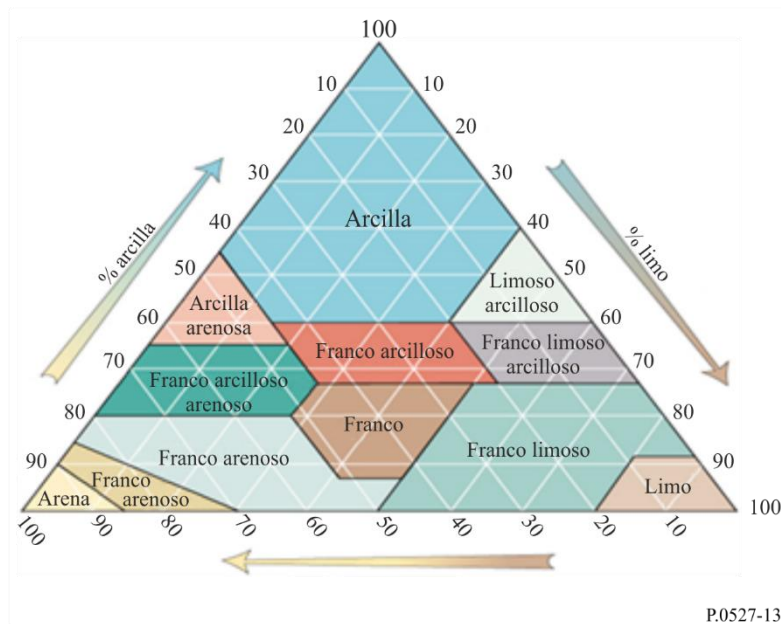
La temperatura del suelo y el contenido volumétrico de agua pueden obtenerse mediante los mapas de la Tierra que proporcionan los sistemas de teledetección espacial, y la textura del suelo se calcula mediante las bases de datos geológicas HWSD1.21 (*Harmonized World Soil Databases Version 1.21*) y el GLDAS (*Global Land Data Assimilation System*), entre otras. A falta de datos locales, pueden utilizarse los que figuran en el Cuadro 2.

En el Cuadro 2 se muestran los porcentajes de componentes típicos, las gravedades específicas y las densidades globales de cuatro tipos de suelo representativos.

CUADRO 2
Parámetros físicos de distintos tipos de suelo

Clase textural del suelo	1 Franco arenoso	2 Franco	3 Franco limoso	4 Limoso arcilloso
% de arena	51,52	41,96	30,63	5,02
% de arcilla	13,42	8,53	13,48	47,38
% de limo	35,06	49,51	55,89	47,60
ρ_s	2,66	2,70	2,59	2,56
ρ_b (g cm ⁻³)	1,6006	1,5781	1,5750	1,4758

FIGURA 13
Triángulo de las clases texturales del suelo



La clase textural del suelo indicada en la primera fila del Cuadro 1 se basa en el triángulo de clases texturales del suelo de la Fig. 13.

Este método de predicción considera el suelo como una mezcla de cuatro componentes: a) partículas del suelo compuestas por una combinación de arcilla, arena y limo, b) el aire, c) el agua ligada (agua ligada a las partículas del suelo por fuerzas como la tensión de superficie, donde el grosor de la capa de agua, su constante dieléctrica y sus frecuencias de relajación son desconocidos), y d) el agua libre (agua que fluye libremente en los intersticios del suelo). La permitividad relativa compleja del suelo, ϵ_{soil} , compuesto por estos cuatro elementos es:

$$\epsilon_{soil} = \epsilon'_{soil} - j\epsilon''_{soil} \quad (58)$$

donde:

$$\varepsilon'_{soil} = \left[1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\{\varepsilon'_{sm}\}^\alpha - 1) + m_v^{\beta'} (\varepsilon'_{fw})^\alpha - m_v \right]^{1/\alpha} \quad (59)$$

$$\varepsilon''_{soil} = \left[m_v^{\beta''} (\varepsilon''_{fw})^\alpha \right]^{1/\alpha} \quad (60)$$

$$\varepsilon'_{sm} = (1,01 + 0,44 \rho_s)^2 - 0,062 \quad (61)$$

$$\beta' = 1,2748 - 0,00519 P_{sand} - 0,00152 P_{clay} \quad (62)$$

$$\beta'' = 1,33797 - 0,00603 P_{sand} - 0,00166 P_{clay} \quad (60)$$

y

$$\alpha = 0,65 \quad (64)$$

ε'_{fw} y ε''_{fw} son las partes real e imaginaria de la permitividad relativa compleja del agua libre:

$$\varepsilon'_{fw} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_1}{1 + (f_{GHz}/f_1)^2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_\infty}{1 + (f_{GHz}/f_2)^2} + \varepsilon_\infty + \frac{18 \sigma'_{eff} (\rho_s - \rho_b)}{f_{GHz} \rho_s m_v} \quad (65)$$

$$\varepsilon''_{fw} = \frac{(f_{GHz}/f_1)(\varepsilon_s - \varepsilon_1)}{1 + (f_{GHz}/f_1)^2} + \frac{(f_{GHz}/f_2)(\varepsilon_1 - \varepsilon_\infty)}{1 + (f_{GHz}/f_2)^2} + \frac{18 \sigma''_{eff} (\rho_s - \rho_b)}{f_{GHz} \rho_s m_v} \quad (66)$$

donde ε_s , ε_1 , ε_∞ , f_1 y f_2 se obtienen de las ecuaciones (8), (9), (10), (12) y (13) y σ'_{eff} y σ''_{eff} son:

$$\sigma'_{eff} = (f_{GHz}/1,35) \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{1 + (f_{GHz}/1,35)^2} \right) \quad (67)$$

$$\sigma''_{eff} = \sigma_2 + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{1 + (f_{GHz}/1,35)^2} \quad (68)$$

