

# ARTÍCULOS



**BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO**

**ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR**

**OPERACIÓN DE SISTEMAS DE RADAR DE VIGILANCIA  
DE CAMPO DE BATALLA BAJO CONDICIONES DE  
CAMANCHACA**





# OPERACIÓN DE SISTEMAS DE RADAR DE VIGILANCIA DE CAMPO DE BATALLA BAJO CONDICIONES DE CAMANCHACA

MAY. (IPM) Juan La Rivera Rentería.<sup>1</sup>

**Resumen:** *En el campo de batalla moderno uno de los principios importantes es la sorpresa, adelantándose a las acciones del adversario. Para tal efecto, es que existen sistemas de Comunicaciones, Mando, Control e Inteligencia (C3I, por sus siglas en inglés), que integran una variedad de información que se encuentra disponible para el comandante en tiempo real. Una de las fuentes de información que alimentan con datos estos sistemas son los radares de vigilancia del campo de batalla. Un posible escenario que podría presentarse durante el empleo táctico de radares de vigilancia del campo de batalla, sería el emplazamiento de este tipo de sistemas donde la geografía genere las condiciones adecuadas para tener nieblas con una densidad tal que afecte el normal funcionamiento de estos sensores con respecto a la amenaza que busca detectar. A la luz de lo anterior, y debido a que en el país existen publicaciones científicas del fenómeno llamado “camanchaca”, la que se ha caracterizado por afectar a diversos sistemas tales como enlaces microondas, comunicaciones VHF, entre otros, es que nace la necesidad de estudiar este fenómeno y brindar una herramienta sencilla al comandante, que le permita resolver mejor respecto al empleo de sus medios. Finalmente, se busca estudiar rigurosamente la influencia de la camanchaca en sistemas electrónicos, en especial en sistemas de radares en el norte del país y determinar su efecto en términos de rendimiento.*

**Palabras claves:** *Radar, camanchaca, planificación, atenuación electromagnética, visibilidad.*

**Abstract:** *In the modern battlefield one of the most important principles is the surprise and anticipates to the adversary actions. It is for that reason that the Communications, Command, Control and Intelligence systems (C3I, for its acronym in English), which integrates a variety of*

---

<sup>1</sup> Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Electrónica. Msc. PUC



*information that is available to the Commander in real time. One source of information that feeds data for these systems, are the battlefield surveillance radars. If we consider possible scenario where the tactic use of battlefield surveillance radars could be affected due atmospheric conditions like mist with a density enough to affect the normal performance of that system. So it is looking closely study the influence of the Camanchaca in electronic systems, particularly radar systems in the North of the country and determines its effect in terms of performance.*

**Key words:** Radar, camanchaca, planning, electromagnetic attenuation, visibility.

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales sensores utilizados en el campo de batalla para la obtención de información en los sistemas de Comando, Comunicaciones, Control e Inteligencia (C3I), son los sistemas de radar en general, en especial los de campo de batalla que brindan información sobre movimientos de personas y vehículos tanto aéreos como terrestres. Estos son utilizados normalmente para el control y vigilancia de pasos, instalaciones, explanadas y otros sectores de gran tamaño con una reducida cantidad de medios humanos.

Debido a lo anterior, es de suma importancia conocer, para la fuerza terrestre, las verdaderas capacidades y limitaciones de estos sistemas, en especial en zonas donde las condiciones meteorológicas y climatológicas varían mucho dentro de un mismo día, como por ejemplo, cuando se produce la camanchaca en el norte del país.

A la fecha existen diversos antecedentes donde se exponen situaciones en sistemas de radar que trabajan en la banda "X" (8 a 12 GHz) viendo afectado su desempeño debido a situaciones extremas de niebla o neblina, como lo experimentado en sistemas de radar emplazados en la bahía de Delaware (EE.UU.) [2] donde se verificó, por los prácticos M. Linton, P. Ives y W. Lowe de la de la Pilot Association, que el rango de detección del radar variaba de los 37 a 17 km, o incluso menos al momento de existir neblina extremadamente densa.

Por otro lado, se encuentran documentados con mayor frecuencia problemas referidos al área de las telecomunicaciones, como por ejemplo, casos en enlaces microondas en condiciones semidesérticas en la India [3] o en Lituania [9], que son zonas donde se presentan fenómenos similares a la neblina y que están fuera de las consideraciones técnicas estándar junto con características similares a la camanchaca chilena.



