



Estudio preliminar de la refractividad de la troposfera en el mar al norte de Cuba

José R. Sandianes Gálvez, Lányer Pérez Garlobo

RESUMEN / ABSTRACT

La troposfera es una capa de la atmósfera cuyo coíndice de refracción N es variable en el tiempo y con la geografía por las variaciones con la altura de: la temperatura T , la humedad del vapor de agua e y la presión atmosférica p . Para considerar la influencia de la refracción, en las bandas del espectro radioeléctrico, es tradicional emplear un radio ficticio de la Tierra a_e y no su radio real a . Con frecuencia se emplea: $a_e = 8500$ km (4/3 de a) - válido para países de clima templado-, al determinar las coberturas por campo: del servicio móvil terrestre (SMT), de las líneas de radio enlace (RE) y el alcance de radares. Un objetivo del trabajo consiste en, a partir de las mediciones existentes de T , e y p , estructurar algoritmos teóricos y de cómputo para determinar, estadísticamente, los valores: medios, medianos y la desviación estándar de N y a_e hasta una altura de 2 km. Los períodos que se consideran de interés: semanales, mensuales y anual, de inicio en los años 2016 hasta 2020. Los resultados se han comparado y validado con los de otras investigaciones anteriores, y aportan nuevos conocimientos. Las estadísticas semanales y mensuales se consideran aportes de este trabajo. Un aspecto importante debido a las interferencias externas – y poco estudiado-, no objeto de este artículo-, es cuantificar la ocurrencia de la superrefracción y de los conductos (ductos) elevados y superficiales sobre el mar

Palabras claves: troposfera, índice de refracción, radio ficticio, conductos, superrefracción.

The troposphere is a layer of the atmosphere whose co index of refraction N is variable in time and with geography due to variations with height of: temperature T , humidity of water vapor e and atmospheric pressure p . To consider the influence of refraction in the bands of the radio spectrum, it is traditional to use a fictitious radius a_e of the Earth and not its real radius. Frequently is used: $a_e = 8500$ km (4/3 of a) - valid for countries with a temperate climate -, for determining field coverage of: the land mobile service (SMT), the radio link lines (RE) and the range of radars. One objective of the work is, based on the existing measurements of T , e and p , to structure theoretical and computational algorithms to determine statistically, until a height of 2 km, the values: means, medians and the standard deviation of N and a_e . The periods that are considered of interest: weekly, monthly and annual, starting in 2016 until 2020. The results have been compared and validated with those of other previous investigations, and provide new knowledge. Weekly and monthly statistics are contributions of this work. An important aspect due to external interferences- but little studied and objet of another article- is to specify the occurrence of super refraction and elevated and superficial ducts over the sea.

Keywords: tropospheric, refraction index, fictitious radius, ducts, super refraction.

Preliminary statistics of the refractivity of the troposphere in the sea north of Cuba

1. -INTRODUCCIÓN

La determinación del campo de ondas de señales útiles, o de interferencias, en diferentes servicios de radio y para los alcances de los radares, en un entorno electromagnético que no siempre es el espacio libre (EL), requiere conocer su comportamiento en presencia de diferentes fenómenos [1]. Entre ellos se destacan, por la atenuación que producen en la onda: la refracción, la absorción en los gases de la troposfera y en los fenómenos hidrometeorológicos, la curvatura terrestre, etc. Las influencias

Recibido: 07/2024 Aceptado: 09/2024

de estos factores se agrupan en las pérdidas básicas de transmisión L_b (según la definición de Norton [2, 3-5]). El objeto de este trabajo es la afectación del campo debido a la esfericidad de la Tierra, a través de su radio ficticio a_e y a la refractividad de la troposfera. Ambas están influidas, significativamente, por sus parámetros meteorológicos en el lugar de emplazamiento, la hora y la estación del año. Estos son: la presión atmosférica p (hPa, hectoPascuales); la temperatura T , en $^{\circ}\text{K}$ y la humedad absoluta e , en g/m^3 .

El presente trabajo se circunscribe a la refractividad de la troposfera sobre el mar y sus índices radioeléctricos como el índice de refracción n_t y su coíndice N , los cuales cambian con las condiciones locales y períodos temporales (diarios, semanales, estacionales o anuales). Para considerar adecuadamente esos cambios es necesario obtener las estadísticas del comportamiento de N , y de su gradiente con la altura ΔN (dN/dh), en las condiciones consideradas y durante el mayor lapso de tiempo posible. Solo así se puede pronosticar con certeza el comportamiento del campo en condiciones medias de cada intervalo o, incluso, en tiempo real. El problema se complejiza porque esos índices experimentan variaciones regulares y aleatorias. Las regulares están determinadas por los cambios con: la altura, la estación del año y la región geográfica. Los aleatorios, no regulares, se deben a los movimientos turbulentos de las capas de aire.

En Cuba se han hecho trabajos experimentales sobre tierra por medio de sondeos en algunas localizaciones del país, pero se ha trabajado poco sobre el mar [6]. No obstante, señales anómalas o de interferencias llegan a nuestras costas regularmente, lo que depende de factores meteorológicos y refractivos (conductos troposféricos, superrefracción) por lo que es necesario conocer sobre el mar las estadísticas de N y ΔN . De acuerdo con la Recomendación 617 de la UIT-R [7], nuestro país se encuentra cerca de la frontera del clima tropical, típica de tierras bajas y se puede clasificar como marítimo subtropical el cual tiene valores medios anuales de: N y radio ficticio a_e , no típicos de otras regiones. Nada se dice de los valores por meses.

No obstante, se cuenta con los datos meteorológicos de radiosondas de: T , e y p , publicados [8] u obtenidos por otros medios, durante muchos años. Por tanto se deduce que, el estudio de las características temporales y espaciales de N , y su gradiente ΔN , y en consecuencia de a_e (y de los conductos troposféricos), constituye la solución a un problema científico que requiere del procesamiento de múltiples mediciones y un análisis comparativo. La base de los cálculos son los gradientes (véase la expresión 3.16 de [2]) de: temperatura, presión y humedad, en períodos: anuales, mensuales u otros [6].

El objetivo principal del trabajo es dar a conocer los procedimientos estructurados para obtener las estadísticas requeridas, los cuales se han instrumentado en Matlab. Otro objetivo principal es dar a conocer los propios resultados, aunque de inicio solo sea para cinco años. Estos muestran algunas diferencias con los publicados por instituciones de renombre como la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), en sus reportes y recomendaciones. En un encuentro regional de la UIT se ha manifestado la necesidad de mejorar la data obtenida para la región y se solicitó la presentada por Cuba [9].

Como principales aportes logrados se tiene: la elaboración de los procedimientos para obtener los valores medios semanales, mensuales y anuales de N y ΔN . Los semanales considerados por primera vez. Los resultados considerados ratifican, complementan o difieren de los publicados para el área sobre el mar. Se concluye, además, como nueva proposición en otro trabajo, que la sobrefracción no conductiva puede ser motivo de interferencias más allá del horizonte, papel este que se antes se reservaba solo para los conductos.