y

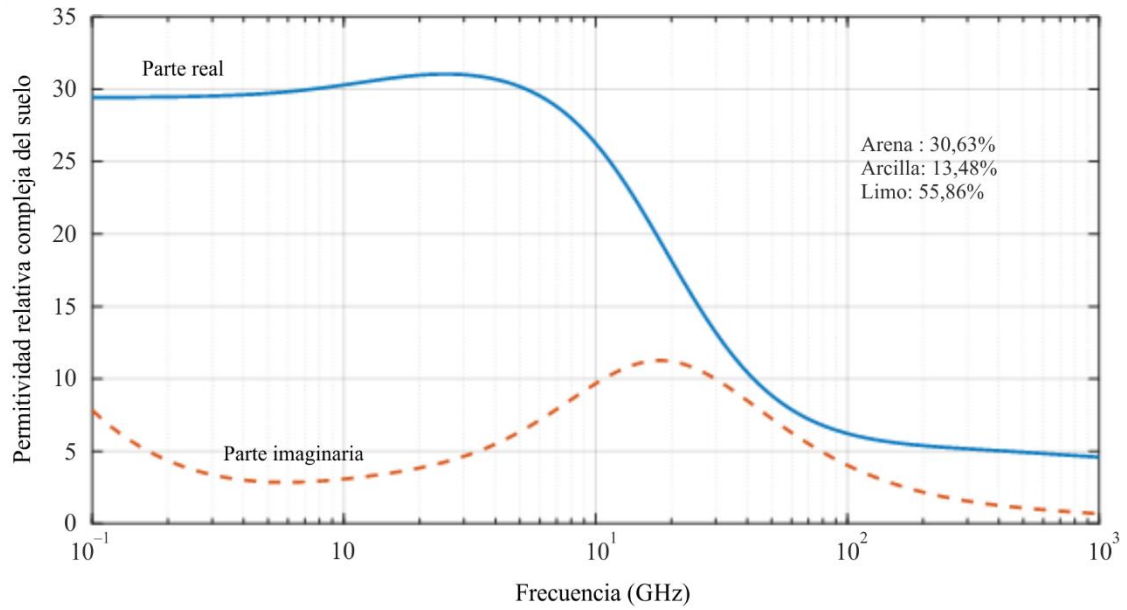
$$\sigma_1 = 0,0467 + 0,2204 \rho_b - 0,0041111 P_{sand} - 0,006614 P_{clay} \quad (69)$$

$$\sigma_2 = -1,645 + 1,939 \rho_b - 0,0225622 P_{sand} + 0,01594 P_{clay} \quad (70)$$

En las Figs. 14, 15 y 16 se muestra la permitividad relativa compleja de dos ejemplos de tipos de suelo. La composición del suelo en las Figs. 14 y 16 es idéntica, a excepción del contenido volumétrico de agua, lo que indica que tanto la parte real como la parte imaginaria de la permitividad relativa compleja están directamente relacionadas con el contenido volumétrico de agua.

FIGURA 14

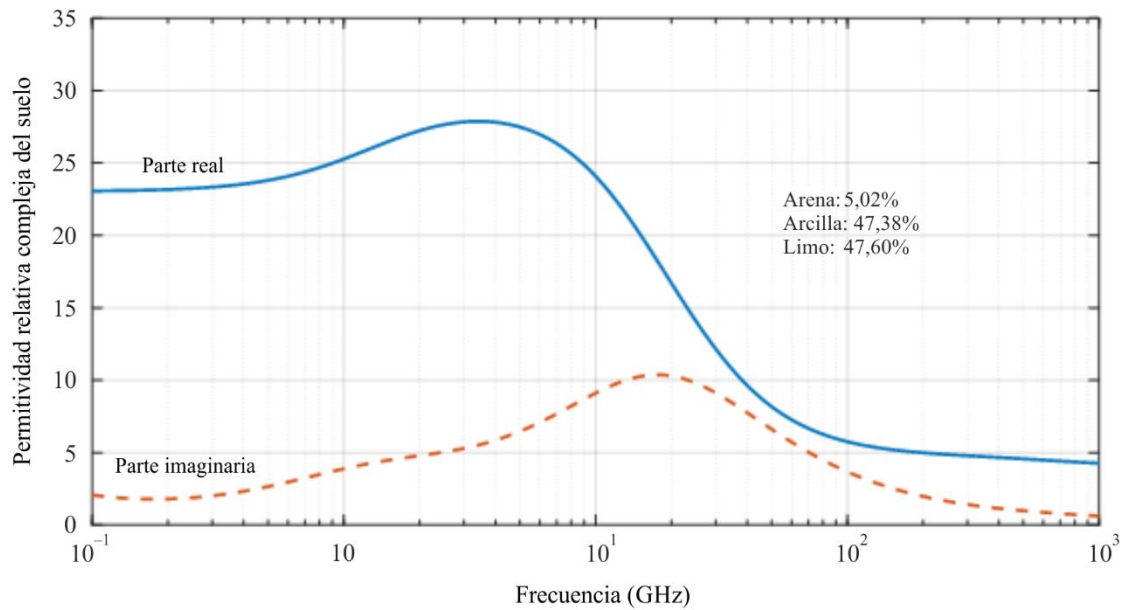
Permitividad relativa compleja del suelo franco limoso en función de la frecuencia
 ($m_v = 0,5$, $T = 23^\circ\text{C}$, $\rho_s = 2,59$, $\rho_b = 1,5750 \text{ g cm}^{-3}$)