Para lo anterior, en el ámbito de las comunicaciones la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) [10] tiene recomendaciones técnicas específicas como la UIT-R P.840-5 para casos de atenuación debido a nubes y niebla. Otros investigadores [1] establecen a base de una función entre longitud de onda, atenuaciones y temperatura una corrección que permite agregar estas pérdidas a los cálculos de enlace. Por otro lado, [4] plantea un modelo de propagación de ondas electromagnéticas en la tropósfera utilizando ecuaciones parabólicas.

Cabe destacar que todos los métodos anteriormente nombrados utilizan como parámetro principal el contenido líquido del medio o Liquid Water Content (LWC) por sus siglas en inglés, el que caracteriza, en términos la cantidad de agua, distribución volumétrica y tamaño de las gotas en suspensión en la neblina.

Si bien existen técnicas que permiten aminorar el efecto de este tipo de fenómenos atmosféricos, como lo son los cambios de polaridad en las antenas, uso de radares digitales, mejora en las etapas de proceso de señales, estas últimas son válidas en su mayoría para sistemas de gran envergadura y no aplicables a sistemas sencillos y altamente transportables como los radares de campo de batalla en general.

Por otro lado las investigaciones referidas al problema que afecta a sistemas de radares militares en otros países, con un mayor desarrollo y maduración de este tipo de tecnologías, son con características secretas o acceso restringido.

En otro ámbito, el Centro del Desierto de Atacama de la Pontificia Universidad Católica de Chile, que dentro de sus objetivos principales tiene como misión *“Ser una plataforma interdisciplinaria para desarrollar ciencia y tecnología aplicada en las zonas áridas y semiáridas de Chile”*, es el lugar que cuenta con la mayor cantidad de información científica formal respecto a las zonas desérticas en Chile, reconocido internacionalmente.

Debido a lo anterior, y como polo de desarrollo y conocimiento en este ámbito es donde se produce la mayor cantidad de publicaciones y conocimiento formal referido a la neblina y camanchaca en el país. Por este motivo existe una gran cantidad de información estadística e histórica sobre la acumulación de agua por atrapanieblas y el LWC en esas zonas.

## **2. DESARROLLO**

### **2.1. Pérdidas por condiciones atmosféricas**

La atenuación de las señales de radar debido a absorción en la tropósfera se pensaba que no era importante bajo los 10 GHz. Como sea, cálculos realizados subsecuente-



mente indican que a frecuencias de tan solo algunos pocos mega Hertz, una significativa absorción puede ocurrir debido a propagaciones a través de largas distancias en la troposfera. Por ejemplo, este fenómeno podría suceder al realizar búsquedas sobre el Campo de Batalla con bajos ángulos de elevación. [8]

En la figura N° 1, se muestran las pérdidas por absorción para el caso de la señal desde y hacia el blanco, a diferentes ángulos de elevación. Lo anterior y más importante, tal como lo hace presente Skolnik en su libro “Radar Handbook”, es que se considera un contenido agua presente de  $7,5 \text{ g/m}^3$ , para los datos del siguiente gráfico.

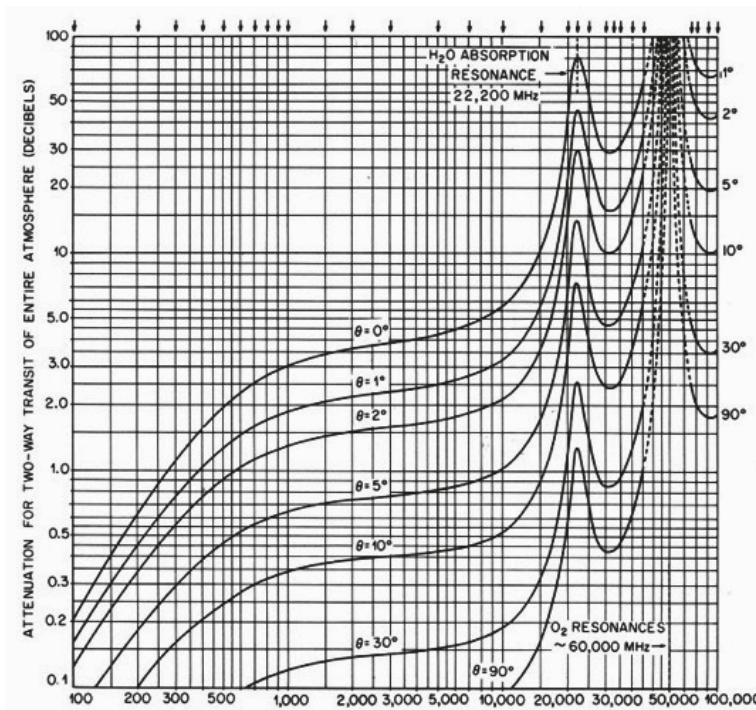


Figura N° 1: Pérdidas producto de condiciones atmosféricas.

