

Índice de refracción troposférica. Refractividad. Gradiente vertical de la refractividad troposférica

Por Lalo LU9JX

Las ondas electromagnéticas en el vacío tienen la velocidad de la luz. En la atmósfera, su velocidad es algo menor, en una pequeña cantidad, debido a que el aire no es muy denso. El valor típico del índice de refracción en la cercanía de la superficie terrestre es de 1,000325. Como es un valor muy cercano a 1, se toman solamente los 3 últimos dígitos, resultando en una refractividad de 325 *unidades N*.

Cuando una onda encuentra un cambio en la refractividad, cambia su dirección. Como las ondas de radio se mueven a través de las capas de la atmósfera, nos interesa saber cómo cambia la refractividad a medida que se asciende en ella. El gradiente vertical de refractividad (esto es, cuánto cambia con la altura) en una

atmósfera estándar, es de $-0,039 \frac{\text{unidades N}}{\text{metro}} = -39 \frac{\text{unidades N}}{\text{kilómetro}}$. Como

consecuencia, las ondas de radio sufren cierta desviación. Pero, cuando por diversas razones dependientes de fenómenos meteorológicos, esa refractividad es de

$-0,157 \frac{\text{unidades N}}{\text{metro}} = -157 \frac{\text{unidades N}}{\text{kilómetro}}$, las ondas siguen la curvatura terrestre. Es lo que se conoce como formación de conductos (“ducting”, en inglés).

Por modelos físicos, se calcula la refractividad a partir de algunos parámetros de la atmósfera con:

$$N \text{ refractividad (en unidades N): } N = \frac{77,6 \cdot p}{T} + \frac{3730005 \cdot e}{T^2}$$

donde:

p presión (en hPa o mb)

e la presión parcial de vapor de agua, calculada con:

$$e = T_D^{-4,9283} \cdot 10^{23,5518 - \left(\frac{2937,4}{T_D} \right)} \quad (\text{en hPa o mb})$$

T temperatura (en kelvin [K]) (se obtiene sumándole 273 a la T en °C)

T_D temperatura del punto de rocío (en kelvin [K]) (se obtiene sumándole 273 a la T_D en °C)

h altura (en m)

Con los valores de la refractividad en altura se calcula:

$\frac{dN}{dh}$ gradiente vertical de la refractividad (en unidades N por metro o en unidades N por kilómetro)

Un gradiente de $-0,157 \frac{\text{unidades N}}{\text{metro}} = -157 \frac{\text{unidades N}}{\text{kilómetro}}$ o una mayor variación indica aparición de ductos.

Referencias:

- Bean B.R., Dutton E. J. (1966), "Radio Meteorology", Monograph 92, National Bureau of Standards, Washington, EE. UU.
- Biddulph, Dick G8DPS (editor)(1997), , "VHF/UHF Handbook", Radio Society of Great Britain, Londres, Reino Unido.
- Pocock, Emil W3EP (1997), "The ARRL UHF/Microwave Experimenter's Manual", capítulo 3, The American Radio Relay League, Newington CT, EE. UU.

A continuación planillas de cálculo que utilizan los datos de radiosondeos reales, para obtener el gradiente vertical de refractividad (se suprimieron datos a partir de cierta altura, por no ser relevantes como ejemplos):

