



Estudio preliminar de los conductos troposféricos en el mar al norte de Cuba

José R. Sandianes Galvez, Lányer Pérez Garlobo

RESUMEN / ABSTRACT

La troposfera es una capa de la atmósfera de refractividad variable en el tiempo, con la altura y con la geografía por el cambio de sus parámetros meteorológicos: temperatura, humedad y presión atmosférica. En determinadas condiciones, una fuerte refracción de los rayos puede provocar que se forme un conducto (duct, en inglés), o guía de onda troposférica, similar a una guía de onda por reflexión en sus paredes. Su importancia radica en que, a través de estos conductos, pueden llegar, desde grandes distancias, señales interferentes de gran permanencia o intensidad, a los receptores de radiocomunicaciones o de radar. El proceso puede repetirse en diferentes días, horas del día o meses del año. Es evidente que su concurrencia o repetitividad requiere de un análisis que, por su naturaleza, tiene un carácter estadístico. Lo mismo sucede con la predicción de la altura a que ocurre el conducto, su ancho y su profundidad. De este modo, el objetivo principal del trabajo ha consistido en, a partir de las mediciones existentes de los parámetros meteorológicos, determinar los valores estadísticos de concurrencia y los parámetros de los conductos hasta una altura de 2 km. Los datos se han obtenido para intervalos de tiempo: semanales, mensuales y anuales, inicialmente en los años 2016 - 2020. Los resultados se han comparado con los pocos obtenidos por otras fuentes e investigaciones, sobre tierra. Las estadísticas obtenidas han sido consideradas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones como contribuciones de Cuba.

Palabras claves: troposfera, gradiente del coíndice de refracción, conductos troposféricos, interferencias

The troposphere is a layer of the atmosphere whose refractivity varies over time, with altitude, and with geography due to changes in its meteorological parameters: temperature, humidity, and atmospheric pressure. Under certain conditions, strong refraction of rays can cause the formation of a duct, or tropospheric waveguide, similar to a waveguide with reflection in walls. Its importance lies in the fact that, through these ducts, interfering signals of great permanence or intensity can reach radio or radar receivers from great distances. The process can be repeated on different days, times of day, or months of the year. It is evident that its occurrence or repetition requires an analysis that, by its nature, is statistical. The same is true for predicting the height at which the duct occurs, its width, and depth. Thus, the main objective of this work was to determine, based on existing measurements of meteorological parameters, the statistical values of concurrency and the parameters of the ducts up to a height of 2 km. Data were obtained for weekly, monthly, and annual time intervals, initially from 2016 to 2020. The results were compared with the limited data obtained from other sources and research on land. The statistics obtained have been considered by the International Telecommunication Union as contributions from Cuba.

Keywords: troposphere, gradient of refraction coindex, tropospheric ducts, interference.

Preliminary study of tropospheric ducts over the sea north of Cuba

1. -INTRODUCCIÓN

En una publicación anterior a esta se enfatiza la importancia de la determinación del campo de las ondas de señales útiles, o de las interferencias, en diferentes servicios de radio como: el móvil terrestre (SMT), radio enlaces (ERL), y en los radares, en un entorno electromagnético que no siempre es el espacio libre (EL) [1]. Como se expresa, tal tarea requiere conocer el comportamiento de la troposfera en presencia de la refracción y, sobre todo, la influencia que el gradiente de refractividad manifiesta en dichas señales. Como es conocido, de la teoría de la propagación de las ondas de radio en la troposfera [2-4], el rayo, que es el que indica el trayecto de dichas ondas, se curva en el espacio por refracción. Esta se debe al dieléctrico ϵ_t

formado por la mezcla del aire seco y el vapor de agua, y el continuo cambio de su índice de refracción n_t con la altura. El objeto de estudio de este trabajo es la ocurrencia de conductos -o guías de ondas- en la troposfera debido a la refracción cuando alcanza un cierto nivel límite del gradiente ΔN , siendo N el coíndice N de refracción, a determinada altura sobre el terreno (o sobre el mar). Al igual que N , ΔN depende fuertemente de los parámetros meteorológicos locales. Estos son: la presión atmosférica p (en hectoPascuales, hPa); la temperatura T , en $^{\circ}\text{K}$ y la humedad absoluta e , en g/m^3 . Estos parámetros presentan variaciones regulares y aleatorias [1] que cumplen un carácter estadístico. Las regulares se deben a los cambios con: la altura, la estación del año y la región geográfica (condiciones locales), y los aleatorios en periodos temporales (diarios, semanales, estacionales o anuales). Para considerar adecuadamente esos cambios en los conductos se necesitan las estadísticas de N y ΔN con la altura (dN/dh), durante el mayor lapso de tiempo posible.

En Cuba se han caracterizado los conductos troposféricos (CT) sobre tierra, pero muy poco sobre el mar [5]. Sin embargo, señales anómalas, o de interferencia, llegan a nuestras costas regularmente, lo que depende de factores meteorológicos y refractivos (conductos troposféricos, superrefracción). Es necesario caracterizar estos fenómenos sobre el mar con estadísticas de N y ΔN [1-7]. Para ello se cuenta con los datos meteorológicos de: T , e , p , publicados [8], durante muchos años. Con los mismos es factible obtener las características temporales y espaciales de ΔN , y a partir de estas, la concurrencia o aparición de los (CT) y de sus parámetros. Se obtiene así una solución a un problema científico a partir del procesamiento de múltiples mediciones. La base de cálculo son los gradientes de: temperatura, presión y humedad (véase la expresión 3.16 de [2]), en periodos: anuales, mensuales u otros.

El objetivo principal del trabajo cuenta con dos aspectos. El primero, a partir de las mediciones de los parámetros meteorológicos a mano, estructurar los procedimientos. El segundo, con los valores estadísticos de ΔN definir el comportamiento de las estadísticas temporales de los CT y sus parámetros. Necesariamente, el segundo aspecto requiere de los resultados estadísticos de ΔN y para poder definir las de los CT, aunque de inicio solo sea para cinco años. Los procedimientos se han instrumentado en Matlab. Algunos de los valores anuales y mensuales obtenidos se diferencian de los publicados por instituciones de renombre, como la (UIT), en sus reportes y recomendaciones. En el Seminario Regional América de la UIT, en Mayo de 2023, se ha manifestado la necesidad de mejorar la data obtenida para la región (Caribe) y fue solicitada una contribución de Cuba [9,10].

Como principales aportes logrados se tienen: la elaboración de los procedimientos; la complementación y ampliación de los resultados, -de poca publicación (para el Caribe) [11]-, sobre el mar respecto a la aparición (concurrencia) de los “ductos” y sus parámetros. El trabajo forma parte de un proyecto científico -concluido en 2023- y denominado: Sistema para la predicción alerta de interrupción a las comunicaciones por anomalías en las condiciones de propagación, incluido en un programa Sectorial del Ministerio de Comunicaciones expuesto en el Seminario de la UIT mencionado y otros eventos [12].