El trabajo ha formado parte del proyecto científico -ya concluido en 2023- 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 y expuesto en el Seminario la UIT Regional América de Mayo de 2023 [9]

2.-FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y CONCEPTOS BÁSICOS

En la Recomendación P-452-16 de la UIT [9], se describen los modos de propagación a largo plazo y los modos anómalos (a corto plazo)). De los últimos la propagación por "conductos", y por refracción en capas elevadas, son los más importantes que pueden causar interferencias sobre el agua y en zonas de tierra costeras (ver Fig. 1). Los niveles de señal pueden ser altos, en el primer caso hasta distancias superiores a 500 km sobre el mar, y 250 – 300 km, en el segundo. Para nuestro país estos fenómenos son de gran interés.

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 se forman las nubes, ocurre la propagación troposférica -la que está 100% relacionada con el clima-; la temperatura disminuye con la altura al ritmo medio de $-6,5^{\circ}\text{C}$ por kilómetro, hasta un valor de unos -50°C como límite superior. Las ondas normalmente se propagan siguiendo un trayecto afectado por la refracción, pero, cualquier anomalía puede producir, dispersión o reflexión,

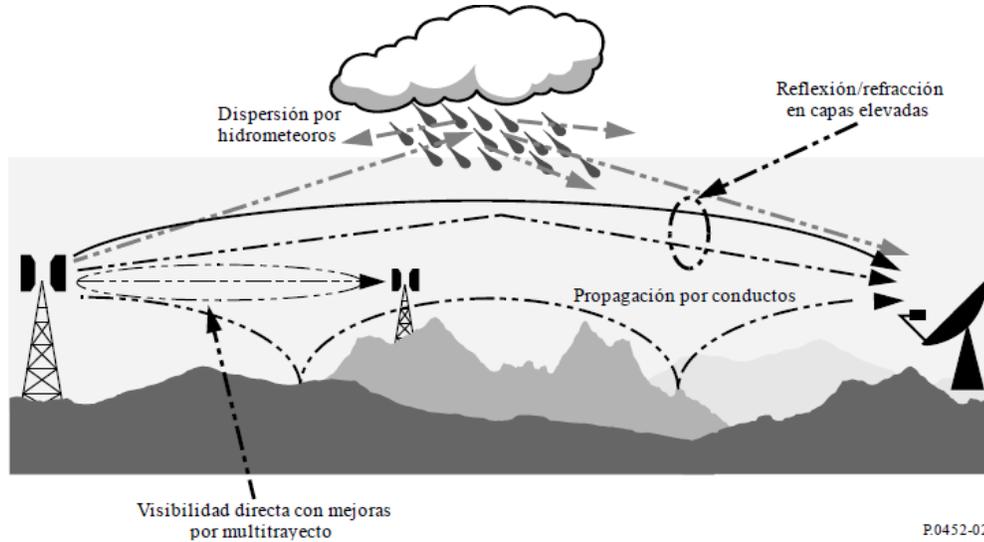


Figura 1
Mecanismos de propagación anómala de la interferencia (corta duración) [9].

en particular, en las señales de VHF, UHF (o microondas), lo que afecta su cobertura normal. Para considerar la curvatura del rayo refractado es tradicional (también en Cuba) emplear un radio ficticio de la Tierra a_e de 8500 km en vez del real (6370km). Se ha demostrado que sobre tierra ese valor no es el más adecuado sino un valor medio cercano a los 10000 km [1,5,10], pero poco se ha visto sobre el mar. El valor referenciado ha sido mejor precisado como medio anual.

2.1.1.- ÍNDICE Y COÍNDICE DE REFRACCIÓN

La troposfera puede considerarse un dieléctrico de permitividad ϵ_t formada por la mezcla del aire seco y del vapor de agua presentes en la misma, lo que da lugar a la estratificación de n_t con h , y a la refracción de los rayos. En ($h = 0$), y en una atmósfera, definida como normalizada [2], con características específicas de: temperatura, 20°C; presión, 1013 hPa, y humedad relativa del 60 % ($n_t = 1.000325$). Es más conveniente trabajar con el coíndice de refracción N [1,4-6]:

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

el que se relaciona con los parámetros meteorológicos de la atmósfera por:

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

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

Se emplea con frecuencia la relación entre la presión del vapor de agua e , y la humedad relativa H por:

$$e = \frac{H e_s}{100} \quad \text{hPa} \quad (3)$$

$$e_s = EF * a * \exp \left[\frac{(b-t) * t}{t+c} \right] \quad \text{hPa} \quad (4)$$

$$EF_{agua} = 1 + 10^{-4} [7.2 + p(0.0320 + 5.9 \cdot 10^{-6} \cdot t^2)] \quad (5)$$

donde t : temperatura en (°C)

H : humedad relativa (%)

e_s : presión del vapor de saturación (hPa) a la temperatura t (°C).

Para agua a, b, c y d son: $a = 6,1121$, $b = 18,678$, $c = 257,14$ y $d = 234,5$ (válidos entre -40° y $+50^\circ$).

2.1.2.- REFRACTIVIDAD Y GRADIENTE EN FUNCIÓN DE LA ALTURA

Referida a la altura h , el valor medio de n_t puede ser expresado por [1, 11]:

$$n_t(h) = 1 + N_0 \cdot 10^{-6} \cdot \exp\left(-\frac{h}{h_0}\right) \quad (6)$$

Siendo: N_0 es el valor promedio del coíndice al nivel del mar ($h = 0$), y
 h_0 : factor de escala de alturas (km).

N_0 y h_0 pueden ser determinados estadísticamente para cada altura y en cada localización. Como valores de referencia, se toman sus valores medios dados por: $N_0 = 315$ y $h_0 = 7.35 \text{ km}$ [11]. Para Cuba, N_0 y h_0 , propuestos son otros [12]. A partir de (1) y (6) se deduce el perfil $N(h)$ en unidades N y si en la superficie de la tierra ($h = h_s$), se identifica a N como N_s , este a partir de N_0 se describe por una ley exponencial. En la atmósfera normalizada el valor de N_s es de 325 unidades.

$$N_s = N_0 \cdot \exp\left(-\frac{h_s}{h_0}\right) \quad (7)$$

Para alturas hasta unos 2 km y $h_0 = 7.35 \text{ km}$, N se aproxima (7) mediante una ley lineal [4,5,11]

$$N(h) = N_s(1 - 0.136 h) \quad (\text{U/N}) \quad (8)$$

N y N_s experimentan variaciones *regulares* y *aleatorias*. Las estadísticas temporales y espaciales requieren múltiples mediciones de los parámetros meteorológicos y sus gradientes. Precisamente, la expresión (8) se destaca por su utilidad para las capas inferiores de la troposfera al hallar ΔN . Así, en el primer kilómetro de la atmósfera [1, 4,11] ΔN_1 se halla como:

$$\Delta N_1 = (N_s - N_1) \quad \text{U/km} \quad (9)$$

donde, N_1 es coíndice a la altura de 1 km. En los primeros 100 m (con frecuencia se toman 65 m) ΔN_{100} por:

$$\Delta N_{100} = \frac{N_s - dN_1}{100} \quad \text{U/m.} \quad (10)$$

Ambos gradientes ΔN_1 son muy empleados para el análisis de la refractividad o la estimación de la probabilidad de ocurrencia de “ductos” por presencia de guías de ondas atmosféricas y las condiciones de multitrayecto [12].

