

# Adjustment of the ITU-R Model for the Rainfall Attenuation Prediction in Satellite Links, by Applying Industry X.0 Base Technology

Angel D. Pinto-Mangones  
Escuela de Ingeniería de  
Sistemas, Universidad del Sinú  
Montería, Colombia  
angelpinto@unisinu.edu.co

Nelson A. Pérez-García  
Postgrado en  
Telecomunicaciones, Universidad  
de Los Andes (ULA)  
Mérida, Venezuela  
perezn@ula.ve

Jordi J. Castillo-Rondón  
Escuela de Ingeniería Eléctrica,  
Universidad de Los Andes (ULA)  
Mérida, Venezuela  
sauldavid081115@gmail.com

Jesús A. Castillo-Sánchez  
PDVSA, Gerencia de A.I.T.,  
Distrito Los Llanos  
Barinas, Venezuela  
castillojax@pdvsa.com

Juan M. Torres-Tovio  
Escuela de Ingeniería de  
Sistemas, Universidad del Sinú  
Montería, Colombia  
juantorrest@unisinu.edu.co

Frank A. Ibarra-Hernández  
Escuela de Ingeniería Eléctrica,  
Universidad del Sinú  
Montería, Colombia  
frankibara@unisinu.edu.co

Yair E. Rivera-Julio  
Ingeniería de Sistemas,  
Institución Universitaria  
Americana  
Barranquilla, Colombia  
yrivera@americana.edu.co

Jorge A. Yepes Escobar  
Universidad EAN  
Bogotá, Colombia  
jorgeyepes.escobar@gmail.com

**Abstract**—Since the existing models in the literature for the prediction of rain attenuation in satellite links operating at frequencies above 10 GHz do not always correlate with the climatic characteristics of the location of interest and/or with the technical characteristics of the link to be implemented, there is a permanent need to develop rain attenuation models that increase the probability of finding one or more models with the highest possible correlation to the aforementioned characteristics. In this sense, in this letter it is developed a new model for the estimation of the mentioned attenuation using one of the base technologies of Industry X.0, specifically artificial intelligence, to tune the ITU rain fading model (contained in Recommendation ITU-R P.618-14) to a set of measurements of the referred attenuation reported in the literature. The comparison of the performance of the new model with that of the original ITU model, in the prediction of rain attenuation for the links considered in the development of the work, show a notorious improvement, in terms of the root mean square error (RMSE), with reductions from 26.85% to 73.05%, in the case of individual links, and 46.8%, for the totality of the links.

**Keywords**—Rain attenuation modeling, Satellite communication systems, Particle Swarm Optimization, RMSE value

## I. INTRODUCCIÓN

Desde su consolidación, los sistemas de comunicaciones vía satélite han venido representando un segmento muy importante de la infraestructura mundial de telecomunicaciones, debido a su gran área de cobertura, soporte de velocidades de transmisión cada vez mayores y prestación de un variado conjunto de aplicaciones y servicios. Y es tal la importancia de dichos sistemas que entre los retos a ser alcanzados por los operadores de telecomunicaciones está su integración a los sistemas inalámbricos de quinta generación o 5G (*Fifth-Generation*) y sexta generación o 6G (*Sixth-Generation*) [1], con el objetivo de brindar una conectividad de red ubicua que proporcione servicios ininterrumpidos a cualquier usuario, para lo cual las bandas de frecuencia de operación contempladas son las superiores a los

10 GHz, tal es el caso, por ejemplo, de la banda D y la banda de los THz [2].

Ahora bien, para que un sistema de telecomunicaciones una vez implementado opere de manera satisfactoria, es necesario llevar a cabo antes un proceso de planificación y dimensionamiento (PyD) el cual contempla, entre otros aspectos, estimar la cobertura del enlace, así como la relación portadora-ruido o C/N (*Carrier-to-Noise*) o la relación señal-interferencia (S/N, *Signal-to-Inference*), parámetros de desempeño del sistema de telecomunicaciones que, en el caso de frecuencia de operación superiores a 10 GHz, se ven severamente afectados por la presencia de lluvias en al menos una parte del enlace, toda vez que los eventos en cuestión atenúan el nivel de potencia de la señal que se está propagando [3], [4].