Fuente: Skolnik, Merrill. Radar Handbook. (1970).

## 2.2. Relación entre visibilidad y densidad de la niebla

En primera instancia, es factible definir el concepto de visibilidad como “La distancia máxima a la que pueda verse y reconocerse un objeto de color negro de dimensiones convenientes, situado cerca del suelo, al ser observado ante un fondo brillante”. [11]

La atenuación debida a la niebla se puede expresar en términos de su contenido de agua  $M$ , y la microestructura de la niebla puede ser ignorado. [6] En la fórmula



empírica [1] para la visibilidad de niebla como una función de densidad de la niebla se tiene que:

$$V = 0,024M^{-0,65}$$

Donde:

$V$  : Visibilidad en [km]

$M$  : Contenido de agua líquida en [g /m<sup>3</sup>]

Se mencionó que la fórmula anterior es válida para el diámetro de gota entre 0,3 y 10 micras. Para el caso de niebla densa u otros tipos de niebla, el autor recomienda reemplazar el coeficiente 0,024 a 0,017 (adimensional) para nieblas de radiación y advección, respectivamente. Si se dispone de los datos de visibilidad, pero los datos de densidad de la niebla no están disponibles, la siguiente expresión puede ser utilizada:

$$M = \left(\frac{0,024}{V}\right)^{1,54}$$

Donde:

$V$  : Visibilidad en [km]

$M$  : Contenido de agua líquida en [g /m<sup>3</sup>]

### 2.3. Relación entre LWC y visibilidad

Se señala que la atenuación debida a la niebla usualmente es determinada, en primera instancia, obteniendo el índice de refracción del agua para una temperatura y longitud de onda determinada, para luego, utilizando una aproximación por Rayleigh, proceder a calcular la atenuación.

Las gotas raramente tienen diámetros mayores a 0,1 mm, por lo tanto la aproximación de Rayleigh es válida esencialmente en las longitudes de ondas milimétricas. Para esas longitudes de onda, las pérdidas por *scattering* son insignificantes, por lo que el tamaño de la gota no es relevante, pero sí su densidad. [1]

En el año 2011, en la Conferencia Internacional de Telecomunicaciones efectuada en Graz, Austria, se presentó una investigación, donde a través de un estudio que analizó 5 meses de información sobre LWC, visibilidad y atenuación óptica medidas simultáneamente, [7] lo que permitió validar el modelo presentado en 1966 sobre la relación entre el líquido en suspensión y las atenuaciones ópticas. [5]



Debido a lo anterior, se pudo obtener y validar la siguiente relación:

$$V = b(LWC)^{-2/3}$$

Donde :

$V$  : visibilidad en [km]

$LWC$  : contenido de agua líquida en [g /m<sup>3</sup>]

$b$  : se define de acuerdo a la Tabla 1:

TIPO DE NIEBLA	$b$
Dense fog	0.013
Continental fog	0.034
Maritime fog (wet and warm)	0.060
Dense Haze and selective fog	0.017
Stable and evolving fog	0.024
Advection fog	0.02381

Tabla 1: Valores para constante b según tipo de niebla.

## 2.4. Relación entre LWC y atenuación electromagnética

A continuación se presenta la metodología propuesta por la ITU para relacionar el LWC y la atenuación. Para lo anterior, es factible definir que la atenuación específica puede ser descrita como:

$$\gamma_c = K_i LWC \text{ [dB/km]}$$

Donde:

$\gamma_c$  : Atenuación específica (dB/km)

$LWC$  : Contenido de agua líquida en [g /m<sup>3</sup>]

$K_i$  : Coeficiente de atenuación ((dB/km)/(g/m<sup>3</sup>))

El modelo matemático utilizado está basado en Rayleigh, el que se vale del modelo de Debye para la permitividad dieléctrica  $\epsilon(f)$  de agua, la cual puede ser utilizada para calcular el valor de  $K_i$ , para frecuencia hasta 1.000 GHz.