2.1.3.- RADIO DE CURVATURA DEL RAYO Y RADIO FICTICIO DE LA TIERRA a_e

Como se ha expresado, el rayo de las ondas experimenta una curvatura debida a ΔN , gradiente del coíndice de refracción. Como N varía principalmente con la altura, sólo se considera su gradiente vertical y la curvatura del rayo está contenida en ese plano. Si, además, el trayecto es casi horizontal y $\Delta N < 0$, la refracción se considera positiva (N decrece con h). Como $n_t \cong 1$, se obtiene la expresión (11) para el radio de curvatura ρ , que solo depende del gradiente de N en U/m [1-5]:

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{dn_t}{dh} = -\frac{dN}{dh} \cdot 10^{-6} = -\Delta N \cdot 10^{-6} \quad (11)$$

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

Para corregir el efecto de esta curvatura en las expresiones del campo de interferencia, en vez del valor real a , se considera que la Tierra tiene un radio ficticio a_e [1,4]. Con él se absorbe la curvatura del rayo sin alterar la curvatura relativa entre él rayo y la Tierra [4, 5, 13]. Para una variación lineal de N ($h < 2$ km), al considerar (11), se obtiene:

$$a_e = k_e * a = \frac{a}{1 - \frac{a}{\rho}} = \frac{a}{1 + a\Delta N \cdot 10^{-6}} \quad (12)$$

k_e , es el valor mediano (k_{e50}) del factor k_e del radio ficticio [13]. Al expresar a en kilómetros (6370) y ΔN en (U/km); la expresión (12) se simplifica y se puede determinar k_e por (13), válida solo si ΔN se expresa en (U/km) [4, 6, 13]:

$$k_e = \frac{157}{157 + \Delta N} \quad (13)$$

Por ejemplo, para la refracción estándar: $\Delta N = -40 \frac{U}{km}$; $k_e = 1.34 \cong \frac{4}{3}$; $a_e = 8547 \cong 8500$ km, valor realmente válido para climas templados [1,6]. En (10), dN_1 y N_s son definidos en (U/m) al igual que ΔN_{100} . Para poder emplear este gradiente en (13), hay que expresarlo en (U/km).lo por 1000.

Con frecuencia las características de la refractividad difieren del estado medio de la troposfera estándar, y por ello se clasifican en atención al valor: de ΔN , a_e y k_e . Si N crece con h se considera negativa ($\Delta N > 0$), el rayo se curva hacia arriba y la comunicación se interrumpe (poco frecuente). Si $\Delta N < 0$, se considera positiva (N decrece con h), los rayos se curvan hacia la Tierra y crece el rango de visibilidad directa (DMVD) entre antenas. La refracción positiva puede ser subdividida según los valores de estos parámetros y debemos señalar que a los efectos de las interferencias las más importantes son la sobre refracción y la refracción conductiva (ductos) por el incremento que experimenta el alcance de estas ondas [5,6].

Las condiciones meteorológicas en el área del Caribe y, por consiguiente en Cuba, dan lugar a mayores gradientes de N (más negativos), particularmente en los primeros cientos de metros de altura, respecto a los de 1 km. La consecuencia directa de ello es la ocurrencia de radios ficticios diferentes sobre el mar, los efectos de la sobrefracción o una mayor concurrencia de “ductos” que posibilitan interferencias. Este aspecto será motivo de otra publicación.

3.- PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS METEOROLÓGICOS Y REFRACTIVOS

Como se ha explicado se necesitan las mediciones de los parámetros primarios: T , p y e , hasta 2 km de h . 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], cada día, en dos horarios: las 07:00 horas y la 19:00 horas de Cuba. Generalmente, cada parámetro en cada altura alcanza hasta varios kilómetros (ver Tabla 1). Se describen: la humedad relativa RELH, Hr en % (RELH: cociente de la humedad del aire y la humedad de saturación); la temperatura t , grados Celsius (TEMP) y la presión p en hPa (PRES).

Los datos tomados de p , $t(^{\circ}C)$ y $Hr\%$ se basan en los sondeos meteorológicos realizados en Cayo Hueso, y otras localizaciones en el entorno de nuestro país (Miami, Jamaica, Yucatán, etc.). Con la expresiones (3-5) tomadas de la UIT-R 453 [11], o el procedimiento tradicional de Haltiner [15], se hallan los valores de tensión saturante del vapor de agua (e_s) y la tensión del vapor de agua e ; además, con (14) la temperatura en $^{\circ}K$:

$$T = t^{\circ}C + 273, \text{ } ^{\circ}K \quad (14)$$

Posteriormente, con los valores de: p , e y T , y las expresiones: (2, 9,10), se hallan los valores de N y su gradiente ΔN . Con las fórmulas (12-13), se estima el radio ficticio y k_e . Recuerde que sobre el mar $N_s = N(0)$.

3.1 VALORES OBTENIDOS DE N, ΔN Y a_e SOBRE EL MAR EN EL ENTORNO DE CUBA

En este apartado se pretende resumir los principales resultados obtenidos de los gradientes de N, M y el radio ficticio, dentro del mar en la costa norte de Cuba acuerdo con los objetivos del trabajo

Tabla 1
 Archivo HTML descargado del sitio web de la Universidad de Wyoming[8]

72201 EYW Key West Observations at 00Z 01 Oct 2020										
PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	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

El estudio se inicia al guardar los ficheros de los datos brindados por la Universidad de Wyoming para la estación de Cayo Hueso, desde su sitio web [8]. Se descarga la información mensual para cada día y mes durante los últimos 5 años (2016-2020). Las mediciones se muestran en los dos horarios: 00 (7 am de Cuba) y 12 (7 pm de Cuba) y se promedian por día. Una vez organizados los archivos, por meses y años, en formato HTML, se procede a la lectura de los mismos desde Matlab. La información útil se reescribe en archivos de texto para derivar los cálculos de N y ΔN y se guardan en una carpeta llamada "Mediciones. En la Tabla 1 se muestran, como ejemplo, los datos correspondientes al día 1 del mes de Octubre, (hora 00, estación 72201- Cayo Hueso); los parámetros meteorológicos: necesarios, en las columnas 1, 3 y 5 respectivamente. La altura h aparece en la columna número 2 en metros

Las columnas y las alturas que no son de interés (más de 2000m) son eliminadas. Las transformaciones o programas se han procesado en Matlab. Los resultados son tabulados, graficados y analizados según los diferentes procedimientos a continuación:

1. Procedimiento para la obtención de archivos HTML de los datos de radiosondeos
2. Procedimiento de lectura y transformación de los ficheros HTML a TXT con Matlab
3. Procedimientos para el cálculo de los parámetros eléctricos de la troposfera:
 - a. Coíndice de refracción (N) (o el modificado M al tratar con los ductos)
 - b. Para recoger datos de N sobre la superficie, Ns, pero promediando ambos horarios.
 - c. Para obtener los promedios, las medianas y las desviaciones estándar de N en períodos: semanales, mensuales y anuales.
 - d. Para la determinación del gradiente (ΔN) para el primer kilómetro y los 100 m de altura
 - e. Determinación del radio ficticio (a_e) y su factor (k_e), para alturas inferiores a un kilómetro, o para 100 m.