La consideración en el proceso PyD del indeseado efecto de la atenuación por lluvias idealmente se materializa contando con valores medidos del mencionado desvanecimiento en la localidad de interés, es decir, en la que estará localizada la estación terrena. Sin embargo, en la práctica, el escenario común es no disponer de tales valores, por lo que, se debe acudir a modelos reportados en la literatura para la predicción de la atenuación por lluvias, siendo el modelo mundialmente más utilizado el contenido en la Recomendación ITU-R P.618-14 [5]. Empero, no siempre es fácil conseguir entre dichos modelos al menos uno que se correlacione con las características climáticas (especialmente la asociada a los regímenes de lluvias de la localidad de interés) y/o con las características técnicas del enlace a implementar (por ejemplo, frecuencia de operación, ángulo de elevación de la estación terrena, entre otras) que se planificará y dimensionará, lo que hace del modelado del desvanecimiento por lluvias una permanente tarea.

En ese sentido, en este artículo, se desarrolla un nuevo modelo para la estimación de la atenuación por lluvias en sistema de comunicación vía satélite operando en frecuencias mayores a 10 GHz, que consiste en el ajuste del actual modelo de la Recomendación ITU-R P.618-14 a mediciones de la

referida atenuación reportada en algunos lugares del mundo y recurriendo para la sintonización del modelo a una de las tecnologías base de la Industria X.0 (Industria 4.0 e Industria 5.0), como es lo es la inteligencia artificial y más específicamente la técnica de optimización por enjambre de partículas (PSO, *Particle Swarm Optimization*) [6].

## II. BASES TEÓRICAS

### A. Modelo ITU para la Predicción de la Atenuación por Lluvias en Sistemas de Comunicación Vía Satélite

Contenido en la Recomendación ITU-R P.618-14, este modelo (en adelante, modelo ITU) permite estimar la atenuación por lluvias en enlaces satelitales con la siguiente información de entrada: frecuencia de operación,  $f$  [GHz], elevación media sobre el nivel del mar de la estación terrena,  $h_s$  [km], ángulo de elevación de la estación terrena,  $\varepsilon$  [grados], latitud de la estación terrena,  $\varphi$  [grados], radio efectivo de la Tierra,  $R_E$  (igual a 8500 km) y la tasa de precipitación,  $R_{0,01}$  [mm/h], excedida durante el 0,01% del tiempo en un año medio [5]. En la Figura 1 se muestra la geometría del enlace satelital utilizada para la implementación del modelo ITU, el cual consiste en diez (10) pasos [5].

En la Figura 1,  $h_R$  es la altura de lluvia sobre el nivel del mar,  $L_s$  representa el trayecto inclinado (está por debajo de la elevación de las lluvias y depende de  $h_s$ ,  $h_R$ ,  $R_E$  y  $\varepsilon$ ) y  $L_G$  se refiere a la proyección horizontal del trayecto inclinado (depende de  $L_s$  y  $\varepsilon$ ).

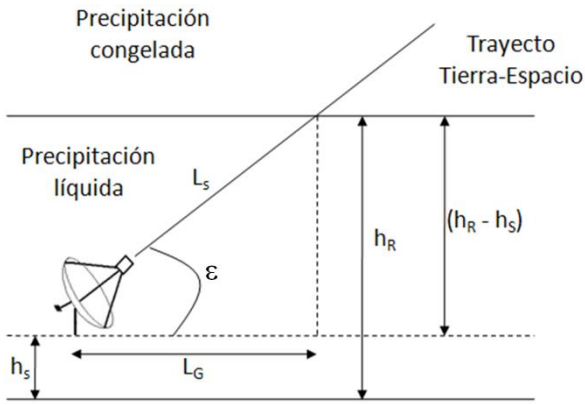


Fig. 1. Diagrama esquemático del trayecto Tierra-espacio, utilizado por la Recomendación ITU-R P.618-14

La tasa de precipitación,  $R_{0,01}$ , se determina el porcentaje,  $p$ , del 0,01% de indisponibilidad del enlace en un año, con un tiempo de integración de 1-minuto. Dicho parámetro debería obtenerse de preferencia a partir de mediciones de la tasa de precipitación llevadas a cabo en la localidad la estación terrena. Sin embargo, en ausencia de dicha información, se pueden utilizar modelos de conversión de estadísticas de lluvias (Pinto-Mangones et al., Ramírez, 2019) [7], [8] o modelos de predicción directa [7], [8], por ejemplo, el Anexo 1 de la Recomendación UIT-R P.837-7 [9].