$$K_l = \frac{0.819 f}{\varepsilon''(1 + \eta^2)} \left[ \frac{\text{dB}}{\frac{\text{km}}{\frac{\text{g}}{\text{m}^3}}} \right]$$

Donde:

$f$  : Frecuencia en GHz

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''}$$

La permitividad dieléctrica compleja del agua está dada por:

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p(1 + (f/f_p)^2)} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s(1 + (f/f_s)^2)}$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{1 + (f/f_p)^2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{1 + (f/f_s)^2} + \varepsilon_2$$

Luego,

$$\varepsilon_0 = 77.6 + 103.3(\theta - 1)$$

$$\varepsilon_1 = 5.48$$

$$\varepsilon_2 = 3.51$$

$$\theta = 300/T$$

Donde:

$T$  : Temperatura en grados Kelvin

En cuanto a las frecuencias de relajación primaria ( $f_p$ ) y secundaria ( $f_s$ ), se definen como:

$$f_p = 20.09 - 142(\theta - 1) + 294(\theta - 1)^2$$

$$f_s = 590 - 1500(\theta - 1)$$

A continuación, en figura N° 2, se presenta un gráfico extraído desde la recomendación técnica, donde se puede apreciar la atenuación específica a distintas frecuencias, dependiente de la cantidad de densidad volumétrica del agua en suspensión a distintas temperaturas.

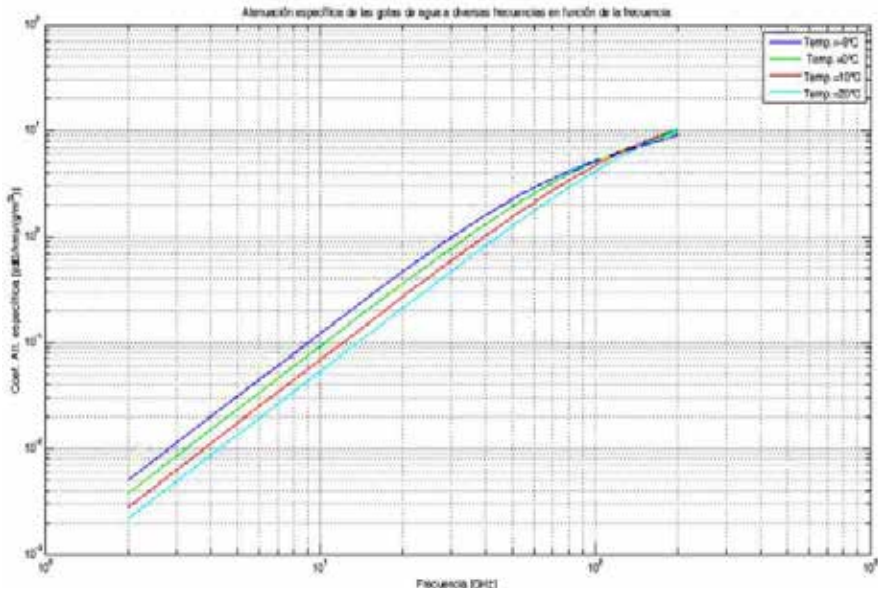


Figura N° 2: Atenuación de gotas de agua a diversas frecuencias.

Fuente: Skolnik, Merrill. Radar Handbook. (1970).

## 2.5. Relación entre atenuación electromagnética y visibilidad

Continuando con el desarrollo de este artículo, el siguiente paso es establecer la relación entre la atenuación electromagnética y la visibilidad. Para esto se utilizaron los modelos propuestos por la recomendación ITU-R P.840-5 [10] y el método validado. [7]

Es por lo anterior, que al considerar la ecuación entregada por la UIT y despejar LWC, queda,

$$LWC = \left(\frac{V}{b}\right)^{-3/2} \quad [g/m^3]$$

El resultado anterior es posible de reemplazar, obteniéndose,

$$\gamma_c = K_l \cdot LWC \quad [dB/km]$$

Considerando que  $K_l$ , es función de la temperatura y la frecuencia.

A continuación, en figura N° 3, se presenta un gráfico donde se puede apreciar el comportamiento de la atenuación en relación a la visibilidad y los distintos tipos de nieblas definidas en el modelo, denotadas por el valor de  $b$ , de acuerdo a Tabla 1.