2. -FORMULACIONES TEÓRICAS Y CONCEPTOS BÁSICOS

Las Recomendaciones P-453 y P-452 de la UIT [13,14], describen los *modos de propagación a largo plazo* y los *modos anómalos* (a corto plazo)) -ver Fig. 1-. De los últimos, la propagación por “conductos”, y por refracción en capas elevadas, son los más importantes ya que las señales pueden propagarse a grandes distancias transhorizonte sobre el mar y causar interferencias al arribar a zonas costeras. Como siempre se necesita conocer previamente la magnitud del gradiente ΔN .

2.1 La troposfera y sus principales parámetros eléctricos

La troposfera es la capa inferior de la atmósfera hasta los primeros 10 km de altitud [1], en promedio. En ella ocurren fenómenos como: la dispersión, la reflexión y la absorción, sobre todo en las ondas ultracortas. La refracción se conoce la dependencia del índice n_t con la altura h o de su coíndice N . Con ($h = 0$), en una atmósfera definida como normalizada [2], con características específicas de: temperatura, 20°C ; presión, 1013 hPa, y humedad relativa del 60 %, se obtiene: $n_t = 1.000325$. Es más conveniente trabajar con el coíndice N , según (1) dado por [2,13]. En la atmósfera normalizada $N = 325$.

$$N = (n_t - 1) \cdot 10^6 \quad \text{Unidades N} \quad (1)$$

Según los parámetros meteorológicos N se obtiene, también por [2,13]:

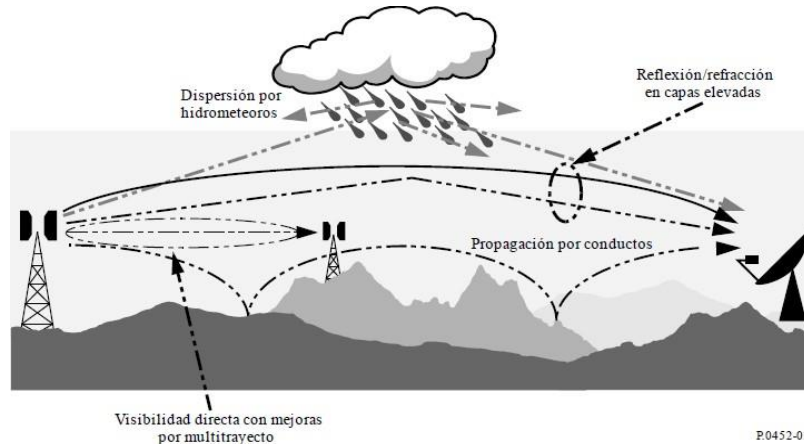


Figura 1
Modos de propagación anómala de las interferencias de corta duración [14].

$$N = \frac{77.6}{T} (p + 4810 \frac{e}{T}) \quad \text{Unidades N} \quad (2)$$

donde, p y T , ya están definidos, y e : presión absoluta del vapor de agua, hPa.

Referida a la altura h , el valor promedio de N sobre la superficie es (N_s) y N_0 es el valor promedio del coíndice al nivel del mar ($h = 0$), el que se determina por:

$$N_s = N_0 \cdot \exp(-\frac{h_s}{h_o}) \quad (3)$$

donde – h_s : altura de la superficie sobre el mar en km
– h_o : factor de escala de alturas (km).

N_s puede ser determinado estadísticamente para cada altura por la ley exponencial (3) como $N(h)$, en unidades N (U/N) y para cada localización. Como referencia, se toman los valores medios: $N_0 = 315$ y $h_o = 7.35 \text{ km}$ [13]. Para Cuba, N_0 y h_o son otros [5]. En la atmósfera normalizada, N_s es de 325 U/N, pero, para $h < 2 \text{ km}$ se aproxima por una ley lineal [1, 13]:

$$(h) = N_s(1 - 0.136 h) \quad (\text{U/N}) \quad (4)$$

La expresión (4) se destaca por su utilidad para hallar ΔN en las capas inferiores de la troposfera. Así, en el primer kilómetro de la atmósfera, se describe ΔN como $\Delta N1$ y se halla por [1, 4, 13]:

$$\Delta N1 = (N_s - N1) \quad \text{U/km} \quad (5)$$

donde $N1$ es coíndice a la altura de 1 km. En los primeros 100 m (con frecuencia se toma 65 m) por ΔN_{100} y

$$\Delta N_{100} = \frac{dN_s - dN1}{100} \quad \text{U/m.} \quad (6)$$

Los conductos suelen describirse en algunas aplicaciones en función del índice de *refracción modificado* M [13]:

$$(h) = N(h) + 157h \quad (\text{Unidades M}) \quad (7)$$

donde: h (km) es la altura. Su gradiente se mide por:

$$\Delta M(h) = \Delta N(h) + 157 \quad (\text{Unidades M/km}) \quad (8)$$

2.2 Clasificación de las atmósferas refractivas en la troposfera[13]

El rayo de las ondas experimenta una curvatura de radio ρ , -ver expresión (9)-. Como N varía principalmente con h , la curvatura del rayo se debe solo a ΔN , y se considera contenida en el plano vertical. Aquí ΔN en U/m [1-5]:

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{dnt}{dh} = -\frac{dN}{dh} \cdot 10^{-6} = -\Delta N \cdot 10^{-6} \quad (9)$$

donde: $\frac{dnt}{dh}$ es el gradiente vertical del índice de refracción y, $\frac{dN}{dh} = \Delta N$ el de su coindice,
 h : Altitud del punto por encima de la superficie terrestre en m.

Para introducir el efecto de ρ en las expresiones del campo de interferencia (CI), en vez de a , se aplica a_e , su *radio ficticio* [1-5,14]. Al considerar la variación lineal de N ($h < 2$ km) y la expresión (9), se obtiene:

$$a_e = k_e a = \frac{a}{1 - \frac{a}{\rho}} = \frac{a}{a + \alpha \Delta N \cdot 10^{-6}} \quad (10)$$

En (10), del denominador se obtiene k_e , que es su valor mediano (k_{e50}) [1,14]. Al expresar a en kilómetros (a medio, 6370 km) y ΔN en (U/km), se obtiene la expresión (11) de k_e , válida solo si ΔN se expresa en (U/km) [3, 4, 14-15]:

$$k_e = \frac{157}{157 + \Delta N} \quad (11)$$

Las condiciones meteorológicas difieren y la refracción puede subdividirse en tipos (Tabla 1)

Tabla 1
Tipos de refracción en la troposfera [3, 4, 7].

Tipo	Rango de k_e	Valor de ΔN (U/km)	Rango de a_e (km)
Subrefracción	< 1	$\Delta N < -40$	6370
Estándar	$4/3$	$\Delta N = -40$	8500
Superrefracción*	$> 4/3$	$-157 < \Delta N < -40$	> 8500
Conductiva(ducto)	< 0	$\Delta N < -157$	-----

*Se le conoce también como aumentada

Sí el trayecto es casi horizontal y N decrece con h ($\Delta N < 0$), se considera positiva; el rayo se curva hacia la Tierra, k_e crece y el rango **Ro** de visibilidad directa (DMVD) entre antenas es mayor (ver expresión 17). Por el contrario, si N crece con h ($\Delta N > 0$), se considera negativa, el rayo se curva hacia arriba y la comunicación se interrumpe (poco frecuente). Más aún, con refracción positiva, se puede establecer otros límites de subdivisión lo que se muestra en la Tabla 1. De gran interés son los dos últimos casos (**superrefracción y conductiva**) por los mayores niveles de R_o que se logran. En la Fig.3 [16], se muestran los casos más significativos en función de ΔN y ΔM . Los CT ocurren si: $\Delta N < -157$, valor límite frontera.