El algoritmo del modelo de la Recomendación ITUR P.618-14 incluye el cálculo de la atenuación específica de la lluvia para el 0,01% del tiempo ( $\gamma_{0,01}$ ), el factor de reducción horizontal determinado para el 0,01% del tiempo ( $r_{0,01}$ ) y el factor de ajuste en la dirección vertical para el 0,01% del tiempo ( $\nu_{0,01}$ ). Por último, la atenuación por lluvias,  $A_p$ , rebasada durante un porcentaje de tiempo,  $p(\%)$ , en el intervalo del 0,001% al 5%, se calcula mediante una interpolación en  $p$ ,  $A_{0,01}$  (atenuación superada durante el

0,01% del tiempo), ángulo de elevación de la estación terrena ( $\varepsilon$ ) y latitud de la estación terrena ( $\varphi$ ).

En este artículo, las ecuaciones del algoritmo del modelo ITU para la estimación del desvanecimiento por lluvias que fueron consideradas para el ajuste del modelo son [5]:

$$\nu_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \varepsilon} \left[ 31 \left( 1 - e^{-\frac{\theta}{1+\chi}} \right) \sqrt{\frac{L_R \gamma_{0,01}}{f} - 0,45} \right]} \quad (1)$$

$$A_p = A_{0,01} \left( \frac{p}{0,01} \right)^{-[0,655 + 0,033 \ln(p) - 0,045 \ln A_{0,01} - \beta(1-p) \sin \theta]} \quad (2)$$

### B. PSO

La optimización por enjambre de partículas o PSO es una técnica de computación inteligente [6], [10], perteneciente a la inteligencia artificial, bastante utilizada en problemas de optimización, entre otras áreas, en telecomunicaciones [11-14]. En esencia, la técnica se basa en un proceso de búsqueda del mejor objetivo por parte de una población conformada por “partículas” o “individuos”, tales como las bandadas de pájaros y bancos de peces, que “viajan” a través del espacio de búsqueda multifuncional, adaptando, con distintos grados de confianza, dicha búsqueda a su propia experiencia o conocimientos, así como a los de sus partículas vecinas [10]. En PSO cada partícula del enjambre o población es una posible respuesta al problema de optimización. La técnica PSO, cuyo desarrollo inicial tuvo lugar en 1.995 por parte de James Kennedy y Russell Eberhart [15], es considerada como relativamente fácil de entender e implementar, presenta una rápida convergencia con soluciones aceptables (lo que se traduce en un bajo procesamiento computacional), requiere pocos parámetros para el ajuste, tiene buen desempeño en la precisión de los valores obtenidos para dichos parámetros y es menos sensible a la naturaleza de la función de costo [16].

El conjunto de individuos sigue a la partícula que se encuentre más cercano al objetivo buscado, es decir, a la posición más óptima. Para ello, el individuo cambia su velocidad, de manera que, si se encuentra más distante de dicha posición óptima, la partícula viajará a mayor velocidad con la meta de aproximarse a otro conjunto de individuos que esté más próximo al objetivo. El proceso de búsqueda concluye bien sea cuando uno de los individuos de la población alcanza el objetivo, o cuando se satisface algún criterio de finalización, por ejemplo, un determinado número de iteraciones,  $k$ . En todo caso, en el proceso de búsqueda de PSO se generan, de manera aleatoria, combinaciones espaciales de una misma población, en base a función de costo, también llamada función objetivo, función de ajuste o función de aptitud,  $f$ .

### Modelo matemático de PSO

En PSO, cada partícula “i” es modelada por su vector posición,  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{iD})$ , y su vector velocidad,  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{iD})$ , donde  $D$  denota el número de dimensiones de ambos vectores [6] y la calidad de su posición viene determinada por el valor de la función costo en ese punto [17]. Asimismo, la mejor posición transitada por dicha partícula se denota por el vector  $pBest_i = (pBest_{i1}, pBest_{i2}, pBest_{i3}, \dots, pBest_{iD})$ , mientras que, la mejor posición alcanzada por el conjunto de partículas del enjambre se denota por el vector  $gBest = (gBest_1, gBest_2, gBest_3, \dots, gBest_D)$ .