A partir de los procedimientos 1 y 2 referenciados, y con la organización secuencial de datos descritos en el procedimientos 3, se analizan los parámetros estadísticos (promedio, mediana y desviación estándar) en períodos semanales, mensuales y anuales. Se presentan más adelante los resultados organizados en tablas o gráficas.

Un Procedimiento 4 para determinar la ocurrencia temporal de la superrefracción y de los ductos hasta 2000 metros de altura, para los (CE) o hasta 100 para los (CS) es objeto de un trabajo posterior.

3.2 VALORES MEDIOS Y MEDIANOS DE Ns: SEMANALES, MENSUALES Y ANUALES [9,15]

Al analizar los resultados anuales de promedio y mediana del coíndice: Ns = No, sobre el mar (Ver Tabla 2), se observa que los valores medianos son muy próximos a los promedios anuales (Fig. 2). No obstante, el proceso no se puede estimar Gaussiano y lo más frecuente, es tomar el valor medio. El valor medio obtenido durante los cinco años de estudio es: *No* = 371.12, (línea discontinua), el cual es muy próximo al valor medio anual que brinda la UIT [9,11] para el Caribe (*No* = 370), que es índice de prueba y validación.

Tabla 2
Valores anuales medios y medianos de Ns sobre el mar [9,15]

Años	2016	2017	2018	2019	2020
Promedios	371.85	371.06	367.92	371.05	373.76
Medianas	376.52	375.29	373.44	374.98	378.59

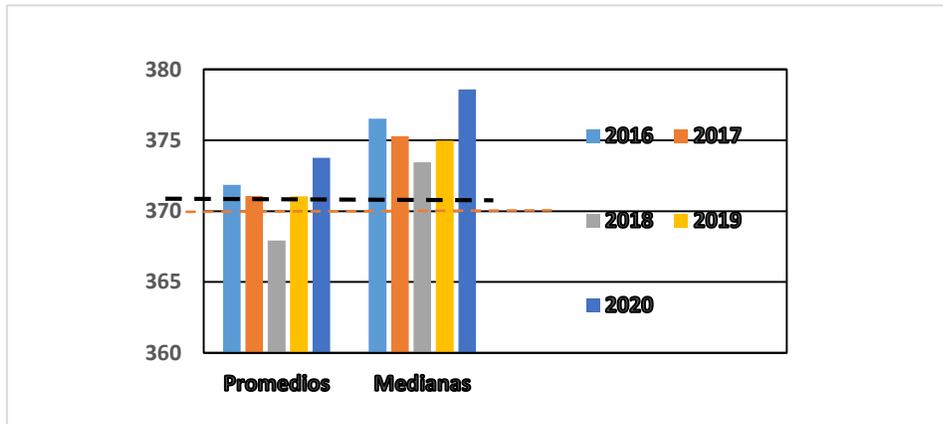


Figura 2
Comportamiento medio y mediano anual de Ns en el mar [9,15].

Los valores medios **mensuales** de No se pueden ver en la Fig.3 para el período 2016-2020. En los meses de noviembre a abril, No se encuentra entre 350 y 370 (U/N), por debajo del valor medio obtenido para el período; de mayo a octubre los valores crecen, desde 370 hasta 390 (U/N), por encima del valor medio propuesto. Las correspondientes tablas en [9,14].

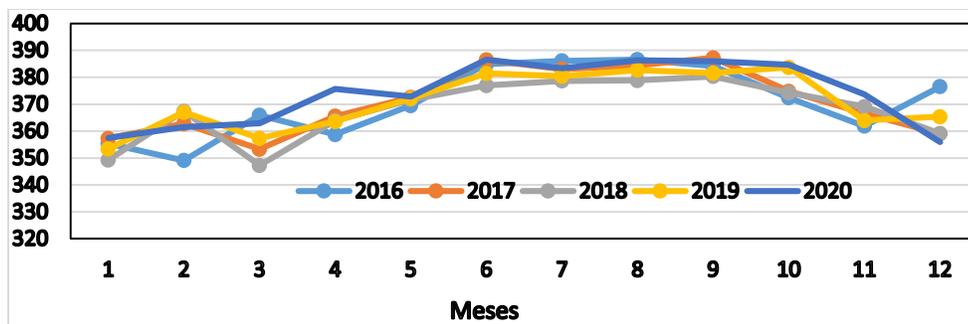


Figura 3
 Valores mensuales medios de N_o en el período 2016-2020 [9,14].

Los gráficos de promedios de N_o en períodos semanales son referenciados en [14]. Igualmente, la desviación estándar promedio de N_o sobre la superficie del mar se acerca a las 16 unidades, valor no bajo. No obstante, en los meses de enero, marzo, abril y mayo, las desviaciones son algo mayores; de junio a septiembre se reducen al rango de 5 a 8.5 unidades N.

3.3 VALORES MEDIOS SEMANALES, MENSUALES Y ANUALES PARA $\Delta N1$ (1 km) [9,14]

En la Fig 4 se dan los resultados anuales del promedio de $\Delta N1$ sobre la superficie del mar. Se halla que el valor medio durante el período es: $\overline{\Delta N1} = -64.78$ U/km, ($k_e = 1.7$, $a_e = 10844$ km), el cual se propone como nuevo resultado medio sobre el mar (línea punteada) superior a los valores obtenidos sobre tierra (10000) en el país. Esto reafirma lo dicho de los alcances superiores sobre el mar, aunque aún no se pueda dar un resultado definitivo más exacto.

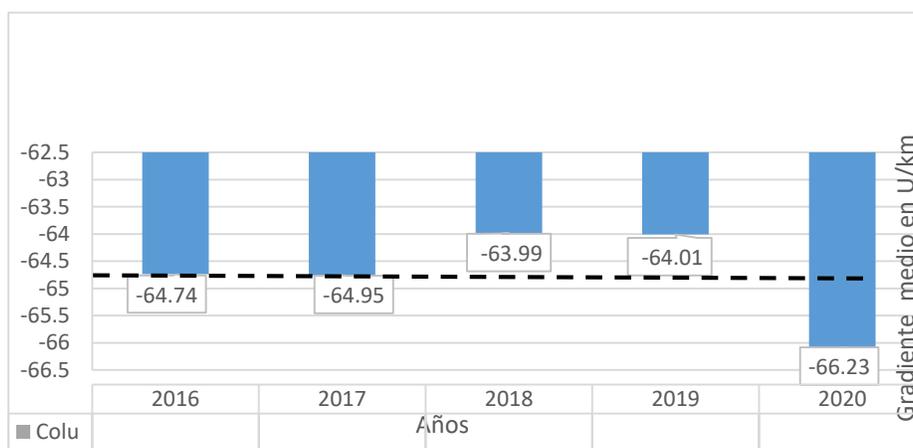


Figura 4
 Comportamiento medio anual de $\Delta N1$ en U/km [9,14].