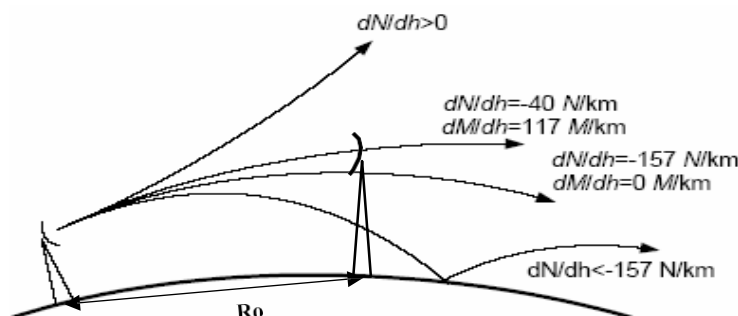


Figura 3
Curvatura de los rayos, para distintos valores de los gradientes de N y M [16].

Cuando la refracción estándar: $\Delta N = -40$ U/Km, $k_e = 1.34$, $a_e = 8547$ Km (clima templado) empleado en Cuba incorrectamente [4]. En (6), $dN1$ y $dN2$ son definidos en (U/m) al igual que $\Delta N1100$. Para poder emplear estos gradientes en (11) hay que expresarlos en (U/Km).

2.3 Conductos o guías de ondas troposféricas. Clasificación

La propagación de radio en condiciones de CT se parece a la de las guías de onda dieléctricas (GOD). Se diferencian en que, mientras en una GOD el rayo es individual, y experimenta una *reflexión interna total* (RIT) en las paredes superior e inferior; en una guía de onda troposférica (GOT) la reflexión es ordinaria imperfecta en la tierra, pero RIT en la pared superior (ver Fig.4). La altitud h_0 es diferente para diferentes ángulos de elevación o de salida de la onda desde el transmisor.

Las condiciones de clima más comunes para la formación de CT son: la “inversión de temperatura” (IT) y/o “la inversión de humedad” (IH). De los dos factores, el más importante y decisivo es el primero. La IT pueden ocurrir por procesos de advección: enfriamiento de la tierra (por ejemplo, frentes fríos), o al circular un aire seco y caliente sobre una capa elevada.

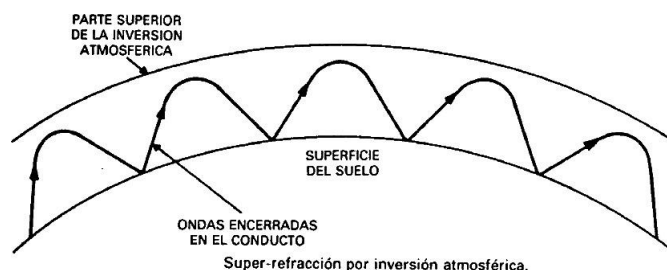


Figura 4
Conducto o guía de onda troposférica por inversión [16]

2.3.1 Tipos de conductos y sus parámetros

Los CT pueden dividirse en (Fig 5): superficiales, de superficie elevados (CS), y elevados (CE) [13].

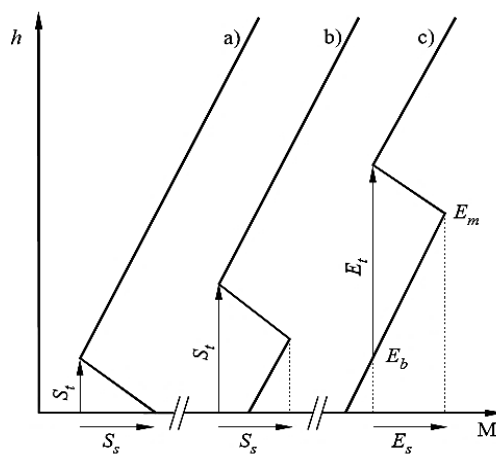


Figura 5
Definición de los parámetros de: a) conductos superficiales, b) conductos de superficie elevada y c) conductos elevados [13]

Parámetros de los conductos: La Fig. 5 nos muestra el índice modificado M en los CT en función de h y las definiciones gráficas de sus parámetros [13]. Los CS se caracterizan por: su intensidad S_s (unidades M) y su espesor S_t (m); los CE por: su intensidad E_s (unidades M) y su espesor E_t (m). En los CE (Fig 6) se tienen dos parámetros adicionales: la altura básica $E(m)$, y la altura interior de M máximo, $E_m(m)$. Un objetivo del trabajo es describir, no solo la concurrencia de los CT, sino también, el valor de estos parámetros.

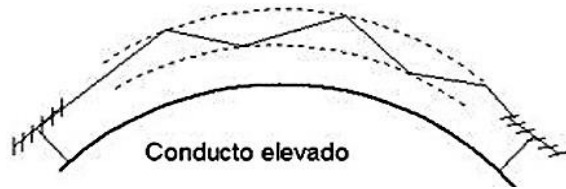


Figura 6
Conducto troposférico elevado [16].

Frecuencia mínima o de corte de la propagación por CT

Al igual que en una guía de onda convencional, en los CT ocurre la posibilidad de una *frecuencia de corte o crítica*. Para que haya propagación es necesario que $\lambda < \lambda_c$. La longitud de onda de operación no debe exceder a la longitud de **corte o crítica** λ_c . La existencia de un CT no se logra necesariamente con esta condición sino que depende también del ángulo de salida.

Según la expresión (1.23) en [2], λ_c depende de h_o (altura del CT en m), o sea del perfil de N , según:

$$\lambda_c \cong 8.5 (h_o(m))^{3/2} 10^{-4} \text{ m} \quad (12)$$

Valores de λ_c hallados con (12) se muestran en la Tabla 2. Los perfiles de N basados en observaciones, muestran que la altura de los CT suele medirse en metros o decenas de metros, y casi nunca supera los 200 metros. Esto se ratifica en el trabajo. Por lo tanto, los CT solo pueden soportar ondas ultracortas (VHF, UHF y SHF, desde 1m a 1cm).

Tabla 2
Longitudes de onda de corte de CT en función de su altura h_o [2]

h_o (m)	6	24	120	600
λ_c (cm)	1.25	10	112	1250
f_c (GHz)	24	3	.265	.024

3. - Procedimientos de obtención de los parámetros meteorológicos y refractivos

Los CT pueden crear perturbaciones como: desvanecimientos profundos lentos, gran empeoramiento de la señal o el desvanecimiento por trayectos múltiples en las líneas de radio enlaces terrenales de visibilidad directa. También pueden ser la causa de interferencias considerables en los trayectos transhorizonte [16-18]. Pero, también, se pueden lograr estos efectos con la superrefracción, hipótesis poco considerada como posible. En Cuba son relativamente comunes las señales de televisión externas de OUC durante el verano y los meses de otoño [19]. En el caso del radar, con frecuencia se logran incrementos notables del alcance, más allá del horizonte y se reciben señales de radio que constituyen interferencias.