P.0527-14

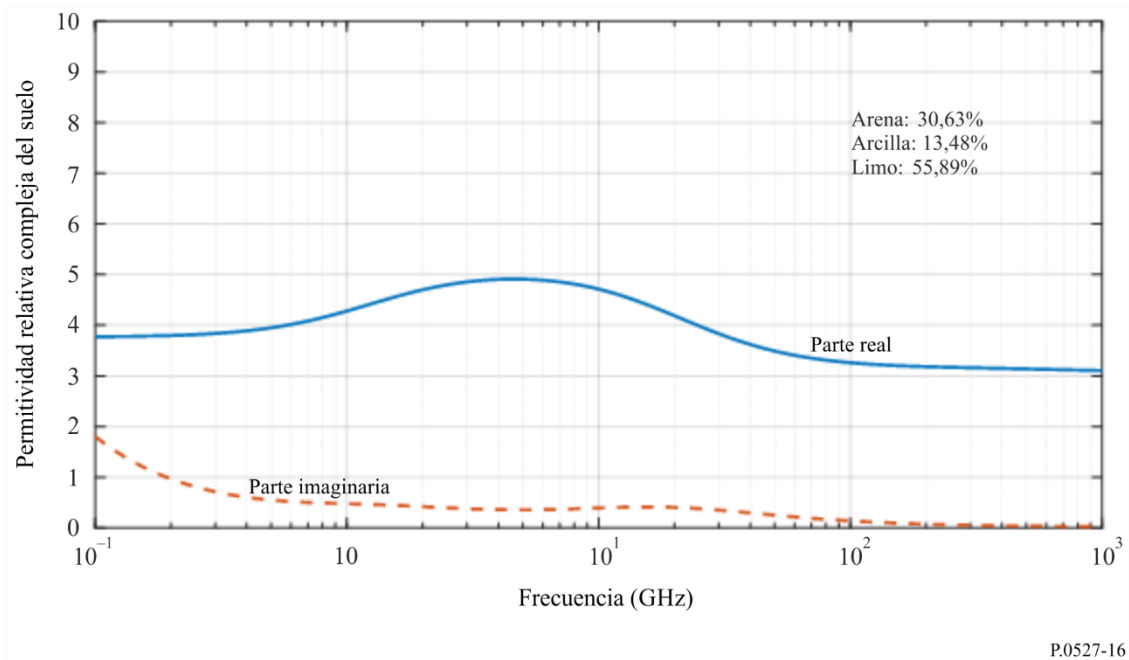
FIGURA 15

Permitividad relativa compleja del suelo limoso arcilloso en función de la frecuencia
 ($m_v = 0,5$, $T = 23^\circ\text{C}$, $\rho_s = 2,56$, $\rho_b = 1,4758 \text{ g cm}^{-3}$)



P.0527-15

FIGURA 16
Permitividad relativa compleja del suelo franco limoso en función de la frecuencia
 ($m_v = 0,07$, $T = 23^\circ\text{C}$, $\rho_s = 2,59$, $\rho_b = 1,5750 \text{ g cm}^{-3}$)



5.3 Vegetación

La permitividad relativa compleja de la vegetación es una función de la frecuencia, f_{GHz} (GHz), la temperatura, T ($^\circ\text{C}$), y el contenido gravimétrico de agua de la vegetación, M_g , que se define como:

$$M_g = \frac{M_{mv} - M_{dv}}{M_{mv}} \quad (71)$$

M_{mv} es el peso de la vegetación húmeda y M_{dv} el peso de la vegetación seca. M_g oscila entre 0,0 y 0,7.

Este método de predicción considera que la vegetación es una mezcla de vegetación global, agua libre salada, agua ligada y hielo (en su caso). La permitividad relativa compleja de esta mezcla viene dada por la siguiente ecuación:

$$\epsilon_v = \epsilon'_v - j \epsilon''_v \quad (72)$$

La parte real, ϵ'_v , y la parte imaginaria, ϵ''_v , de la permitividad relativa compleja de la vegetación se dan en el § 5.3.1 para temperaturas superiores al punto de congelación y en el § 5.3.2 para temperaturas inferiores al punto de congelación.

5.3.1 Temperaturas superiores al punto de congelación

A temperaturas superiores al punto de congelación ($T > 0^\circ\text{C}$), las partes real e imaginaria de la permitividad relativa compleja de la vegetación son:

$$\epsilon'_v = \epsilon_{dv} + v_{fw} \left[\epsilon_\infty + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_1)}{1 + \left(\frac{f_{\text{GHz}}}{f_1}\right)^2} + \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_\infty)}{1 + \left(\frac{f_{\text{GHz}}}{f_2}\right)^2} \right] + v_{bw} \left[2,9 + \frac{55[1 + \sqrt{(f_{\text{GHz}}/0,02f_1)}]}{1 + 2\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0,02f_1)} + (f_{\text{GHz}}/0,01f_1)} \right] \quad (73)$$

$$\epsilon_v'' = v_{fw} \left[\frac{(f_{GHz}/f_1)(\epsilon_s - \epsilon_1)}{1 + (f_{GHz}/f_1)^2} + \frac{(f_{GHz}/f_2)(\epsilon_1 - \epsilon_\infty)}{1 + (f_{GHz}/f_2)^2} + \frac{2,286}{f_{GHz}} \right] + v_{bw} \left[\frac{55\sqrt{(f_{GHz}/0,02f_1)}}{1 + 2\sqrt{(f_{GHz}/0,02f_1)} + (f_{GHz}/0,01f_1)} \right] \quad (74)$$

donde ϵ_{dv} es la parte real de la permitividad relativa de la vegetación global, v_{fw} es la fracción volumétrica del agua libre y v_{bw} es la fracción volumétrica del agua ligada:

$$\epsilon_{dv} = 1,7 - 0,74 M_g + 6,16 M_g^2 \quad (75)$$

$$v_{fw} = M_g(0,55 M_g - 0,076) \quad (76)$$

$$v_{bw} = 4,64 M_g^2 / (1 + 7,36 M_g^2) \quad (77)$$

ϵ_s , ϵ_1 , ϵ_∞ , f_1 y f_2 se obtienen de las ecuaciones (8), (9), (10), (12) y (13) respectivamente.

Las ecuaciones (73) y (74) son más generales que la ecuación (16) de la Recomendación UIT-R P.833, pues tienen en cuenta tanto el agua libre como el agua ligada e integran una dependencia de la temperatura.

En las Figs. 17 y 18 se muestran las partes real e imaginaria de la permitividad relativa compleja de la vegetación en función de la frecuencia con dos valores de contenido gravimétrico de agua diferentes, lo que demuestra que tanto la parte real como la parte imaginaria de la permitividad relativa compleja de la vegetación aumentan al aumentar el contenido gravimétrico de agua.