La velocidad actualizada,  $v_i(k+1)$ , de cada partícula “i” en la próxima iteración,  $k+1$ , depende de tres (3) factores [18], [19]:

- **La inercia,  $\omega$ :** que evita que el movimiento de la partícula de una iteración a otra sea de forma drástica, tomando en cuenta para ello la velocidad anterior,  $v_i(k)$ , de la partícula.
- **Parámetro cognitivo,  $C_1$ :** pondera o cuantifica la experiencia propia de la partícula. Se refiere a la tendencia que tiene cada partícula a retornar a la mejor posición que ha encontrado.
- **Parámetro social,  $C_2$ :** a través del cual se pondera o cuantifica la experiencia de cada partícula en su cooperación con las restantes partículas del conjunto.

En resumen, la actualización de la velocidad y la posición de la partícula son dadas por [12], [18]:

$$V_i(k+1) = \omega X_i(k) + C_1 R_1 [pBest_i - X_i(k)] + C_2 R_2 [gBest_i - X_i(k)] \quad (3)$$

$$X_i(k+1) = X_i(k) + V_i(k+1) \quad (4)$$

donde  $R_1$  y  $R_2$  se refieren a operadores aleatorios pertenecientes a la distribución uniforme  $U(0,1)$ , y cuyo rol, en sinergia con  $C_1$  y  $C_2$ , es el ajuste del equilibrio entre las fases de diversificación (o exploración) e intensificación (o explotación) del proceso de búsqueda, para aportar nuevas mejores soluciones en torno a los vectores  $pBest$  y  $gBest$  [17].

En la Figura 2, se esquematizan gráficamente los factores  $\omega$ ,  $C_1$  y  $C_2$ , y su influencia en la actualización de la posición de la partícula.

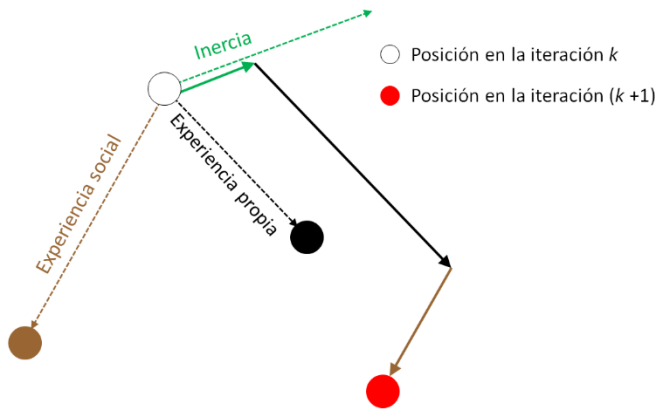


Fig. 2. Esquema de los movimientos de una partícula en PSO

Por su parte, los vectores  $pBest$  y  $gBest$  son actualizados mediante [17]:

$$pBest_i(k+1) = \begin{cases} X_i(k+1); & \text{si } f[X_i(k+1)] \geq pBest_i(k) \\ pBest_i(k), & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (5)$$

$$gBest(k+1) = \argmax \{f[pBest_i(k+1)]\} \quad (6)$$

donde “argmax” es el argumento del mejor valor de la función de costo,  $f$ .

### III. BASE DE DATOS PARA EL DESARROLLO DEL NUEVO MODELO

La base de datos que será utilizada para el desarrollo del nuevo modelo para la estimación de la atenuación por lluvias en sistemas de comunicación vía satélite operando en frecuencias superiores a 10 GHz, consiste en mediciones de la referida atenuación reportadas en años anteriores en Malasia, Tailandia, Italia y Escocia.

#### A. Mediciones en Malasia

Las mediciones llevadas a cabo en Malasia a ser consideradas en este trabajo, son las reportadas por

Kalaivaanan et al. [20], las cuales se basan en enlaces implementados entre el satélite geoestacionario iPStar-1 (también llamado Thaicom-4), con 119,5° de longitud Este, y estaciones terrenas localizadas en Bukit Jalil (suburbio de la ciudad de Kuala Lumpur) y la ciudad de Cyberjaya, ambos enlaces operando en 20,1998 GHz (banda Ka) y polarización horizontal.