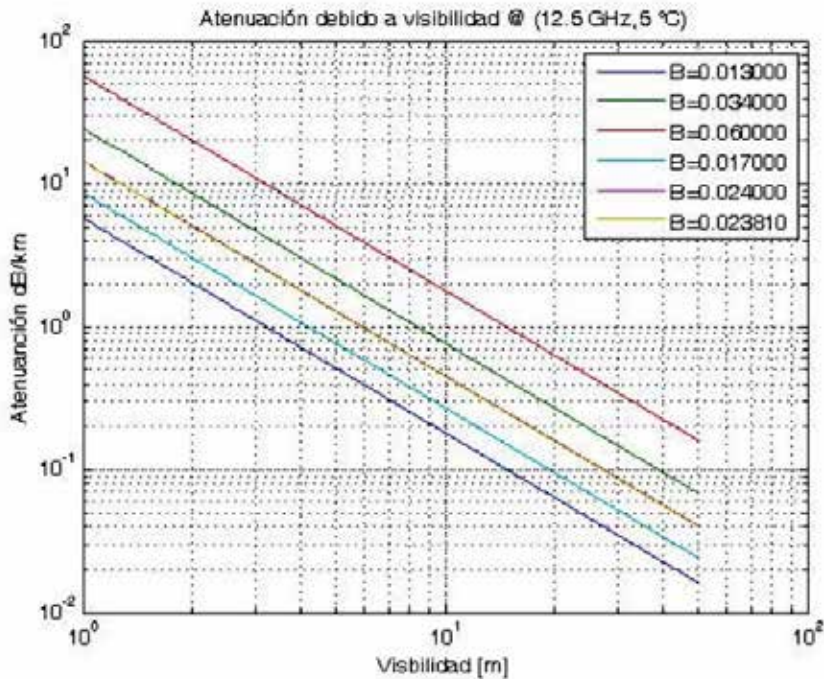


Figura Nº 3: Atenuación debido a visibilidad.

Fuente: Skolnik, Merrill. Radar Handbook. (1970).

## 2.6. Relación señal ruido y mínima señal discernible

Al considerar la siguiente ecuación que determina la potencia recibida por la antena receptora del radar, se aprecia que no están consideradas las pérdidas de ningún tipo, ya sea de,

$$P_{rx} = \frac{P_{tx} \cdot \sigma \cdot A_e^2}{4\pi \cdot R^4 \lambda^2} \quad [W]$$

En la ecuación anterior, no se encuentran consideradas los distintos tipos de pérdidas, tales como las de transmisión, recepción, absorción o propagación, condiciones atmosféricas, entre otras donde mediante la letra L, se engloba a todas las pérdidas que se pudieran considerar. Por lo tanto, al agregar las pérdidas de la ecuación anterior, queda de la forma,

$$P_{rx} = \frac{P_{tx} \cdot \sigma \cdot A_e^2}{4\pi \cdot R^4 \lambda^2 L} \quad [W]$$

La SNR que se define a continuación, junto con la ecuación anterior se puede reescribir en términos de la ganancia considerada, quedando:



$$SNR = \frac{P_{rx}}{N} = \frac{P_{tx} G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 NL}$$

Donde:

$P_{rx}$  : Potencia recibida

$P_{tx}$  : Potencia Transmitida

G : Ganancia de la antena considerando que es monoestático

$\lambda$  : Longitud de onda

R : Rango del radar

L : Representa a la totalidad de las pérdidas

N : Ruido tanto interno como externo

## 2.7. SNR en función de la visibilidad

Luego, al evaluar la ecuación de SNR anteriormente definida a la distancia de rango máximo ( $R_{max}$ ), pero considerando las pérdidas asociadas y suponiendo que se quiere conocer el nivel de SNR a esa distancia en distintas condiciones de visibilidad.