FIGURA 17
Permitividad relativa compleja de la vegetación en función de la frecuencia
($M_g = 0,68$, $T = 22^\circ\text{C}$)

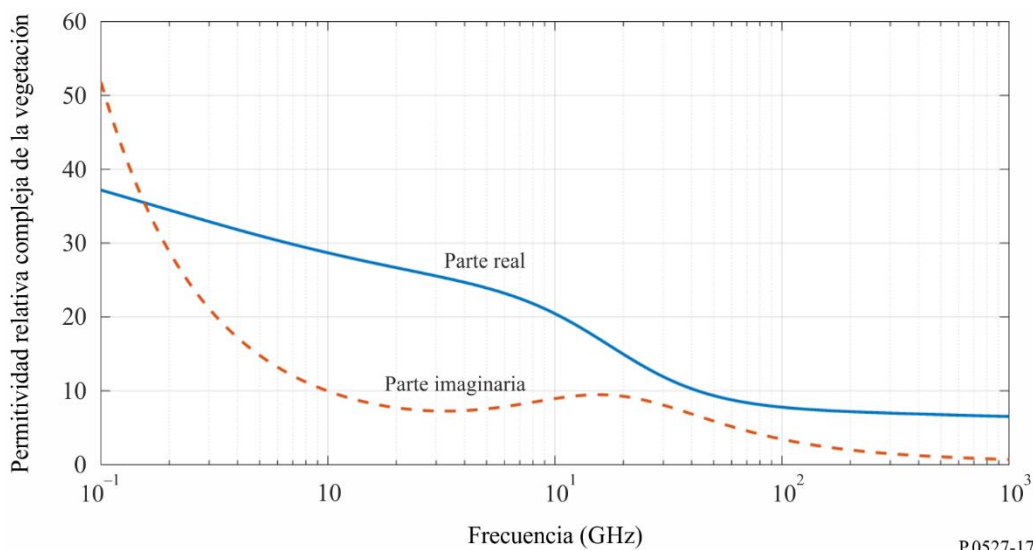
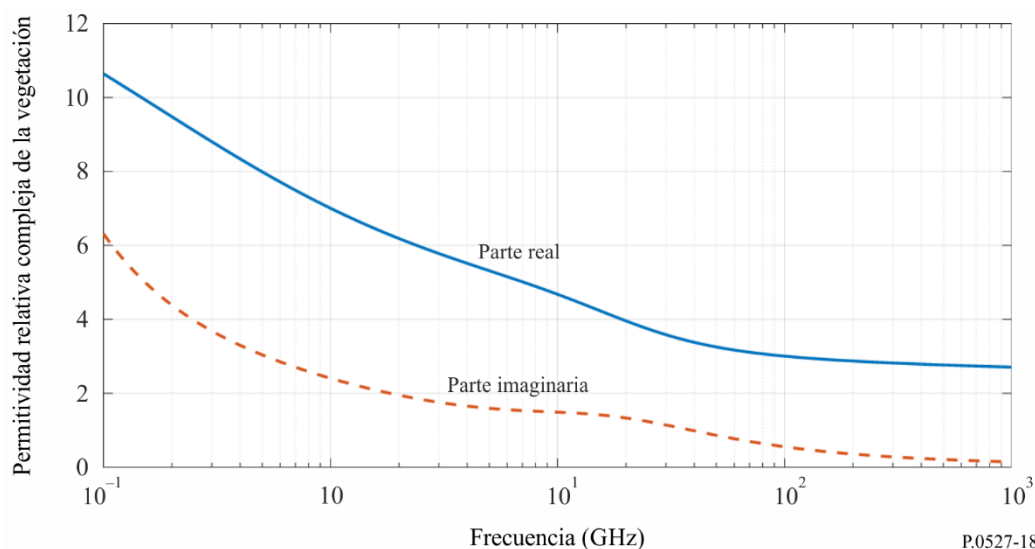


FIGURA 18
Permitividad relativa compleja de la vegetación en función de la frecuencia
($M_g = 0,26, T = 22^\circ\text{C}$)



5.3.2 Temperaturas inferiores al punto de congelación

A temperaturas inferiores del punto de congelación ($-20^\circ\text{C} \leq T < 0^\circ\text{C}$), las partes real e imaginaria de la permitividad relativa compleja son:

$$\epsilon'_v = \epsilon_{dv} + v_{fw} \left[4,9 + \frac{82,2}{1 + (f_{\text{GHz}}/9)^2} \right] + v_{bw} [8,092 + 14,2067 X1] + 3,15 v_{ice} \quad (78)$$

$$\epsilon''_v = v_{fw} \left[\frac{82,2(f_{\text{GHz}}/9)}{1 + (f_{\text{GHz}}/9)^2} + \frac{11,394}{f_{\text{GHz}}} \right] + 14,2067 v_{bw} Y1 \quad (79)$$

donde:

$$\epsilon_{dv} = 6,76 - 10,24 M_g + 6,19 M_g^2 \quad (80)$$

$$v_{fw} = (-0,106 + 0,6591 M_g - 0,610 M_g^2) \exp\left((0,06 + 0,6883 M_g + 0,0001 M_g^2) \Delta\right) \quad (81)$$

$$v_{bw} = (-0,16 + 1,1876 M_g - 0,387 M_g^2) \exp\left((0,721 - 1,2733 M_g + 0,8139 M_g^2) \Delta\right) \quad (82)$$

$$v_{ice} = A_{ice} \Delta^2 + B_{ice} \Delta + C_{ice} \quad (83)$$

$$A_{ice} = 0,001 - 0,012 M_g + 0,0082 M_g^2 \quad (84)$$

$$B_{ice} = 0,036 - 0,2389 M_g + 0,1435 M_g^2 \quad (85)$$

$$C_{ice} = -0,0538 + 0,4616 M_g - 0,3398 M_g^2 \quad (86)$$

$$X1 = \frac{1 + (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,2054} \cos(0,2054\pi/2)}{1 + 2 (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,2054} \cos(0,2054\pi/2) + (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,4108}} \quad (87)$$

$$Y1 = \frac{(f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,2054} \text{sen}(0,2054\pi/2)}{1 + 2 (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,2054} \cos(0,2054\pi/2) + (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,4108}} \quad (88)$$

$$\Delta = T - T_f \quad (89)$$

y la temperatura de congelación de la vegetación, T_f , es de $-6,5^\circ\text{C}$.

En las Figs. 19 y 20 se muestran las partes real e imaginaria de la permitividad relativa compleja en función de la frecuencia y la temperatura. Estas figuras muestran que al reducirse la temperatura por debajo del punto de congelación, se reducen las partes real e imaginaria de la permitividad relativa compleja de la vegetación, así como la dependencia de esos parámetros de la temperatura. Con frecuencias superiores a 20 GHz, la permitividad relativa compleja de la vegetación es menos dependiente de la temperatura.