Por su posición dentro del mar y por la estabilidad en la presentación diaria de los datos, se pueden utilizar los registros de: p , t y Hr , publicados por la Universidad de Wyoming [8] que se basan en los sondeos meteorológicos realizados en Cayo Hueso, aunque existen otras localizaciones en el entorno de nuestro país (Miami, Jamaica, Yucatán, etc.). Los datos se brindan, cada día, en dos horarios: las 07:00 horas y la 19:00 horas de Cuba. Generalmente, cada parámetro alcanza hasta varios kilómetros en altura (ver Tabla 3), pero solo hasta 2 km. Se describen: la humedad relativa Hr en % (RELH); humedad del aire y la humedad de saturación, e ; la temperatura t , grados Celsius (TEMP) y la presión p en hPa (PRES).

Con la expresión (13) tomada de la UIT-R 453 [13] y de [1] a partir de H_r , se hallan los valores de (e_s) y e :

$$e = \frac{H_r e_s}{100} \text{ hpa} \quad (13)$$

La temperatura t en grados Celsius se lleva a °K

$$T = t + 273 \quad (14)$$

Tabla 3

Archivo HTML descargado del sitio web de la Universidad de Wyoming [8].

72201 EYW Key West Observations at 00Z 01 Oct 2020										
PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1011.0	13	29.0	25.6	82	20.97	35	12	301.2	363.3	305.0
1000.0	110	27.8	25.5	87	21.08	35	20	300.9	363.3	304.7
978.3	305	26.0	24.8	93	20.69	40	21	301.0	362.2	304.7
974.0	344	25.6	24.7	95	20.61	41	20	301.0	362.0	304.7
953.0	537	24.6	22.9	90	18.85	44	15	301.9	357.8	305.3
945.1	610	24.0	22.8	93	18.85	45	13	302.0	357.9	305.4
930.0	752	22.8	22.5	98	18.85	45	13	302.1	358.1	305.6
925.0	799	22.4	22.1	98	18.49	45	13	302.2	357.1	305.5
912.9	914	21.7	21.5	99	18.02	35	13	302.6	356.2	305.9
892.0	1116	20.4	20.4	100	17.23	12	4	303.3	354.6	306.4
883.0	1204	20.6	20.6	100	17.64	2	1	304.4	357.2	307.6
881.4	1219	20.4	20.4	100	17.47	0	0	304.4	356.6	307.5
869.0	1342	19.0	19.0	100	16.19	63	1	304.1	352.5	307.1
854.0	1493	18.8	18.8	100	16.27	139	3	305.4	354.3	308.4
850.0	1533	18.4	18.4	100	15.93	160	3	305.4	353.3	308.3
821.1	1829	15.8	15.3	97	13.54	220	3	305.7	346.4	308.1
817.0	1872	15.4	14.9	97	13.21	219	3	305.7	345.5	308.1
804.0	2009	15.0	12.6	86	11.53	214	3	306.7	341.7	308.8
797.0	2083	14.6	13.2	91	12.11	212	3	307.0	343.8	309.2
792.2	2134	14.5	12.8	90	11.89	210	3	307.4	343.6	309.6
775.0	2320	14.0	11.5	85	11.12	182	4	308.8	342.9	310.9
764.2	2438	13.2	10.9	86	10.85	165	4	309.2	342.5	311.2

Posteriormente, con los valores de: p, e y T, y las expresiones: (2, 3, 6), se hallan los valores de N, y con (10-11) se pueden estimar: a_e y k_e . Recuerde que sobre el mar $N_s = (0)$ y el valor de ΔN determina la presencia de un CT o no.

Con los datos de N o de M se procede a la determinación del gradiente (ΔN) en el primer kilómetro o en 100m; y los valores correspondientes de a_e y k_e , al emplear las expresiones (10) y (11). El estudio se inicia al guardar los ficheros obtenidos del sitio web brindado por la Universidad de Wyoming, -en este caso para la estación de Cayo Hueso-[8]. Se descarga la información mensual para cada día y mes durante 5 años (2016-2020). En los horarios: 00 (7 am de Cuba) y 12 (7 pm de Cuba). Se halla el promedio del día y su lectura con el Matlab. La información útil se reescribe en archivos de texto de las columnas 1, 3 y 5; la altura h aparece en la columna 2 que es limitada hasta 2000m. Los cálculos de N y ΔN , se guardan en una carpeta llamada “Mediciones”. Los datos se tabulan y grafican a conveniencia con lo esperado.

3.2 Principales resultados obtenidos para los CE. Concurrencia y parámetros

Para analizar la superrefracción y la refracción conductiva se ha tomado al rango de alturas desde 200 hasta 2000 metros. En la primera, se estudian los valores del gradiente ΔN_1 (hasta 1km) menores que (-75 U/km). Los valores se subdividen en cuatro intervalos, tres para la superrefracción o sea: (-157 a -120 U/km); (-120 a -100 U/km) y de (-100 a -75 U/km), y uno para los CE, menores de -157 U/km. Se toma el nivel de concurrencia mensual y por año en ambos horarios. Los resultados se muestran en la Tabla 4 (anuales) y en la Tabla 5 por meses. En la última se añaden los resultados obtenidos por Lányer en trayectos sobre tierra, incluyendo los costeros. En [7] se referencia el Anexo D (Figura D.1 de 22) donde se amplía la información de la Tabla 5, desglosada por años.

De la Tabla 4 se resume que el número de repeticiones en los intervalos 1-3 es elevado, pero el de CE es bajo, -el % de CE al año, respecto al total de eventos, no supera el 2.5 % -. Ocurre mayor cantidad de CE por la mañana (46) que por la tarde (23), 69 en total, con un promedio de 13.8 CE por año. Sin embargo, el número de eventos de sobrefracción (Tabla 5, intervalo 3), alcanza una concurrencia de 250 eventos, casi 4 veces mayor que el número de CE.

En la Fig. 9, se observa esta particularidad por meses y que la mayor aparición es en los meses de Febrero-Mayo lo que indica que son más probables las interferencias transhorizonte en estos meses.

Tabla 4
Repeticiones de $\Delta N1$ por intervalos inferiores a (-75 U/km) por año. Alturas hasta 2000 m [7]

No.	Años	2016		2017		2018		2019		2020	
	Intervalos de $\Delta N1$	00	12	00	12	00	12	00	12	00	12
1	$-100 \leq \Delta N < -75$	390	448	496	593	459	434	443	383	662	516
2	$-120 \leq \Delta N \leq -100$	65	40	91	81	74	31	67	54	105	60
3	$-157 \leq \Delta N \leq -120$	32	33	27	22	13	9	18	13	47	27
4	$\Delta N \leq -157$	14	12	12	2	4	0	4	0	12	9
Eventos por horario		501	533	626	698	550	474	532	450	826	612
Total eventos diarios por año (total 5802)		1034		1324		1024		982		1438	
% Conductos elevados por año (promedio 13.8, 1.19%)		2.51		1.06		0.39		0.4		1.46	

Tabla 5
Repeticiones de rangos de $\Delta N1$ por meses (de 200 a 2000 metros, 5 años) [7].