El valor promedio anual obtenido difiere del rango propuesto por la UIT [10] para nuestra región que es de: (-50 hasta -60 U/km). Más exactamente, la recomendación propone (por meses) para febrero, un rango de (-50 a -55 U/km); para mayo y agosto, un valor de -60 U/km y, para noviembre de -50 U/km. Es decir, en ninguno de los años los valores medios actuales hallados se encuentran dentro de estos rangos (Fig. 4). Por ser los datos meteorológicos específicos de la región - no se puede considerar así los $\Delta N1$ propuestos por la UIT en [10]-, se propone el actual como valor medio anual de gradiente $\Delta N1$.

Esta proposición es confirmada por la mayor cercanía al valor medio propuesto por Lányer en [12], para la costa norte de La Habana (- 60.83). Como hipótesis tomamos que la costa norte debe tener características meteorológicas cercanas a las del mar y por eso es una gran referencia de apoyo a nuestro trabajo en ausencia de otra. Este, valor aunque en módulo es algo inferior al actual, es mucho más cercano al nuestro que el propuesto por la UIT. Además, el valor medio que se propone

sobre tierra es inferior (en módulo) al actual, lo que ratifica las diferencias entre tierra y mar. Aunque, Cayo Hueso no es región completamente marina, es tierra rodeada por mar, o sea es más afectado por este que la costa norte.

Los valores medios mensuales calculados para $\Delta N1$ (Fig 5) están en el rango de: (-74 hasta -55 U/km) tal como se corrobora en los datos de la Fig. 5. Por otro lado, los valores mensuales de $\Delta N1$ obtenidos por Lányer sobre tierra, específicamente en la región de La Habana, oscilan en el rango de (-75 a -50 U/km) -, que son cercanos a los propuestos en este trabajo, lo que refuerza su validez. Esto ocurre así porque los datos fueron tomados en la costa cercana al mar de La Habana, ocurriendo un comportamiento similar al nuestro lo que refuerza la hipótesis planteada.

Los gráficos de promedio de $\Delta N1$ en períodos semanales se encuentran en el Anexo B de la referencia 22 dada en [14]. Un ejemplo de comportamiento similar a los demás años, se muestra en la Fig. 6 para el año 2018. Las semanas que cubren los veranos muestran tendencias a gradientes menores donde crece el radio ficticio.

En los resultados anuales de la desviación estándar de $\Delta N1$, se obtiene que el promedio en los cinco años es cerca de 12 U/km. lo que puede estar afectado por el tamaño limitado de la data estudiada

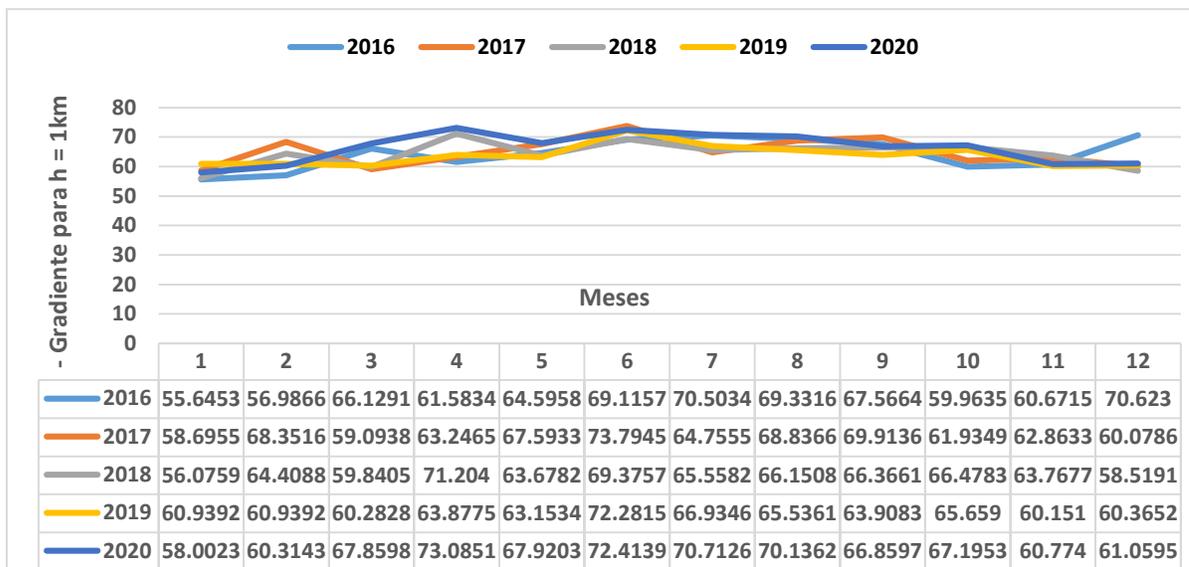


Figura 5
 Comportamiento medio mensual de $\Delta N1$ en U/km [9,14]

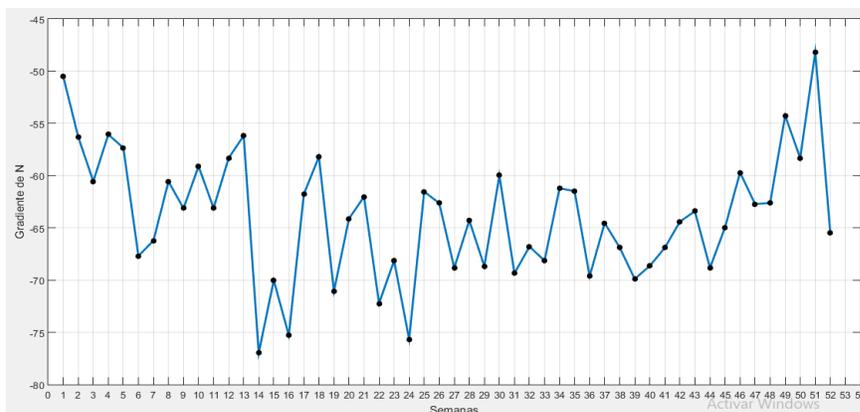


Figura 6
 Promedios semanales de $\Delta N1$ en U/km en el año 2018 [14]

3.4 VALORES MEDIOS SEMANALES, MENSUALES Y ANUALES PARA a_e y k_e (1 km)

Los resultados medios anuales de (k_e) y (a_e), en el primer kilómetro de altura sobre mar [9,14] se muestran en la Tabla 3. El promedio de los cinco años es: $k_e = 1.7561$ y $a_e = 11186.3$ km. Los valores medios anuales hallados son superiores a los propuestos para trayectos sobre tierra (cercaos a 10000km) en Cuba [1, 6,12], pero menores que el propuesto por Gray (15230) para trayectos sobre mar [16]. Esta novedad se reafirma por el propio Gray: “en el mar el radio ficticio debe ser muy superior sobre todo en los primeros 100 m de altura”. El último detalle es analizado después.