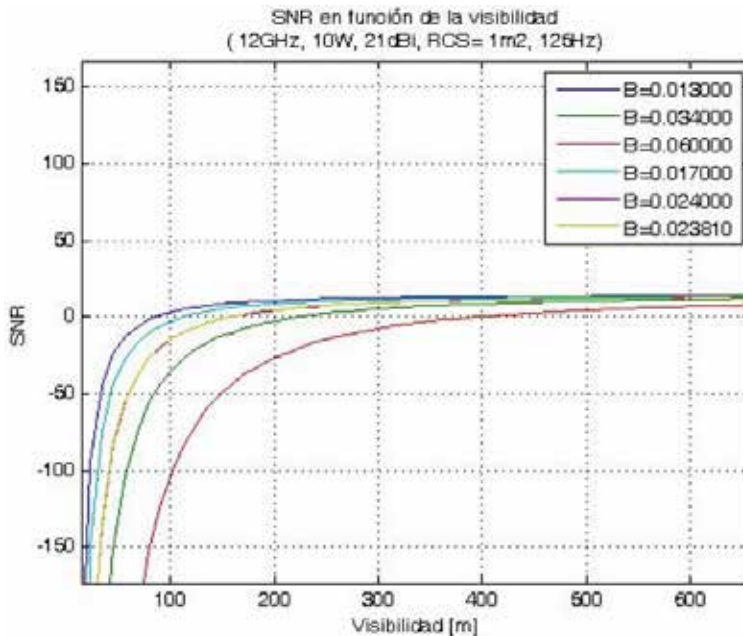


Figura Nº 4: SNR en función de la visibilidad.

Fuente: Skolnik, Merrill. Radar Handbook. (1970).



## 2.8. Rendimiento de los sistemas de radar de campo de batalla bajo condiciones de camanchaca

Como una forma de hacer un análisis de sensibilidad a través de métodos numéricos se utilizó la ecuación,

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 N L (SNR)_{min}}}$$

En la cual se iteró para distintas condiciones de visibilidad un rango tal que cumpla con la condición de que el SNR fuera igual o mayor al umbral de la mínima señal discernible y pueda detectar un blanco en forma satisfactoria dada por el fabricante, considerando las condiciones de camanchaca. De esta forma se puede apreciar la capacidad de detectar un mismo blanco en distintas condiciones.

A continuación, en Tabla 2, se aprecia el resultado de la aplicación de este modelo de un radar ficticio definido como:

SUBSISTEMA	PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Radar	Frecuencia	12	GHz
	Potencia de TX	10	Watts
	Ganancia Antena	21	dBi
	Ancho de banda	125	Hz
	Figura de ruido	33	dB
	SNR	15	dB
	Temperatura	290	Kelvin
Objetivo	Sección Cruzada de radar	1	m <sup>2</sup>
Constantes	Boltzmann	1.38e-23	J/K

Tabla 2: Valores de la aplicación de modelo de un radar ficticio.

Siendo los resultados obtenidos como sigue, para el radar ficticio definido anteriormente.

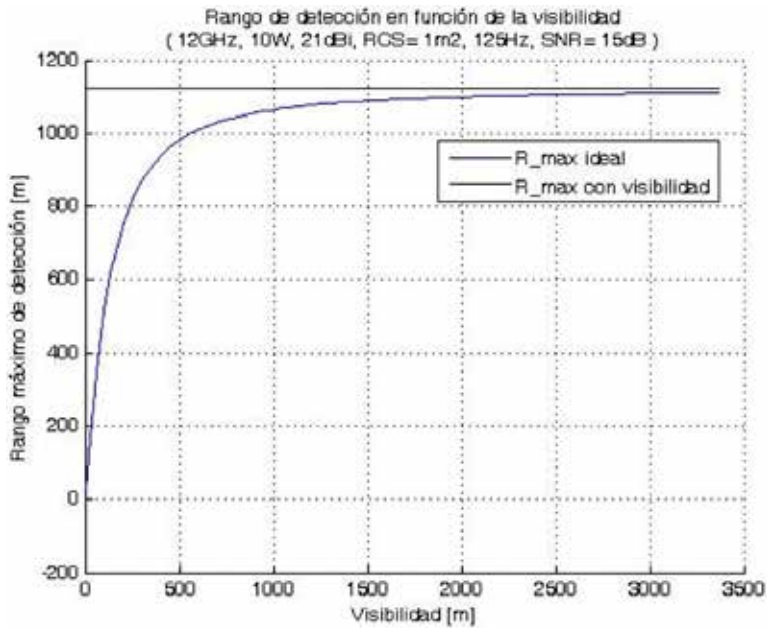


Figura Nº 5: Rango de detección en función de la visibilidad.