FIGURA 19
Permitividad relativa compleja de la vegetación en función de la frecuencia
($M_g = 0,68$, $T = -7^\circ\text{C}$)

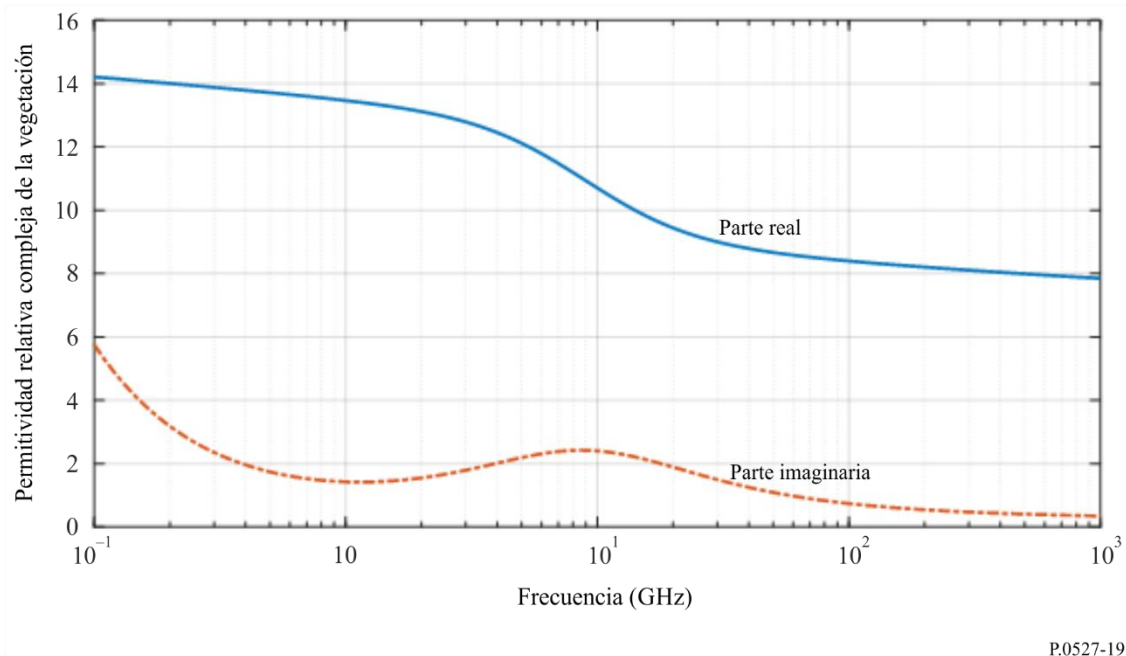
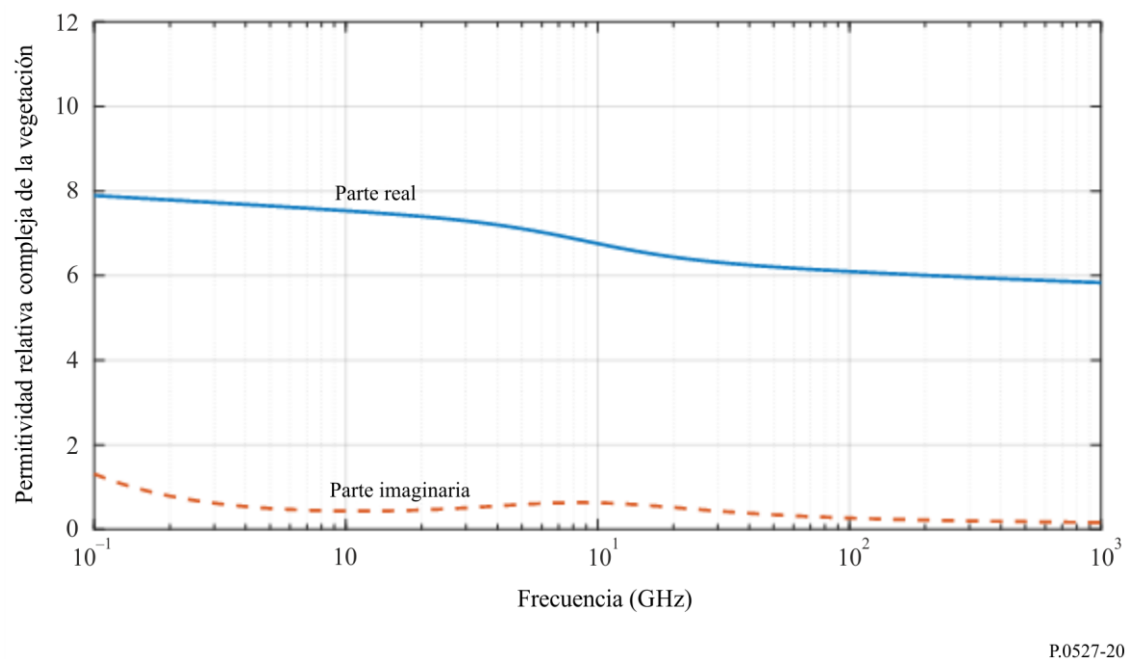


FIGURA 20
Permitividad relativa compleja de la vegetación en función de la frecuencia
($M_g = 0,68$, $T = -10^\circ\text{C}$)



6 Emisividad

La emisividad, ϵ , se define como la relación entre la energía radiada por una superficie material y la energía radiada por un cuerpo oscuro perfecto a las mismas temperatura, frecuencia y condiciones de observación. La emisividad y la reflectividad, ρ , a la misma frecuencia están relacionadas por la conservación de la energía, es decir, $\epsilon + \rho = 1$. La emisividad de una superficie está relacionada con su permitividad relativa compleja, ϵ , según las ecuaciones de Fresnel:

$$\epsilon = 1 - |r_p|^2, \quad p = v, h, c \quad (90)$$

donde:

$$r_v = \frac{\epsilon \cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\epsilon \cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}} \quad (91)$$

$$r_h = \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}} \quad (92)$$

$$r_c = \frac{r_v + r_h}{2} \quad (93)$$

El subíndice $p = h$ denota la componente de polarización horizontal, $p = v$ denota la componente de polarización vertical y $p = c$ denota la polarización circular. θ es el ángulo entre la onda incidente y la incidencia normal (es decir, que $\theta = 0^\circ$ para la incidencia normal). Para el caso especial de la incidencia normal,

$$r_v = \frac{\epsilon - \sqrt{\epsilon}}{\epsilon + \sqrt{\epsilon}} \quad (94)$$

$$r_h = \frac{1 - \sqrt{\epsilon}}{1 + \sqrt{\epsilon}} \quad (95)$$

en cuyo caso:

$$r_v = \frac{\epsilon - \sqrt{\epsilon}}{\epsilon + \sqrt{\epsilon}} = -\frac{\sqrt{\epsilon}}{\sqrt{\epsilon}} \frac{1 - \sqrt{\epsilon}}{1 + \sqrt{\epsilon}} = -\frac{1 - \sqrt{\epsilon}}{1 + \sqrt{\epsilon}} = -r_h \quad (96)$$

entonces, $r_c = 0$ y $\epsilon = 1$.