Tabla 3
 Valores medios anuales de k_e y a_e (km) para $h = 1$ km [9,14]

Años	2016	2017	2018	2019	2020
k_e promedio	1.7545	1.7534	1.7431	1.7341	1.7954
a_e promedio	11176.190	11168.934	11103.584	11046.2912	11436.499

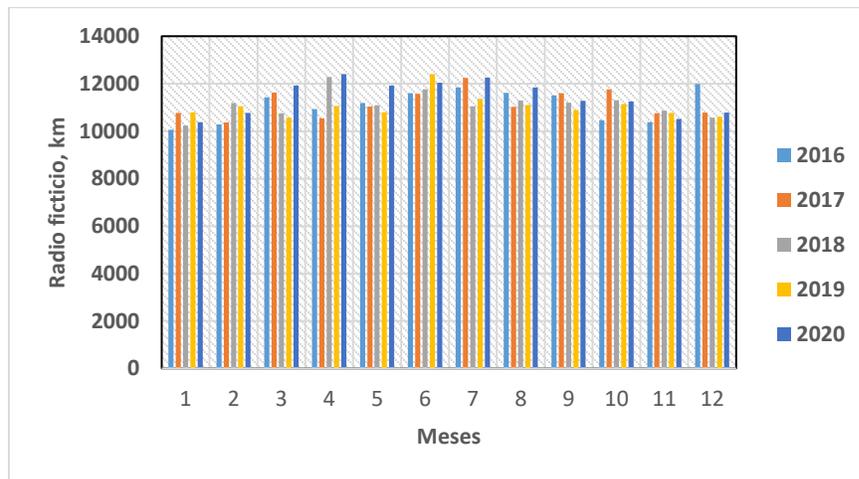


Figura 8
 Promedios mensuales de a_e en el periodo 2016-2020 [9, 14].

Los valores medios mensuales calculados para k_e y a_e (km) para 1 km, están en los rangos de: ($1.57 < k_e < 1.94$), o de: ($10061 < a_e < 12415$) km. Esto se aprecia en la Fig. 8 para a_e . Los resultados son siempre superiores al rango de (9300 a 10300) determinados sobre tierra, pero, también, muy inferiores al propuesto por Gray [16] para el mar ($k_e = 2.4$; 15230 km). En los valores medios semanales, en algunas semanas cercanas al verano, a_e puede alcanzar la cifra de 12000 km o más.

3.5 VALORES MEDIOS SEMANALES, MENSUALES Y ANUALES PARA EL GRADIENTE ΔN_{100}

Un análisis similar [9,14] fue realizado en los parámetros eléctricos para los primeros 100 metros de altura sobre el mar y en iguales períodos. Los estudios radiometeorológicos para las condiciones de Cuba en alturas hasta 200m son, escasos. Esta carencia obliga a que se utilicen los valores de las recomendaciones de la UIT cuyos resultados son a macroescala, sin considerar las condiciones particulares que caracterizan a la Isla. Al igual que para 1 km, la UIT [11] brinda, datos estacionales de ΔN_{100} en los primeros 65 metros. Se aprecia que el valor medio *mensual*, en febrero y noviembre, es de (-55 a -50) U/km; mientras que para mayo y agosto es de -60 U/km [11].

El primer estudio radioclimático del que se tiene conocimiento en el país fue el realizado en el año 1984 por los Ingenieros Martínez Brunet, Martín Hernández y R. Hourruitiner del Instituto de Geofísica y Astronomía solo para La Habana [17]. Se dan a conocer los valores medios anuales y mensuales de ΔN_{100} , durante más de 3 años (no en el mar). El valor medio *anual* para ΔN_{100} fue de **-59.1 U/km** ($k_e=1.6$, $a_e = 10215$). Los medios mensuales oscilan desde -53.8 hasta -64.7 (U/km). Solo en septiembre a_e se aproxima (10850) a 11000 km. En general, son más próximos a los propuestos por la UIT en [11]. En investigaciones posteriores, Lányer [12], para el periodo 1993-2001, ha determinado como valor medio anual confiable, en los primeros 100 m, el obtenido para la localización de “El Brinco”.

Nuestro trabajo se ha orientado a los resultados promedio anuales del gradiente ΔN_{100} , específicamente en los 65 metros, sobre la *superficie del mar* (Tabla 4). Se observa que ΔN_{100} promedio durante los cinco años de estudio es: $(\Delta N_{100} = -55.38 \frac{U}{km})$, para el cual: ($k_e = 1.545$, $a_e = 9841$ km). Este valor se encuentra en el rango dado por la UIT para nuestra región (de -50 a -60) U/km [11], lo cual es significativo.

Tabla 4
Valores anuales medios de ΔN_{100} en U/km a 65 metros de altura [14]

<i>Año</i>	2016	2017	2018	2019	2020
Promedio	-55.49	-55.373	-54.90	-55.37	-55.77

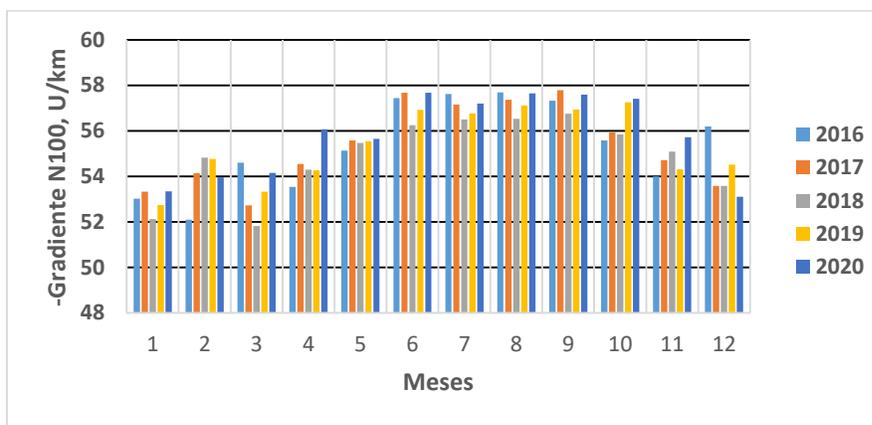


Figura 9
Media mensual de ΔN_{100} U/km a 65 m de altura [14].

Los valores obtenidos medio *mensuales* de ΔN_{100} , en los meses de noviembre a abril, se encuentran en un rango de: **(-55 a -52) U/km**. Para los meses de mayo a octubre son más negativos, rango de **(-57.5 a -55.5) U/km**. Este comportamiento se aprecia en la Figura 9 para todo el período con una mayor fortaleza en el verano (mayo a octubre). Para el gradiente *medio mensual* de ΔN_{100} , Lányer presenta valores que oscilan entre: -173 a -71 U/km, para la costa norte de La Habana, lo cual se aleja del actual resultado por lo que merece atención futura. Las gráficas de promedio para los valores de ΔN_{100} en U/km a 65 metros de altura en períodos *semanales* se encuentran en el Anexo 2 de la referencia 23 [14].