La estación terrena (ET) Bukit Jalil localizada en 3,0587° latitud Norte y 101,6917° longitud Este, altura media sobre el nivel del mar de 46,72 metros, ángulo de elevación igual a 68,8° y una tasa de precipitación,  $R_{0,01}$ , en la zona igual a 177,4 mm/h. Por su parte, la ET de Cyberjaya ubicada en 2,9348° latitud Norte y 101,6590° longitud Este, altura igual 40,72 m, ángulo de elevación de 68,8° y una  $R_{0,01}$  en la localización de 239,8 mm/h [20].

Es de hacer notar que, las mediciones en el enlace con estación terrena (ET) en Bukit Jalil fueron realizadas desde enero 2017 a diciembre 2017, mientras que las del enlace con ET en Cyberjaya tuvieron lugar desde enero 2018 a diciembre 2018 [20].

En la Figura 3, se observan las correspondientes curvas de distribución complementaria acumulativa (DCA) de la atenuación por lluvias,  $A$ , para los enlaces desde Bukit Jalil y Cyberjaya [20].

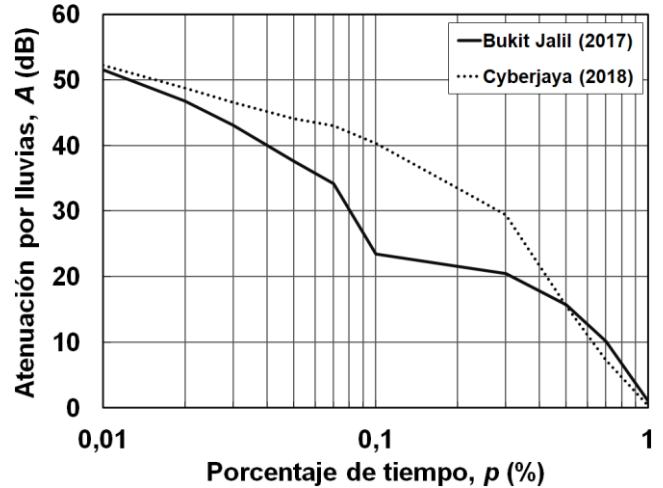


Fig. 3. DCA de la atenuación por lluvias en el enlace desde los enlaces Bukit Jalil y Cyberjaya, Malasia

#### B. Mediciones en Tailandia

Fueron realizadas durante un periodo anual, específicamente, desde enero 2005 a diciembre 2005, en el KMITL (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang), Bangkok, Tailandia [21], [22]. El enlace con el que se llevaron a cabo las mediciones fue establecido entre el satélite geoestacionario Thaicom 3, localizado en 78,5° longitud Este y la estación terrena ubicada en el KMITL, con coordenadas geográficas 13,7° latitud Norte y 100,7° longitud Este, altura media sobre el nivel del mar y ángulo de elevación de la ET de 25 metros y 59,81°, respectivamente [21], [22].

El enlace en cuestión tuvo frecuencia de operación de 12,594 GHz (banda Ku) y polarización horizontal, mientras que la tasa de precipitación,  $R_{0,01}$  para la zona fue de 90 mm/h [22].

En la Figura 4, se puede observar la correspondiente DCA de  $A$  [21], [22].