Meses	Suma de eventos a las 00 y 12 horas					CE[5]
	1	2	3	CE	Total Mes	
Enero	355	67	23	5	450	4
Febrero	408	53	33	11	505	1
Marzo	490	95	46	14	645	5
Abril	656	119	56	11	842	4
Mayo	470	61	27	6	564	8
Junio	546	79	17	4	646	4
Julio	303	27	5	0	335	1
Agosto	302	34	17	2	355	0
Septiembre	385	34	6	7	432	1
Octubre	290	16	3	0	309	3
Noviembre	199	33	5	6	243	0
Diciembre	421	47	13	3	484	2
Total	4825	667	251	69	5802	33

Es conocido que la DMVD, (R_o , Fig 3) se incrementa al crecer el radio ficticio a_e , lo cual se evidencia en la expresión [20]:

$$R_o = \sqrt{2ak_e} (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) \quad \text{km} \quad (17)$$

Entonces, el valor de R_o transhorizonte va a depender de ΔN (expresión 11), o sea, para ΔN comprendidos en el intervalo 3, se tiene una R_o mayor que para los intervalos 2 o 1, y el alcance de la señal es máximo para los CT. Esto ratifica que la recepción de interferencias en las costas cubanas, no tiene necesariamente que ser por CT, incluso, es más probable que se reciban interferencias causadas por superrefracción como opción. Lo expresado se aprecia claramente en la Fig.9 al comparar las repeticiones en los intervalos 3 con 4 (CT).

3.2.1 Análisis de los parámetros de CE. Concurrencia.

En la Recomendación 453-14 de la UIT, se brindan gráficos de isoletas de los parámetros de los CT. Las estadísticas se obtuvieron mediante observaciones por radiosonda en 661 emplazamientos *sobre tierra* durante 20 años (1977-1996). La Tabla 6 especifica que el promedio anual de aparición de E_p de los CE, en el Caribe, es de un 40%, y para CS, S_p un 6%. Se considera Cayo Hueso embebido notablemente dentro del mar.

Tabla 6
Parámetros de los CT en el Caribe [13].

Conductos elevados promedio anual		Conductos superficiales promedio anual	
Promedio anual de aparición, E_p (%)	40	Promedio anual de aparición, S_p (%)	6
Intensidad media, E_s (unidades M)	10	Intensidad media, S_s (unidades M)	10
Espesor medio, E_t (m)	200	Espesor medio, S_t (m)	100

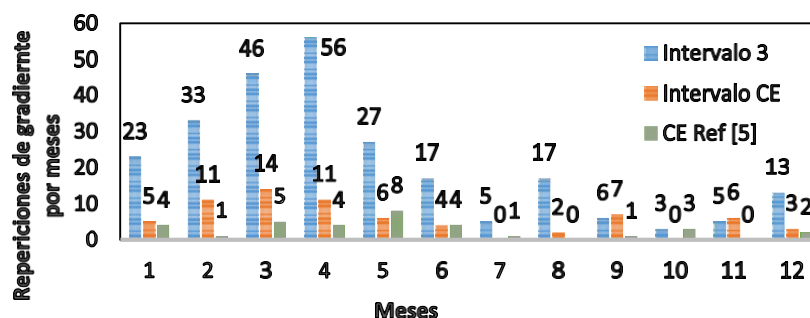


Figura 9
Repeticiones de $\Delta N1$ por meses. Intervalos 3-4 y ref [5]

Como resumen, a partir de la Fig 9 se obtienen los siguientes resultados de los intervalos :3 y 4 y referencia [5]:

1. Los meses de más aparición con $\Delta N1$ por debajo de -157 U/km son: febrero (**11**), marzo (**14**), abril (**11**), en primavera; septiembre, mayo y noviembre son notables. Este resultado se diferencia del obtenido en otras regiones, por ejemplo el Mar Mediterráneo [21], donde es notable la presencia en el verano. En nuestro caso en julio, agosto, y octubre no hay CE.
2. Los meses donde es más frecuente la superrefracción son de: enero a Junio, sobre todo en febrero- abril , en los cuales, también, es más probable la ocurrencia de CE.
3. Es evidente que el número de sucesos se reduce al crecer el número del intervalo y, el más bajo es para los CE.
4. El promedio anual de aparición en el período es de **13.8**, debido a **69** CE (Ver Tabla 5), cerca de **3.78** por día. Este promedio es muy inferior al de la UIT. En la mañana (Fig. 10) los CE son más frecuentes que en la tarde (**46** vs **23**).

Atendiendo a la importancia del problema, en [5] se evalúan los parámetros que fueron obtenidos para trayectos *sobre tierra* y *costeros* (Tabla 5) en el período desde 1993 hasta 2001 (8 años). El promedio de aparición de los CE en los diferentes meses, 5, ref. 5). En general, se presentan 33 CE con un promedio anual de 4.125 en los ocho años, muy inferior al valor propuesto por la UIT (Tabla 6), pero la recomendación no aclara el entorno que comprende. No obstante, este promedio, sobre tierra, o en condiciones costeras, es inferior al de este trabajo, obtenido sobre el mar (**13.8**) lo que reafirma su particularidad.

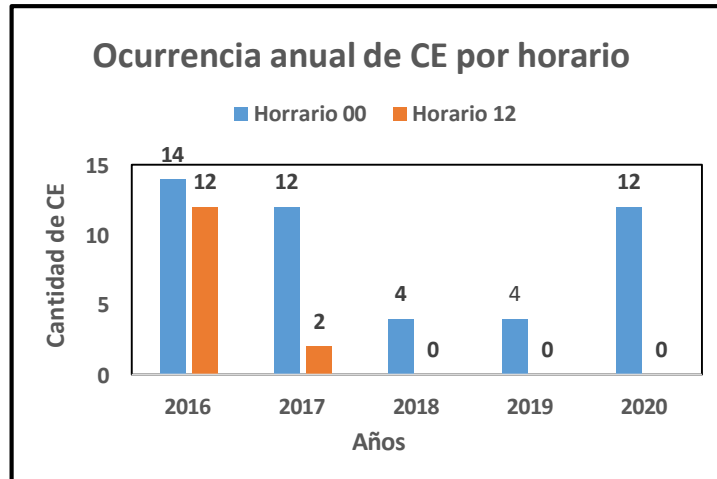


Figura 10
Ocurrencia anual de CE por horario [7].

Se considera que los datos expuestos son novedosos e interesantes; nos llama a la reflexión la necesidad de confirmar el estudio obteniendo una data más extensa en años. No se conocen, además, datos de la UIT sobre la concurrencia mensual por lo que los resultados de la figura 9 y 10, son también una novedad. En la referencia [7], se da a conocer que en los trabajos referenciados en la misma como [22] y [23] se presentan secuencias semanales, menos analizadas aún.

Obsérvese que la cantidad mensual de eventos de superrefracción (**78.7%**) es mayor (256) que la cantidad de CE (69) por mes (**21.3%**). Esto hace *más significativa* la importancia de la superrefracción al estudiar las interferencias transhorizonte.