Al graficar solo la visibilidad que está en el rango menor a 500 m, que es una visibilidad altamente probable de encontrar cuando se produce el fenómeno de camanchaca, se puede observar lo siguiente:

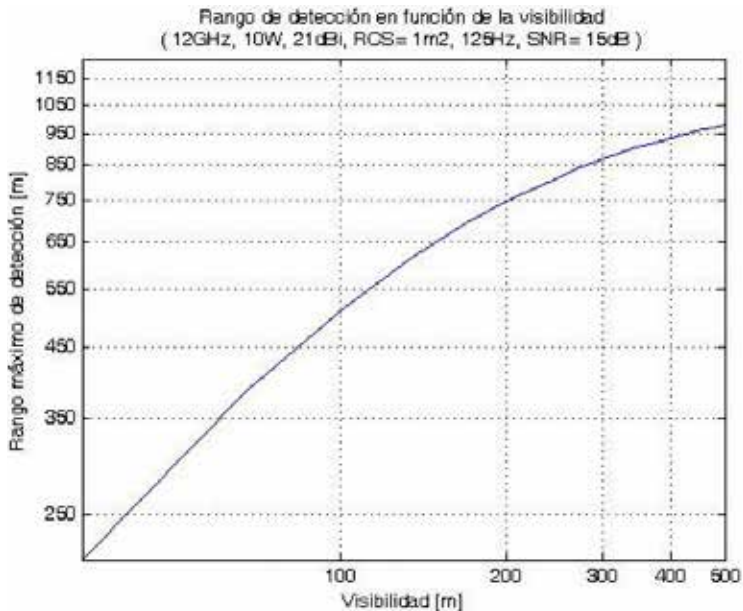


Figura Nº 6: Rango de detección en función de la visibilidad en el rango menor a 500 m.



Por lo tanto desde un punto de vista teórico, sí es importante considerar la camanchaca en la planificación del comandante. Ya que se aprecia claramente la disminución de la eficiencia del sistema a medida que baja la visibilidad.

### 3. CONCLUSIONES

Se pudo verificar que el comportamiento de la camanchaca es factible de prever y que en general se presenta en lugares de alto interés táctico, tales como quebradas o riscos cercanos a la costa que son elegidos frecuentemente para la vigilancia de sectores costeros.

Luego de haber interrelacionado investigaciones, conocimiento, publicaciones, metodologías y otros, de áreas tan diversas como la geografía, meteorología, métodos numéricos, telecomunicaciones, se pudo establecer un método de trabajo que pudo entregar los resultados planteados.

La hipótesis se confirmó; la camanchaca sí disminuye el rango de detección de los sistemas de radar. Por ejemplo en visibilidades bajo los 200 m, situación que ocurre frecuentemente en el norte del país, la capacidad de detección puede bajar hasta el 20% o menos, analizar la figura N° 12-3. Tal como el caso del radar de la bahía de Delaware (Brookner, Ferraro, & Ouder Kirk, 1998).

Se confirma que a través de las especificaciones técnicas de un radar, se puede obtener su comportamiento teórico frente a situaciones de camanchaca.

### 4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALTSHULER, Edward E. (1984). *A simple expression for estimating attenuation by fog at millimeter wavelengths.*
- [2] BROOKNER, Eli; FERRARO, Ellen AND OUDERKIRK, Gregg D. (1998). *Radar performance during propagation fades in the mid-Atlantic region.*
- [3] CHAUDHARY, Naveen Kumar; TRIVEDI, DK AND GUPTA, Roopam (2011). *International journal of latest trends in computing.*
- [4] DOCKERY, Daniel G. (1988). *Modeling electromagnetic wave propagation in the troposphere using parabolic equation.*
- [5] ELDRIDGE, Ralph G. (1966). Haze and fog aerosol distributions. *Journal of the atmospheric sciences.*



- [6] GALATI, G. (2006). Fog detection using airport radar.
- [7] KHAN, M. S. (2011). Validating Relationship between Aerosol's Liquid Water Content and Optical Attenuation for Terrestrial FSO links.
- [8] SKOLNIK, Merrill (1970). *Radar Handbook*. New York : McGraw Hill Book Company.
- [9] TAMOSIUNAS, S. (2009). *The influence of fog on the propagation of the electromagnetic waves under lithuanian climate conditions*.
- [10] International Telecommunication Union (2012). *ITU-R P.840-5, Attenuation due to clouds and fog*.
- [11] Dirección General de Aeronautica Civil (2008). Coordinación entre los servicios de tránsito aéreo (ATS) y los servicios de meteorología aeronáutica (MET). Santiago.