Para una incidencia normal y componentes de polarización vertical y horizontal, la emisividad del agua de mar con una superficie oceánica lisa, plana y especular correspondiente a las condiciones de la Figura 2 (es decir, $T = 20^\circ\text{C}$ y $S = 35$ ppt) se muestra en la Fig. 21. En la Fig. 22 se muestra la emisividad de un suelo limoso arcilloso conforme a las condiciones de la Fig. 15 (a saber, $P_{Sand} = 5,02\%$, $P_{Clay} = 47,38\%$, $P_{Silt} = 47,60\%$, $m_v = 0,5$, $T = 23^\circ\text{C}$, $\rho_s = 2,56$, $\rho_b = 1,4758 \text{ g/cm}^3$). Y la emisividad de una vegetación conforme a las condiciones de la Fig. 18 (a saber, $T = 22^\circ\text{C}$, $M_g = 0,26$) puede verse en la Fig. 23.

FIGURA 21

Emisividad del agua de mar con una superficie marina lisa perfecta
($T = 20^{\circ}\text{C}$ y $S = 35$ ppt)

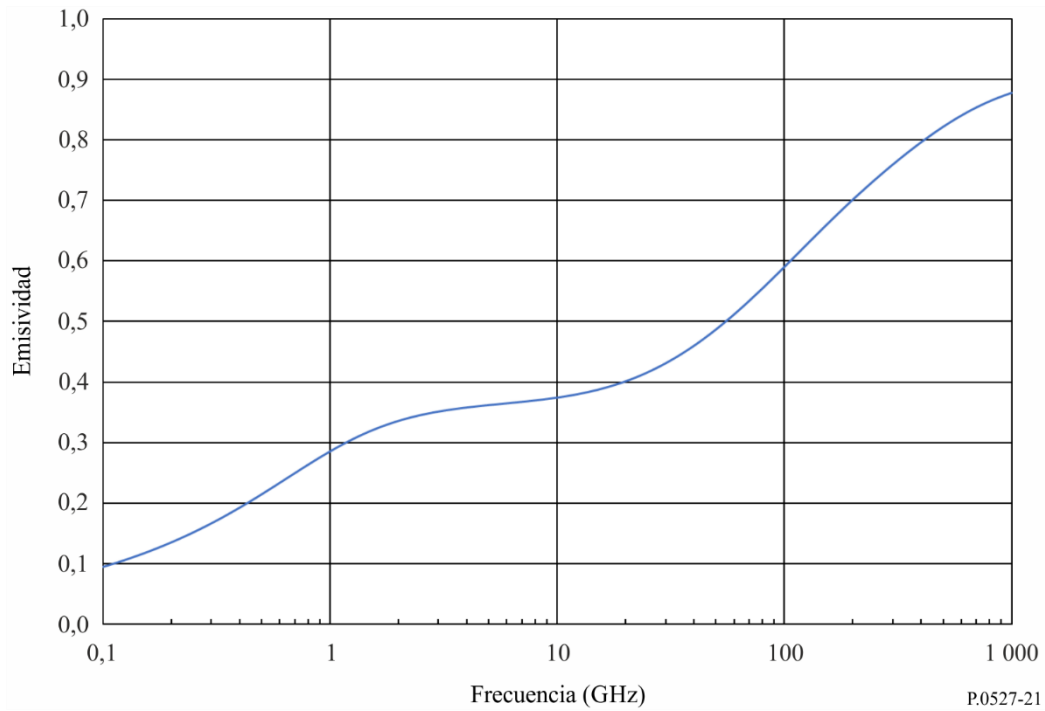


FIGURA 22

Emisividad de un suelo limoso arcilloso
($m_v = 0,5$, $T = 23^{\circ}\text{C}$, $\rho_s = 2,56$, $\rho_b = 1,4758$ g/cm³)