3.2.2 Análisis de los parámetros de los CE detectados

Los parámetros de los CE detectados, se han clasificado para su estudio en los intervalos presentes en la Tabla 7:

Tabla 7
Parámetros de los CE detectados por año en el período por intervalos [7].

No.	Espesor E_t (m)			No.	Intensidad E_s (unidades M)		
	Intervalo	Cantidad	%		Intervalo	Cantidad	%
1	8-50	16	55	1	0-18	23	64
2	200-600	13	45	2	300-450	13	36

De la Tabla se concluye que los CE se agrupan con espesores de: 8 a 50 m (16 en total, 55%), y de 200-600 m (13 en total, 45%), los que son más frecuentes, fundamentalmente, en horario de la mañana. La UIT solo nos da un espesor medio anual de (200m), no comprendido en los límites obtenidos. A su vez Lányer en [5] propone un rango mensual promedio de 0-44, lo cual concuerda con nuestro intervalo 1 durante nueve meses, y un rango de 65-170 durante los tres meses restantes; lo que muestra una fuerte discrepancia con lo obtenido para el mar. Al parecer (ver Tabla 6) hay una ligera tendencia a espesores sobre el mar por debajo de 200m, lo que se corresponde con las bandas de VHF, UHF y SHF, pero con menor cuantía hay tendencia a CE de la banda alta de VHF, o sea para conducir señales por el mar de más de 200 MHz [22].

Por otro lado, predominan los CE (23) de intensidades E_s bajas (de 0-18 unidades M) durante casi todo el año (64%). El intervalo medio de la UIT (10 unidades M) concuerda plenamente con este resultado; los obtenidos por Lányer en [5] también concuerdas con ese rango (de 0.65 a 8 unidades M), excepto en el mes de Julio, un mes que alcanza 43 unidades

M. No obstante, el 35% de nuestros resultados se alejan de lo anterior, con un rango de intensidades elevado (300- 400 unidades M). En conclusión hay grandes discrepancias entre estos resultados y los niveles de intensidad que predominan.

3.3 Principales resultados obtenidos con los CS. Concurrencia y parámetros

Ya se ha visto que en la Recomendación 453 al igual que en los CE (Tabla 6) aparecen datos de: concurrencia, espesores e intensidades de los CS. Los datos de aparición y de los parámetros que se proponen son resultados de los parámetros meteorológicos para ambos horarios, igual que para los CE, pero ahora solo en los primeros 200 metros de altura sobre el mar al norte de Cuba. Como el ducto se forma sobre la superficie del mar que es un buen reflector, la señal puede propagarse a distancias superiores a 2000km [17].

3.3.1 Análisis de los parámetros de CS. Concurrencia

Al igual que se obtuvo la Tabla 4 para los CE, en la Tabla 10 se resume la cantidad de eventos ocurridos con gradientes ΔN_{100} inferiores a (-75 U / km).

Tabla 10
Repeticiones de ΔN_{100} a intervalos inferiores a (-75 U/km) en el periodo de 5 años [7].

No	Años	2016		2017		2018		2019		2020		Total
	Horario	00	12	00	12	00	12	00	12	00	12	
1	$-100 \leq \Delta N < -75$	55	89	40	97	23	16	24	26	54	49	473
2	$-120 \leq \Delta N \leq -100$	19	33	20	38	5	10	12	9	11	13	170
3	$-157 \leq \Delta N \leq -120$	4	11	19	30	3	4	9	5	4	14	103
4	$\Delta N \leq -157$	29	27	21	24	2	13	1	7	5	23	152
	Eventos por horario	107	160	100	189	33	43	46	47	74	99	898
Total eventos diarios por año (total 898)		267		289		76		93		173		898
% CS Promedio (30.4, 16.9%)		29.7		32.1		8.6		10.3		19.3		16.9

De las Tabla 10 y 11 se infiere que el número de repeticiones de CS en los intervalos 1-3 es menor que para los CE. Por otro lado, es de destacar el mayor papel de los CS (62%) con 152 eventos, respecto a los casos de superrefracción (**38%**) del intervalo 3 (104). Es decir el comportamiento es inverso cuando se toman los valores de gradiente hasta 200m, e 1km. En la Fig. 11, se observa esta particularidad cada mes con la mayor aparición de CS, sobre todo por la tarde

El número de CS obtenidos mensualmente son superiores en casi todos los meses -de febrero a septiembre-, o sea se exceptúan los meses de agosto, octubre y noviembre. No obstante, recuerde que los datos de Lányer fueron tomados en zona costera.

Tabla 11
Repeticiones de rangos de ΔN_{100} por meses (hasta 200 metros, 5 años)[7].

Meses	Suma de los eventos a las 00 y 12 horas					CS[5] Tierra
	1	2	3	CS	Total	
Enero	50	19	9	9	87	3
Febrero	42	14	7	19	82	0
Marzo	38	20	8	17	83	2
Abril	33	13	8	13	67	3
Mayo	36	16	13	18	83	1
Junio	49	11	14	13	87	3
Julio	47	10	6	18	81	5
Agosto	52	15	11	11	89	4
Septiembre	34	22	13	18	87	1
Octubre	27	9	2	4	42	2
Noviembre	20	9	1	0	30	1
Diciembre	43	13	12	12	80	3
Total	471	171	104	152	898	28 año)

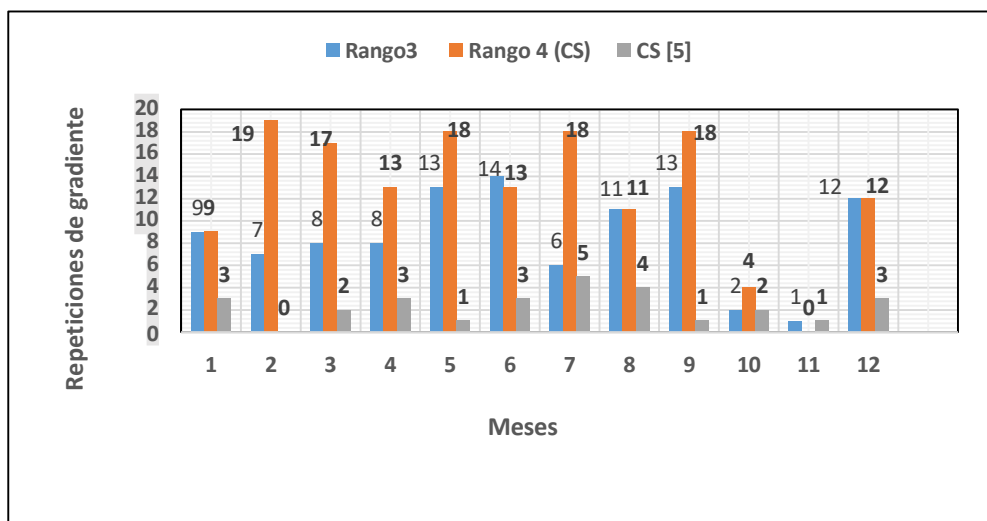


Figura 11
Repeticiones de ΔN_{100} por meses. Intervalos 3-4 y ref [5].