3.6 VALORES MEDIOS SEMANALES, MENSUALES Y ANUALES PARA a_e Y k_e PARA 65 m

Para a_e y k_e se muestran los resultados *promedios anuales*, específicamente en los 65 metros, sobre el mar se muestran en la Tabla 5 y la Fig. 10 obtenidos durante los cinco años de estudio. Los valores medios anuales son: ($k_e = 1.54$) y ($a_e = 9847.738$ km) -(línea rayas pequeñas para k_e y rayas largas y puntos para a_e -). Estos valores se aproximan a los hallados en otros trabajos para trayectos sobre tierra, pero muy inferiores a los propuestos en el trabajo para 1 km sobre mar. Otra cosa ocurre con los valores medios mensuales.

Tabla 5

Valores medios anuales de (k_e) y (a_e) a 65 m sobre el mar [15]

<i>Año</i>	<i>2016</i>	<i>2017</i>	<i>2018</i>	<i>2019</i>	<i>2020</i>
<i>Promedio k_e</i>	1.54	1.54	1.53	1.54	1.55
<i>Promedio a_e</i>	9859.4	9847.4	9801.03	9845.35	9885.8

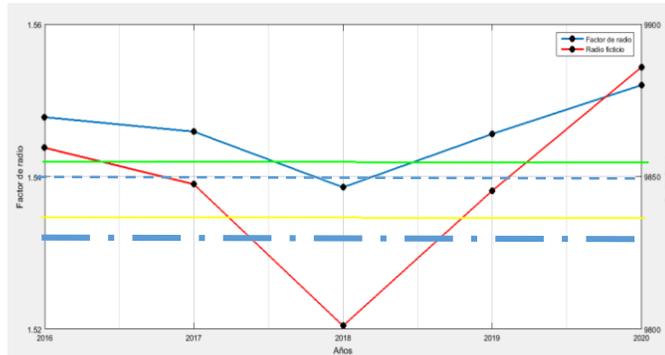


Figura 10

Valores medios anuales de k_e y a_e a 65 metros sobre mar [15].

Los valores promedio mensuales calculados para k_e y a_e , en los primeros 100m se muestran en la Fig. 11. Al comparar con los resultados de Douglas [18] y de Lányer [12] obtenidos para el mar, estos se encuentran en el entorno de los aquí hallados, lo cual es significativo. Así, para Douglas, los valores de a_e oscilan de (7900 a 10000 km) - Fig.12-; para Lányer entre (7655 a 14543) km; en el trabajo actual, el rango en km es más restringido: (9515 a 10082) km, o sea, más apegado a los 10000 km, lo cual es significativo, por lo que en general se alejan de lo expuesto por Gray (15230 km).

Sin embargo, es curioso que, en nuestro caso, los valores más altos del promedio se presentan con tendencia al verano -de marzo a octubre-, mientras que en Douglas, la tendencia aparece invertida (octubre-mayo), pero para 38 años. Compárese las Fig. 11 y 12. Este sorprendente resultado ratifica la necesidad de ampliar el rango de años de la investigación, en todas sus facetas.

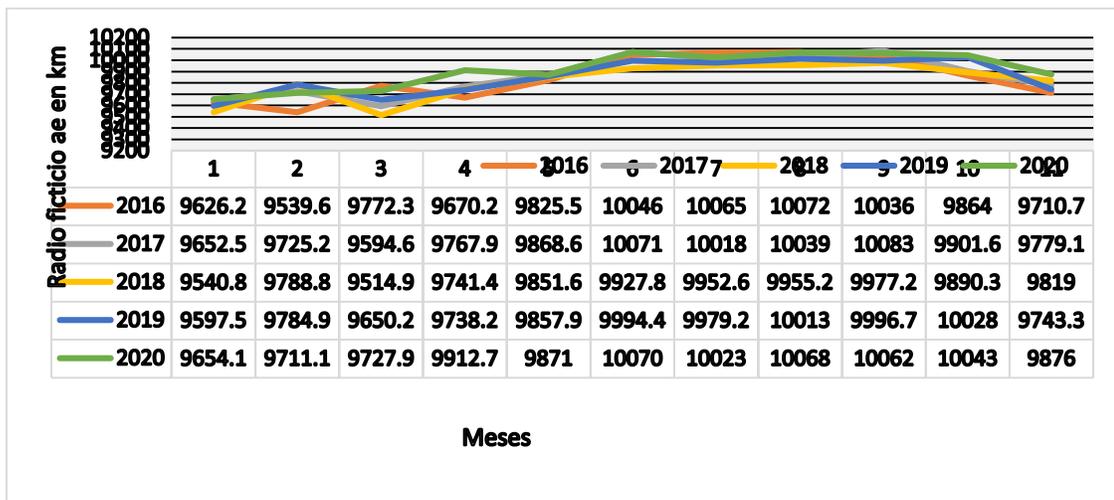


Figura 11

Valores medios mensuales de a_e en km para 65 m de altura [14].

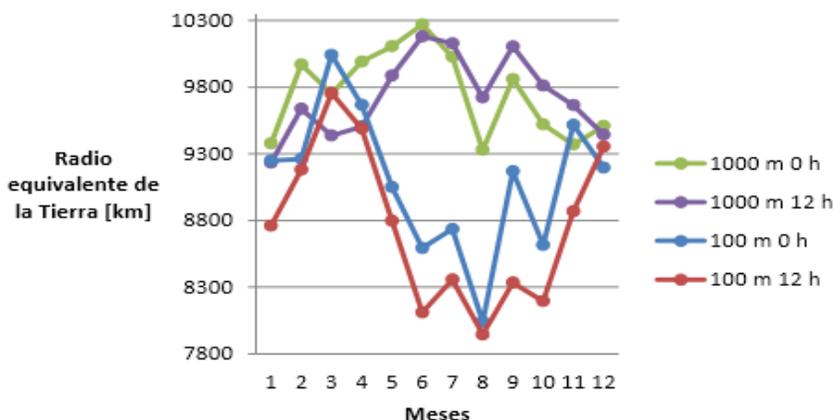


Figura 12

Radio ficticio para 100 y 1000 metros sobre el mar [18].

Como se puede apreciar en la gráfica de la Fig. 11, el empleo del valor medio mensual es más útil en los meses (Mayo. Octubre), pues en este período se acerca al valor de 10000 km, ya previsto como valor medio anual (rango de 9600 -10000 km). Este hecho constituye una novedad que refuerza la tesis de los 10000 km. No obstante es necesario generalizar estos resultados con mayor número de años de análisis.

Las gráficas de promedio para los valores de k_e y a_e a 65 metros de altura, en períodos *semanales*, se encuentran, en los Anexos 3.5 - 3.9 de la referencia 23 [14]. En ellas los valores del gradiente se reducen notablemente entre la semana 21 (Mayo) hasta la 42 (Octubre), lo cual es una tendencia general para todos los años y para el gradiente a 1 km. Ocurre un incremento de a_e en ese rango de semanas y se alcanzan valores de 10000 a 10100 km, lo cual rechaza la hipótesis de mayores radios (más de 12000km) sobre el mar para alturas menores de 100m.