87155 SARE Resistencia Aero (LU-G) 12Z 01 Jun 2021								
p Presión (hPa)	h Altura (m)	T Tempera- tura (°C)	Td Punto de rocío (°C)	Tempe- ratura T (en K)	Punto de rocío (K)	Presión parcial de vapor e (en hPa)	Índice de Refracción N (unidades)	dN/dh Gradiente de Refracción (Unid.N/m)
1009	52	9,6	6,5	282,6	279,5	9,679	322,3	
1004	93	10,6	6,4	283,6	279,4	9,612	319,3	-0,072
1002	109	11,9	6,3	284,9	279,3	9,546	316,8	-0,157
1000	126	13,2	6,2	286,2	279,2	9,480	314,3	-0,146
992	194	17,3	5	290,3	278	8,722	303,8	-0,155
991	203	17,8	4,8	290,8	277,8	8,601	302,4	-0,154
981	289	18,8	0,8	291,8	273,8	6,473	289,2	-0,153
970	386	18,7	0,7	291,7	273,7	6,427	286,2	-0,031
952	546	18,6	0,6	291,6	273,6	6,380	281,3	-0,031
943	628	17,9	1,6	290,9	274,6	6,857	281,8	0,005
925	792	16,6	3,6	289,6	276,6	7,906	283,0	0,008
923	810	16,6	2	289,6	275	7,056	278,7	-0,240
901	1016	17,2	-15,8	290,2	257,2	1,789	248,9	-0,145
899	1035	17,1	-13,9	290,1	259,1	2,092	249,7	0,047
893	1092	17	-8	290	265	3,348	253,8	0,071
863	1382	14	4	287	277	8,132	270,2	0,056
857	1441	13,4	6,4	286,4	279,4	9,612	275,9	0,097
850	1510	13	6	286	279	9,350	273,3	-0,038
835	1659	12	4	285	277	8,132	264,7	-0,058
833	1680	12,1	2,9	285,1	275,9	7,524	261,3	-0,164
815	1863	13,1	-6,9	286,1	266,1	3,645	237,7	-0,129
802	1998	13,8	-14,2	286,8	258,8	2,041	226,3	-0,085
748	2581	11,4	-19,4	284,4	253,6	1,320	210,2	-0,028

83937 SBSM Santa Maria (PY3) 12Z 01 Jun 2021

p Presión (hPa)	h Altura (m)	T Tempera- tura (°C)	Td Punto de rocío (°C)	Tempe- ratura T (en K)	Punto de rocío (K)	Presión parcial de vapor e (en hPa)	Índice de Refracción N (unidades)	dN/dh Gradiente de Refracción (Unid.N/m)
1007	85	7,2	7,1	280,2	280,1	10,086	326,8	
1000	145	10,4	5,4	283,4	278,4	8,969	315,5	-0,189
993	204	13,8	2,8	286,8	275,8	7,470	302,6	-0,219
987	255	16,2	0,2	289,2	273,2	6,198	292,5	-0,198
972	385	17,4	-4,6	290,4	268,4	4,344	279,0	-0,104
944	634	16,2	-6,8	289,2	266,2	3,674	269,7	-0,037
925	806	15,8	-4	288,8	269	4,545	268,9	-0,005
915	898	14,4	-2	287,4	271	5,276	270,9	0,022
879	1236	12,2	5,2	285,2	278,2	8,845	279,7	0,026
858	1439	12,4	-2,6	285,4	270,4	5,046	256,4	-0,115
850	1517	11,8	-3,2	284,8	269,8	4,826	253,8	-0,033
804	1980	9,4	-0,6	282,4	272,4	5,847	248,3	-0,012
766	2376	7	-2	280	271	5,276	237,4	-0,027
729	2782	4,5	-3,4	277,5	269,6	4,754	226,9	-0,026

85586 SCSN Santo Domingo (CE3) 12Z 01 Jun 2021

p Presión (hPa)	h Altura (m)	T Tempera- tura (°C)	Td Punto de rocío (°C)	Tempe- ratura T (en K)	Punto de rocío (K)	Presión parcial de vapor e (en hPa)	Índice de Refracción N (unidades)	dN/dh Gradiente de Refracción (Unid.N/m)
1011	75	11,6	11,6	284,6	284,6	13,660	338,6	
1006	118	13,2	12,2	286,2	285,2	14,212	337,5	-0,025
1000	169	13,2	12	286,2	285	14,026	335,0	-0,049
978	358	15	12,2	288	285,2	14,212	327,4	-0,040
932	766	13,6	10,2	286,6	283,2	12,444	308,9	-0,046
931	775	13,6	10	286,6	283	12,279	307,8	-0,114
925	830	13,6	10,2	286,6	283,2	12,444	307,0	-0,016
904	1024	17	-13	290	260	2,251	251,9	-0,284
887	1185	16	-15,6	289	257,4	1,819	246,3	-0,035
873	1320	15,2	-17,8	288,2	255,2	1,513	241,9	-0,033
850	1545	14	-9	287	264	3,097	243,8	0,009
836	1685	13,6	-11,4	286,6	261,6	2,561	238,0	-0,042
831	1735	13	4	286	277	8,132	262,6	0,491
825	1796	12,2	6,2	285,2	279,2	9,480	267,9	0,088
817	1878	12	4	285	277	8,132	259,8	-0,099
809	1961	11,8	1,8	284,8	274,8	6,956	252,4	-0,089