Como resumen, a partir de estas tablas y de la Fig 11 (ocurrencia por meses), se tienen los siguientes resultados:

1. Se evidencia una aparición más frecuente de los CS que la de los CE, al contrario de lo que pronostica la UIT.
2. Los meses de mayor aparición son, de febrero a septiembre y diciembre, rango mayor que el de los CE. centrado en el verano. Por Lányer, el período de más incidencia es de marzo a junio lo cual se aproxima o ajusta al nuestro..
3. Los meses donde es más frecuente la superrefracción son de: mayo a septiembre donde es, también, más probable la aparición de CS. Es evidente que el número de sucesos, al inicio, se reduce al crecer el número del intervalo, pero crece nuevamente; para el caso del intervalo 4 (CS) hay mas eventos que en el 3.
4. De la Tabla 10 se infiere que el número de repeticiones en los intervalos 1-3 es menor que para los CE. Sin Embargo, el número de CS (152, intervalo 4) es superior al de CE (69). El promedio de CS por año es de **30.4** y en % respecto al total es de 16.9% y **8,4%** por día.

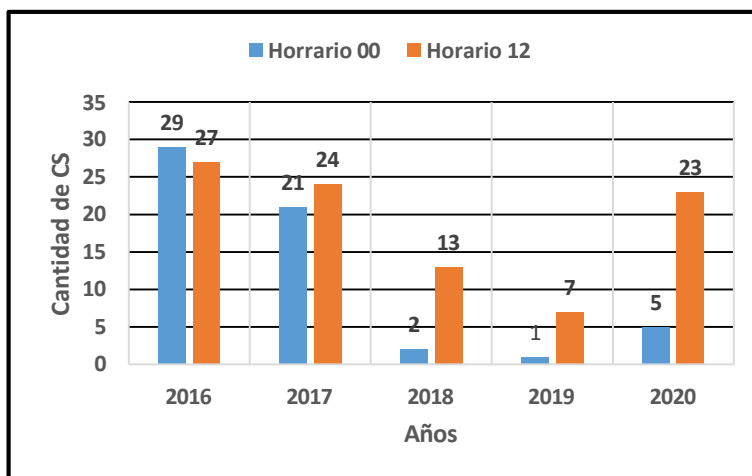


Figura 12
Ocurrencia anual de CS por horario [6].

5. Es significativo que por la tarde los CS (Fig. 12), en general, son más frecuentes (**58 vs 94**). Se considera, entonces, que son más probables las interferencias transhorizonte de muy largo alcance por CS y en estaciones con antenas de baja altura que las que se logran por superrefracción. Quizá este resultado ha inducido minimizar la superrefracción.

3.3.2 Análisis de los parámetros de CS detectados.

Al igual que el resumen de los parámetros de los CE en la Tabla 9, para los CS se muestran esos resultados en la Tabla 12.

Tabla 12
Parámetros de los CS detectados por intervalos en el período por año [7].

No.	Espesor E_t (m)			No.	Intensidad E_s (unidades M)		
	Intervalo	Cantidad	%		Intervalo	Cantidad	%
1	0-50	53	63	1			
2	51-100	31	37	2	300-400	109	71.7%

Los datos de la UIT (Tabla 6), solo especifican un valor medio de espesor de 100m. Lányer, para un valor medio anual de 28 CS, nos presenta: en un intervalo de 0-50, 1 solo evento, muy alejado de nuestra estadística sobre el mar; en el intervalo de 50-100, 19 eventos, concurrentes para tierra y mar; y para 100- 200m, 8 eventos, valores que no se registran en los resultados presentados. Sin embargo, el valor medio del espesor se aproxima al propuesto por la UIT.

Con relación a la intensidad, los 28 eventos de Lányer son inferiores a 6 unidades M, valor que se aproxima a la proposición de 10 de la UIT. Ambos están muy alejados a los 109 eventos, comprendidos en el rango entre 300 y 400, obtenidos en nuestro caso, valores que por otro lado son elevados respecto a aquellos.

3.4 RESULTADOS PRINCIPALES INICIALES

Los principales resultados del trabajo presentado se relacionan a partir de los resúmenes anteriores:

1. La recurrencia de los CS(152) sobre el mar es superior a la de los CE(69). Este dato es de gran importancia porque las interferencias deben incidir principalmente en antenas de alturas bajas sobre todo las situadas cerca de la línea costera.
2. Los CS se presentan fundamentalmente por la tarde y los CE por la mañana.
3. Los eventos de interferencias ocurren no solo por la presencia de CT sino que muchos pueden deberse a los efectos de la superrefracción. Los niveles de alcance dependen del nivel del gradiente de N.

4. Los espesores de los CS permiten la propagación de señales de UHF y SHF a muy largas distancias. Sin embargo los CE preferiblemente se limitan a las de SHF, No obstante, con CS son posibles señales de VHF.

3.5 CONCLUSIONES

Se considera que el objetivo propuesto ha sido cumplido pues se ha logrado estructurar los procedimientos para obtener las estadísticas de ΔN , de la aparición de CT y de sus parámetros. Se ha enriquecido la base estadística de los parámetros de los CT sobre el mar lo que facilita el trabajo de los especialistas, incluso con intervalos de tiempos semanales. Se demuestra que la ocurrencia de interferencias externas a nuestros sistemas de radiocomunicaciones y el radar, no se limita a los CT, sino incluye la ocurrencia de un nivel adecuado de superrefracción.

Como contribuciones principales se tienen: propuestas de ratificación o corrección de los datos publicados sobre CT para el Caribe sobre el mar. Se amplían los intervalos de tiempo hasta semanales, no presentes, o poco presentes en publicaciones internacionales. Por las contrariedades de los resultados obtenidos y para lograr más fiabilidad, se necesita un análisis durante un número mayor de años y ampliar los resultados con los de la costa sur de la isla.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean reconocer a todos los investigadores que con su trabajo abnegado han realizado los trabajos experimentales y de cómputo y en particular al trabajo realizado por la ingenieras Ana Paula López y Melissa Morejón.