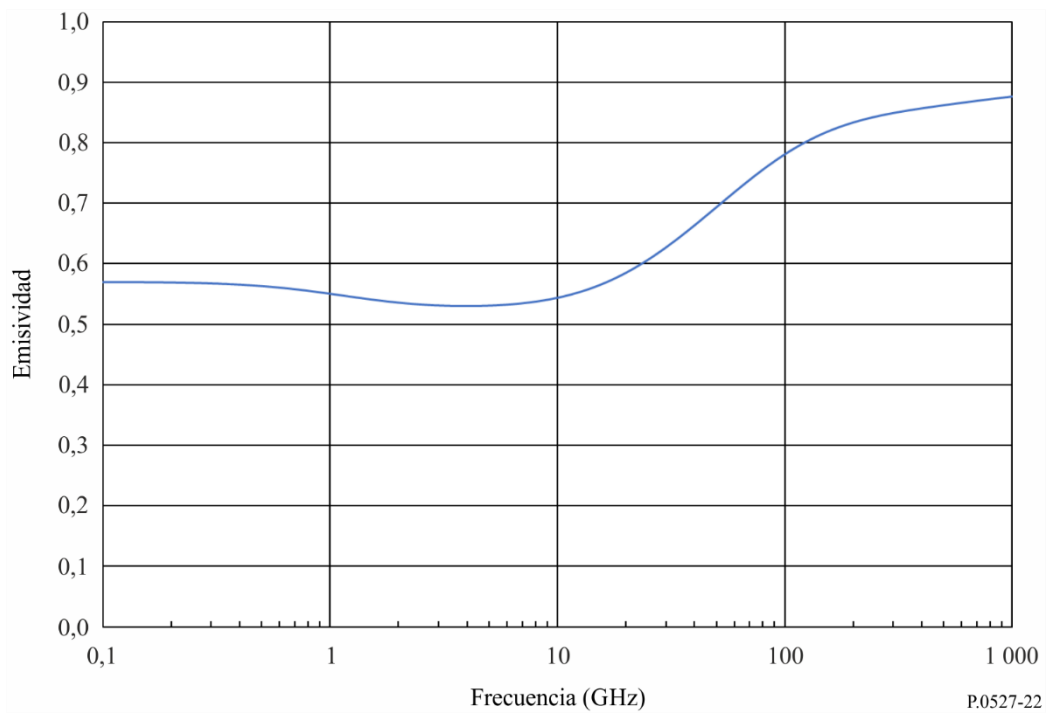
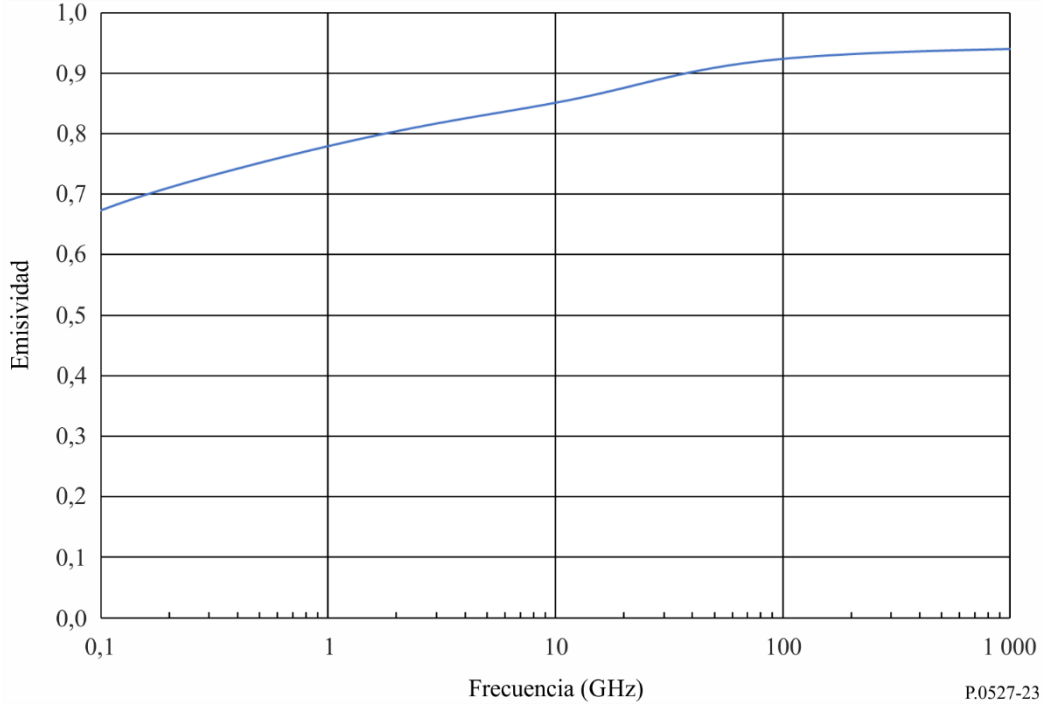


FIGURA 23

Emisividad de vegetación
($M_g = 0,26$, $T = 22^\circ\text{C}$)



7 Emisividad isotrópica del océano

La emisividad isotrópica del océano, ϵ_{ocean} , es una función de la polarización, la frecuencia, el ángulo de incidencia, la velocidad del viento, la temperatura y la salinidad y puede estimarse adecuadamente de la siguiente manera:

$$\epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta, W, T, S) = \epsilon_{ocean,0}(p, f_{GHz}, \theta, T, S) + \Delta\epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta, W, T, S)$$

siendo $\epsilon_{ocean,0}(p, f_{GHz}, \theta, T, S)$ la emisividad, ϵ , de §6 utilizando la permitividad compleja del agua de mar, ϵ_{sw} , del § 5.1.2; y $\Delta\epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta, W, T, S)$ la emisividad isotrópica incremental como función de la velocidad del viento. Los parámetros son:

p : polarización (v = vertical; h = horizontal)

f_{GHz} : frecuencia (GHz)

θ : ángulo de incidencia

W : velocidad del viento (m/s)

T : temperatura de la superficie oceánica ($^\circ\text{C}$)

S : salinidad (ppt)

y

$$\Delta\epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta, W, T, S) = \hat{\Delta}\epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta_{ref}, W, T, S) \left(\frac{\theta}{\theta_{ref}}\right)^{x_p} + \frac{1}{2} [\hat{\Delta}\epsilon_{ocean}(v, f_{GHz}, \theta_{ref}, W, T, S) + \hat{\Delta}\epsilon_{ocean}(h, f_{GHz}, \theta_{ref}, W, T, S)] \times \left[1 - \left(\frac{\theta}{\theta_{ref}}\right)^{x_p}\right] \quad (97)$$

donde $x_v = 4,0$, $x_h = 1,5$,

$$\hat{\Delta}\epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta_{ref}, W, T, S) = \delta_{ref}(p, f_{GHz}, W) \frac{\epsilon_{ocean,0}(p, f_{GHz}, \theta_{ref}, T, S)}{\epsilon_{ocean,0}(p, f_{GHz}, \theta_{ref}, T_{ref}, S)} \quad (98)$$

donde $\theta_{ref} = 55,2^\circ$, $T_{ref} = 20^\circ \text{ C}$,

$$\delta_{ref}(p, f_{GHz}, W) = \sum_{k=1}^5 \delta_k(p, f_{GHz}) W^k \quad (99)$$

y los coeficientes $\delta_k(p, f_{GHz})$ son los del Cuadro 3.

Este modelo es válido entre 6,8 y 85,5 GHz y para ángulos de incidencia con la Tierra entre 0 y 65 grados (es decir, ángulos de elevación entre 25 y 90 grados). Cuando la velocidad del viento es superior a 20 m/s (es decir, 72 km/h), la emisividad debe calcularse extrapolando linealmente la emisividad con una velocidad de viento de 20 m/s. La emisividad a las frecuencias comprendidas entre las enumeradas en el Cuadro 3 puede calcularse interpolando linealmente la emisividad a las frecuencias indicadas en el Cuadro 3.