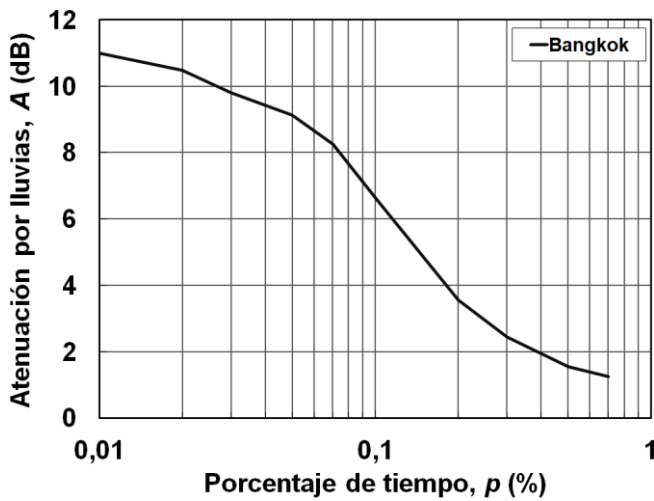


Fig. 4. DCA de la atenuación por lluvias en el enlace de Bangkok, Tailandia

#### C. Mediciones en Italia

Las mediciones, las cuales fueron reportadas por Zemba et al. [23], se realizaron durante cinco (5) años completos (desde enero 2014 hasta diciembre 2018) en el enlace establecido entre el satélite geoestacionario Alphasat, ubicado en 25° longitud Este, y la estación terrena localizada en el edificio del *Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria* (DEIB) del *Politecnico di Milano* (POLIMI), Milán, Italia, 45,4787° latitud Norte y 9,2327 longitud Este, altura sobre el nivel del mar igual a 138 metros y ángulo de elevación de 35°. La frecuencia de operación fue de 39,402 GHz (banda Q) y la polarización lineal con 45° de inclinación.

La tasa de precipitación,  $R_{0,01}$ , para el 0,01% del tiempo del año, para el enlace en Milán fue de 52 mm/h [24].

La curva resultante de la distribución complementaria acumulativa de  $A$ , para el caso de Milán, se observa en la Figura 5 [23].

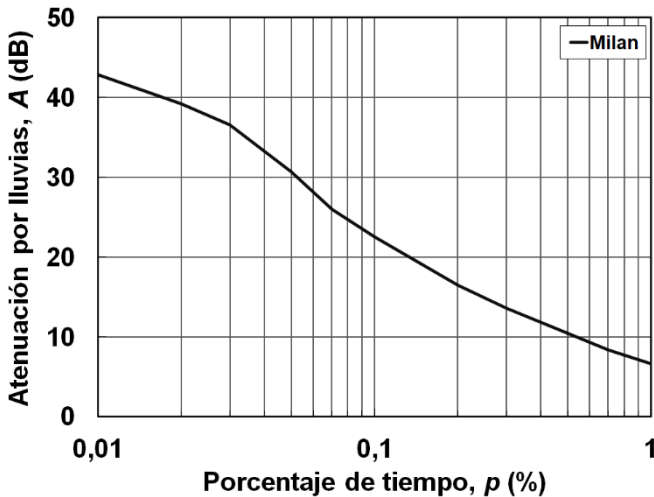


Fig. 5. DCA de la atenuación por lluvias en el enlace de Milán, Italia

#### D. Mediciones en Escocia

Se trata de mediciones llevadas a cabo con el mismo satélite Alphasat, pero la estación terrena ubicada en el edificio Earl Mountbatten, ciudad de Edimburgo, Escocia (55,9123° latitud Norte, 3,3223° longitud Oeste), a una altura sobre el nivel del mar de 130 metros y un ángulo de elevación de 21°, durante tres (3) años completos, específicamente, desde enero 2016 hasta diciembre 2018 [23]. El enlace fue

implementado en la frecuencia de operación 39,402 GHz (banda Q), polarización lineal con 45° de inclinación y el valor de  $R_{0,01}$  para la región fue de 19,5 mm/h.

En la Figura 6, se observa la correspondiente DCA de  $A$  [23]