3.7 RESULTADOS PRINCIPALES INICIALES y CONCLUSIONES

Los resultados del trabajo presentado se resumen en:

1. El valor medio de N_0 en el período es de 371, el que ratifica el resultado presentado por la UIT para la región (370).
2. Hay algunas discrepancias de los valores medios anuales de ΔN_1 y a_e presentados por diferentes autores para el mar cercano a nuestras costas. El valor medio anual actual para 1 km es de: $a_e = 11186.3$ km ($k_e = 1.756$), lo cual es un resultado novedoso. Para los primeros 100m, el valor medio de $a_e = 9847.738$ km ($k_e = 1.54$), lo cual ha sido ratificado por la UIT y los otros autores mencionados.
3. Los valores medios anuales actuales para 1 km, están en el rango de: $(10061 < a_e < 12415)$ km, superiores a los obtenidos en tierra y para el mar en alturas bajas, hasta 100m. Ambos resultados se alejan de las hipótesis de Gray (valores superiores a 15000 km a_e). Ante la incertidumbre, para enlaces elevados, se recomienda emplear como valor medio anual: **11186 km**, o también, en cada mes, los de la Figura 5. Para los enlaces superficiales, menos de 65 m, el valor ratificado en el punto 2 - valor medio anual de **9848 km**-, o los valores medios mensuales de la Fig. 10.
4. Los valores mensuales medios de a_e para el mar y bajas alturas, difieren ligeramente entre si en los diferentes autores, aunque no lejos de 10000 km, pero los actuales están más centrados en esa cifra. Esto es significativo porque se alejan de las propuestas iniciales de Gray en 1961, pero halladas para trayectos transhorizonte (15230 km).
5. Los valores del gradiente semanal tienen tendencia general a reducirse entre la semana 21 (Mayo) y la 42 (Octubre) en todos los años. Esto redundará en un incremento de a_e en estos períodos con valores de 10000 a 10100 km en varias semanas, lo cual rechaza la hipótesis de radios sobre el mar de 12000 km.

En general, se concluye que, debido a las diferencias entre algunos resultados actuales. La UIT y otros autores, estos no deben considerarse definitivos. No obstante, son una propuesta esclarecedora y novedosa cuya fiabilidad debe ratificarse o corregirse con más años de estudio.

Los valores medios sobre el mar presentados son para la costa norte del país y no se ha referenciado prácticamente nada para la costa sur.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean reconocer a todos los investigadores que con su trabajo abnegado durante muchos años han realizado los trabajos experimentales que han permitido realizar este análisis sobre la importancia de tomar, en las decisiones de nuestros técnicos e ingenieros, un radio ficticio o niveles de refractividad más acordes a nuestras realidades climatológicas

REFERENCIAS

1. Sandianes Galvez, J.R. Algoritmos de la propagación de las ondas de radio para calcular el alcance de un radar costero, Monografía, Universidad Tecnológica de La Habana (UTH), 2020, ISBN: 975-959-261-604-2, Reporte 10/2020, p. 3.
2. Dolukhanov, P. Propagation of Radio Waves., de la edición rusa, Cap 1, Editorial MIR, Moscú, 1971.
3. Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), Rec. UIT-R P.525-3, Cálculo de la atenuación en el espacio libre, Disponible: <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>, Ginebra, Suiza, 2016. .
4. Rábanos, J.M. Transmisión por radio, 6ta ed., Editora universitaria Ramón Aceres, Madrid, España, Cap 2, p.74, 2008.
5. 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, UTH, La Habana, Cuba .
6. 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, Universidad Tecnológica de La Habana, 2021; 21(1): 54-65
7. Unión Internacional de Telecomunicaciones, Rec. UIT-R P.617-3, Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems, 2014, Disponible: <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>. Ginebra, Suiza
8. University of Wyoming [database on the Internet]; Accedido en 2021. Available from: <http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
9. Pérez Garlobo L, Marín Y, Sandianes, J.R. Reporte: "Sistema para la predicción y alerta de interrupción a las comunicaciones por anomalías en las condiciones de propagación, Memorias del Seminario Regional América de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), 2023.
10. Unión Internacional de Telecomunicaciones, Rec. UIT-R P.452-16, Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz, Disponible: <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>, Ginebra, Suiza, 2020.
11. Unión Internacional de Telecomunicaciones, Rec. UIT-R P.453-14, Índice de refracción radioeléctrica: su fórmula y datos sobre la refractividad, Disponible: <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>, Ginebra, Suiza, 2019.
12. 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, Instituto Técnico Militar "José Martí": La Habana, Cuba, 2009.
13. 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/es>, Ginebra, Suiza, 2017.
14. Sandianes Galvez, J.R.; Pérez Garlobo, L; López Pérez, A.P.; Morejón González, M. Caracterización de la refractividad y los ductos troposféricos en el estrecho de La Florida"; Universidad Tecnológica de La Habana (UTH), Monografía – Report, ISBN: 978-959-261-616-5, 11/ 2022
15. Haltiner, G.J., Martin, F. L., Dynamical and Physical Meteorology, Ediciones ACC, La Habana, 1968.
16. Gray, R.E. Tropospheric scatter propagation and meteorological conditions in the Caribbean", IRE Transactions on Antennas and Propagation, EUA, September, 492-496, 1961.
17. Brunet Martínez R., Martín Hdez R., Hourrutiner Barreto R. Caracterización preliminar de la Refractividad de la Troposfera Inferior de Cuba, Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio, Academia de Ciencias de Cuba, (8), 1984
18. Ruiz Douglas A. Análisis del Comportamiento de la Refractividad y el Campo Transhorizonte en el estrecho de La Florida, Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica de La Habana (Cujae), 2012. <https://www.cujae.edu.cu>

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. Las opiniones expresadas aquí son únicamente responsabilidad de los autores.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

José R. Sandianes Gálvez: Sus principales contribuciones consisten en la conceptualización, idea y objetivos del artículo, su preparación, escritura y desarrollo, así como la revisión crítica de cada una de las versiones del borrador y la conformación de la versión final a publicar después de su análisis con los otros autores. Ha revisado todos los resultados obtenidos, comparando con los publicados en las referencias nacionales y extranjeras. Ha estructurado los procedimientos expuestos para el logro de los resultados.

Lányer Pérez Garlobo: Sus principales contribuciones radican en el acabado de la conceptualización e idea del trabajo y el aporte de programas para la obtención de datos empírico-experimentales actualizados que contribuyeron a su elaboración del artículo. Además, ha contribuido con su experiencia en la Propagación de Ondas de Radio lo que ha influido en la revisión crítica de su primera versión, la aprobación de la versión final y el logro de sus objetivos.

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, Cuba (UTH). 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 estas ramas, en diferentes instituciones ramales y nacionales del país. Ha expuesto trabajos y obtenido diversos premios en varios eventos nacionales e internacionales (Fóruns de Ciencia y Técnica Nacionales y Ramales, Informática y varias ediciones de CITTEL hasta 2022). 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. Ha participado en un proyecto del Programa Ramal del MINCOM en el período 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. En Profesor Titular desde el 2015 y Profesor e Investigador del ITM, Miembro de su Consejo Científico y de la Comisión de Grados Científicos. Se desenvuelve en el campo de la Electrodinámica, la Propagación de las Ondas de Radio 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 2022). 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. 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/)