CUADRO 3
Coeficientes $\delta_k(p, f_{GHz})$

f_{GHz} (GHz)	p	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5
6,8	v	4,96726E-05	-3,03363E-04	5,60506E-05	-2,86408E-06	4,88803E-08
6,8	h	3,85750E-03	-5,10844E-04	4,89469E-05	-1,50552E-06	1,20306E-08
10,7	v	-2,35464E-04	-2,76866E-04	5,73583E-05	-2,94364E-06	4,89421E-08
10,7	h	4,17650E-03	-6,20751E-04	6,82607E-05	-2,47982E-06	2,80155E-08
18,7	v	3,26502E-05	-3,65935E-04	6,62807E-05	-3,40705E-06	5,81231E-08
18,7	h	5,06330E-03	-7,41324E-04	8,54446E-05	-3,28225E-06	4,01950E-08
37,0	v	-7,03594E-04	-2,17673E-04	4,00659E-05	-1,84769E-06	2,76830E-08
37,0	h	5,63832E-03	-8,43744E-04	1,06734E-04	-4,61253E-06	6,67315E-08
85,5	v	-3,14175E-03	4,06967E-04	-3,33273E-05	1,26520E-06	-1,67503E-08
85,5	h	6,01311E-03	-7,00158E-04	1,26075E-04	-7,27339E-06	1,35737E-07

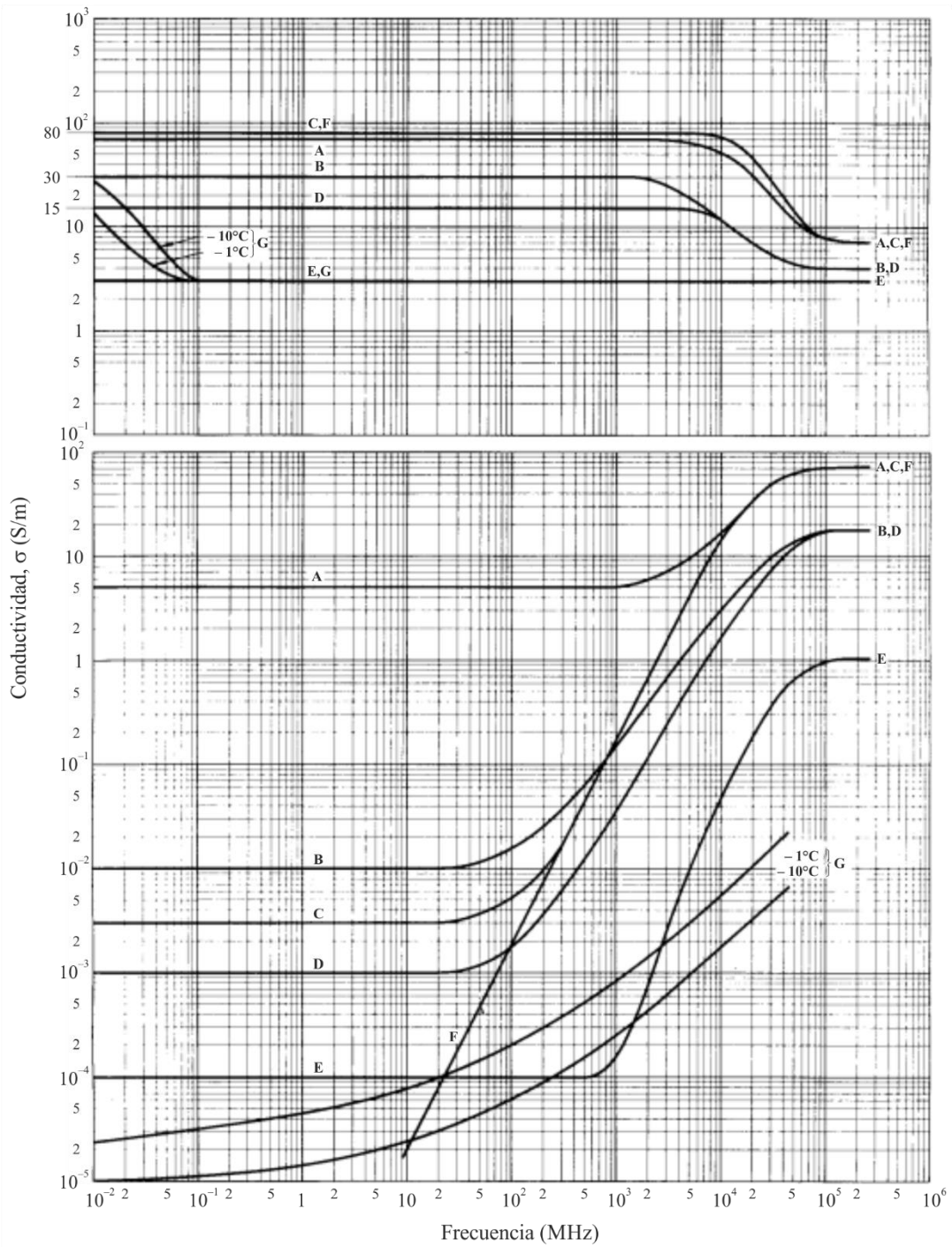
Adjunto del Anexo 1

Propiedades eléctricas expresadas como permitividad y conductividad según se utilizan en las Recomendaciones UIT-R P.368 y UIT-R P.832

1 Introducción

En la siguiente Fig. 24, reproducida de la Fig. 1 de la Recomendación UIT-R P.527-3, se muestran los valores típicos de conductividad y permitividad de distintos tipos de suelo en función de la frecuencia. Estos gráficos pertenecen a anteriores revisiones de esta Recomendación, pero se conservan para facilitar la utilización de las Recomendaciones UIT-R P.368 y UIT-R P.832.

FIGURA 24
Permitividad relativa, ϵ_r , y conductividad, σ , en función de la frecuencia



- A: agua salada (salinidad media), 20°C
- B: suelo húmedo
- C: agua dulce, 20°C
- D: suelo moderadamente seco
- E: suelo muy seco
- F: agua pura, 20°C
- G: hielo (agua dulce)