REFERENCIAS

1. Sandianes J. R., Pérez Garlobo L., Estudio preliminar de la refractividad de la troposfera en el mar al norte de Cuba Revista RIELAC, Vol. 45(3):e 2401 (2024) ISSN: 1815-5928; UTH, La Habana.
2. Dolukhanov, P. Propagation of Radio Waves., de la edición rusa en inglés, Cap. 1, Editorial MIR, Moscú, 1971.
3. Rábanos, J.M. Editora universitaria Ramón Aceres. Transmisión por radio. 6ta ed. Madrid, España. Cap. 2, p.74, 2008.
4. Sandianes Galvez, J.R., Garlobo, L.P., Galindo Mier, R. La refractividad de la troposfera y el radio ficticio de la Tierra en Cuba, Revista Telemática, 2021; 21(1): 54-65, UTH, La Habana.
5. Pérez Garlobo, L. Caracterización de los parámetros radiometeorológicos de la troposfera que influyen en la propagación de las ondas de radio en Cuba. Tesis Dr. C, 2009, Instituto Técnico Militar “José Martí”: La Habana.
6. Alfaro E. J., “Ciclo diario y anual de variables troposféricas y oceánicas en la isla del Coco , Costa Rica”, Revista de Biología Tropical, Universidad de Costa Rica, 56(2), Agosto 2008, ISSN 0034-7744
7. Sandianes Galvez, J. R, Pérez Garlobo, L , Pérez López A. P, Morejón Gonzalez M., Caracterización de la refractividad y los ductos troposféricos en el estrecho de La Florida, UTH, Monografía, ISBN:978-959-2561-616-5, Aprobada Noviembre de 2022, La Habana, 69 pepigrafe 2.15.
8. University of Wyoming [database on the Internet]; Department of atmospheric science. Accedido en 2021. Available from: <http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
9. Pérez Garlobo L., Marín Y., Sandianes Galvez, J.R. Sistema para la predicción y alerta de interrupción a las comunicaciones por anomalías en las condiciones de propagación, Memoria- reporte , Seminario Regional América de la UIT, Mayo 2023, La Habana.
10. Sandianes Galvez, J.R, Pérez Garlobo L: *Information document regarding refractivity data in the Caribbean and procedures for the evaluation of interference due to ducting conditions between stations on the surface of the Earth in order to possible future revisions of Recommendations ITU-R P.453-14 and ITU-R P.452-17*, ITU-R , WP3J C, Documento Número 285, Reporte del MINCOM para la UIT, 15/ 5 2023. 35 pp.
11. Seigal D. F., “Refractive conditions in the Caribbean sea and its effects on radio systems”, Thesis, Naval Postgraduate School, California, EUA, 9/1998, 69 pp
12. Sandianes Galvez, J.R., Pérez Garlobo, L. Estudio preliminar de la refractividad troposférica en el mar al norte de Cuba, XII Congreso Internacional de Telecomunicaciones y Telemática (CITTEL 2024), Presentación CIT-03. Universidad Tecnológica de La Habana, ISBN: 978-959-261-635-6, Noviembre 2024.
13. Unión Internacional de Telecomunicaciones, Rec. UIT-R P.453-14, Índice de refracción radioeléctrica: su fórmula y datos sobre la refractividad, Disponible: <https://www.itu.int/rec/R-REC/p/en>, pags. (2-3,5,8-9).Ginebra, Suiza, 08/2019.
14. Unión Internacional de Telecomunicaciones, Rec.UIT-R P.452-18, Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz, Disponible: <https://www.itu.int/rec/R-REC/p/en>, pag. 5, Ginebra, Suiza, Aprobado 10/2023. Accedido 2023.
15. Unión Internacional de Telecomunicaciones, Rec. UIT-R P.834-9, Efectos de refracción sobre la propagación de las

ondas radioeléctricas, Disponible: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>, Ginebra, Suiza, 12/2017.

16. Edisson, M:I, Pérez D.C., Tibanquiza J. Propagación por ductos troposféricos, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, 2016.
17. Mc. Feeters C., Eugen L., Davidson K. L, Pastore M. J. “Effects of Surface- based ducts on electromagnetic system”, Thesis, Naval Postgraduate School. California, EUA, 09/1992.
18. Brooks I.M., Sarach A.K., Roger D P., “Observations of strong surface radars ducts over the Persian Gulf”, Journal of Applied Meteorology, 38 (9), September, 1990, EUA, Doi 10.1175/1520-450.
19. Montero, A.R., Radio Cuba alerta sobre posibles afectaciones en recepción de señal televisiva analógico y digital, Periódico Granma, Accedido:17 de abril de 2020, 11 de Noviembre 2024, La Habana, Cuba. <https://www.granma.cu>
20. Sandianes Galvez, J. R., Alternativa para el cálculo de las alturas reducidas sobre una tierra esférica, RIELAC, 2021; 42 (1): 21-33, Enero-Abril, ISSN: 1815-5928, Univesidad Tecnológica de La Habana (UTH).
21. Mogoldi, A. V., Moteu, M. , Bech, J, Lorente J. “A long term (1999–2008) study of radar anomalous propagation conditions in the Western Mediterranean”, March, 2016, 169 (3), part A, EUA, pp 73-85, doi.org/10.1016/ j.atmosres
22. Gulbertson, G. W., Davidson K. L “Assessments of atmospheric affects of VHF and UHF communications”, Thesis, March, Naval Postgraduate School. California, EUA, 1990.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de intereses entre los autores, ni con ninguna institución a la que cada uno está afiliado u otra institución.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

José R. Sandianes Gálvez: Sus principales contribuciones consisten en la conceptualización, idea y objetivos del artículo, su preparación, escritura, desarrollo y revisión crítica del borrador y la conformación de la versión final después de su análisis con el otro autor. Ha estructurado los procedimientos para el logro de los resultados y comparado con los publicados.

Lányer Pérez Garlobo: Sus principales contribuciones radican en el acabado de la conceptualización e idea del trabajo; el aporte de programas para la obtención de datos empírico-experimentales actualizados que contribuyeron a la elaboración del artículo. Con su experiencia en la Radiopropagación ha influido en la revisión crítica de la primera versión y la final.

AUTORES

José R. Sandianes Gálvez:

Graduado de Ingeniero Eléctrico en Telecomunicaciones en la UH en 1969 y de Doctor en Ciencias Técnicas en el Instituto Técnico Militar “Jose Martí” (ITM) en 1985. Profesor Titular en el ITM desde 1982 y en la actualidad en la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría. Se desenvuelve en el campo de la Electrodinámica, la Propagación de las Ondas de Radio y las Antenas que son sus principales intereses de investigación. Ha participado y contribuido con diferentes trabajos en proyectos y análisis, en diferentes instituciones ramales y nacionales del país. Ha expuesto trabajos y obtenido premios en varios eventos nacionales es y varias ediciones de CITTEL hasta 2024). Obtuvo, como Autor Principal, un Premio Anual de la Academia de Ciencias de Cuba en 1999 y la Distinción Especial del Ministro de Educación Superior. En la actualidad es miembro del Consejo Técnico Asesor del MINCOM. Ha participado en un proyecto del Programa Ramal del MINCOM (2022-2024). Correo electrónico: sandianes@tele.cujae.edu.cu. ORCID: 0000- 0003-1391-1236.

Lányer Pérez Garlobo:

Graduado como Ingeniero Radioelectrónico en Comunicaciones en el año 2002, y de Doctor en Ciencias Técnicas (ITM) en el 2010. Es Profesor Titular desde el 2015, profesor e Investigador del ITM y miembro del Consejo Científico y de la Comisión de Grados Científicos. Se desenvuelve en el campo de la Electrodinámica y la Radiopropagación que son sus principales intereses de investigación. Ha expuesto trabajos y obtenido diversos premios en varios eventos nacionales e internacionales (Informática y varias ediciones de CITTEL hasta 2024). Ha alcanzado premios a nivel nacional y ramal por resultados de investigaciones aplicadas a la rama de la Radiopropagación. Ha sido el dirigente principal de un proyecto del Programa Ramal del MINCOM en el período 2022-2024. En la actualidad es miembro del Consejo Técnico Asesor del MINCOM. Correo electrónico: lanyer1987@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7911-7807.



Esta revista se publica bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Sin Derivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)