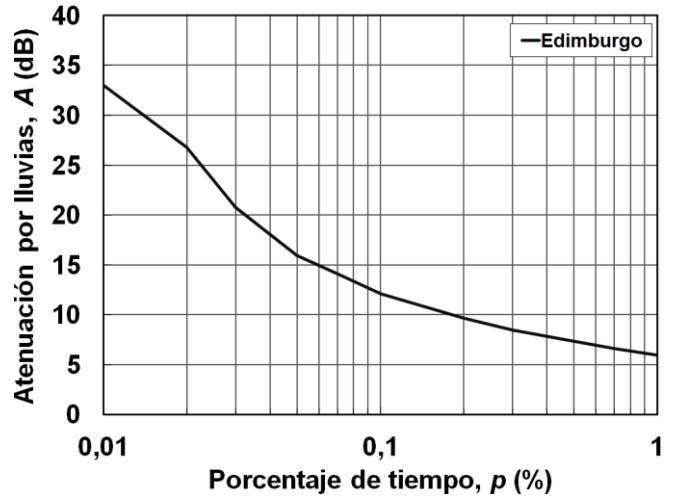


Fig. 6. DCA de la atenuación por lluvias en el enlace de Edimburgo, Escocia

#### IV. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MODELO ITU EN LA ESTIMACIÓN DE LA ATENUACIÓN POR LLUVIAS

Para evaluar el desempeño que el modelo ITU en la estimación de la atenuación por lluvias en sistemas de comunicación vía satélite en primer lugar se calculan los valores de dicha atenuación mediante el modelo ITU. A modo de ejemplo, en la Figura 7 se muestran las DCA, medida y estimada, para la ciudad de Edimburgo, observándose una notable diferencia, desde el punto de vista cualitativo, entre los valores medidos o reales y los valores estimados por el modelo ITU, para todo el intervalo de porcentaje de tiempo,  $p$ (%), considerado, con una subestimación de la atenuación por lluvias, lo que implicaría un significativo subdimensionamiento del sistema de telecomunicaciones cuando se recurra al modelo ITU para estimar el desvanecimiento por lluvias en la localidad en cuestión.

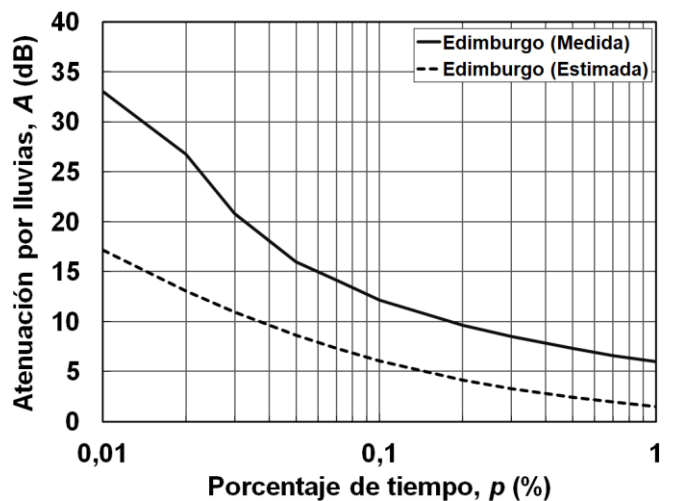


Fig. 7. DCA de la atenuación por lluvias en el enlace de Edimburgo, Escocia

Ahora bien, para una evaluación cuantitativa del modelo ITU, se recurre a la métrica llamada raíz del error cuadrático medio o RMSE, también conocida como la raíz de la



desviación cuadrática media (RMSD, *Root Mean Square Deviation*). Para un conjunto de  $N$  mediciones, el valor RMSE viene dado por [12], [18]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_{m,i} - V_{c,i})^2}{N}} \quad [\text{dB}] \quad (7)$$

donde  $V_{m,i}$  es el valor medido, en este caso, de la atenuación por lluvias ( $A_m$ ), para el porcentaje “i”, mientras que,  $V_{c,i}$  representa el valor estimado, en este caso, de la atenuación por lluvias ( $A_c$ ), para el porcentaje “i”.

En la Tabla 1, se resumen los valores RMSE obtenidos para cada una de las localidades consideradas en este artículo, así como el valor RMSE global (las localidades en conjunto)

TABLA 1. VALOR RMSE (MODELO ITU)

RMSE (dB)					
Bukit Jalil	Cyberjaya	Bangkok	Milan	Edimburgo	Global
6,8191	12,1960	3,0691	9,7284	8,5147	8,6927

## V. DESARROLLO DEL NUEVO MODELO

Para obtener el nuevo modelo, se modificará el modelo ITU-R de manera que se sintonice o ajuste en la mayor medida posible a las mediciones de la atenuación por lluvias analizadas en la sección III, es decir, que el valor RMSE sea el menor posible. Para ello, se acudirá, tal como ha sido señalado anteriormente, a la técnica de inteligencia artificial de optimización por enjambre de partículas o PSO, para lo cual se debe establecer la o las ecuaciones a modificar, es decir, aquellas a ser ajustadas o sintonizadas a las mediciones, mediante la función objetivo o de costo, que en este caso es la minimización del valor RMSE, dado por la ecuación (7). Las ecuaciones a modificar en cuestión se obtuvieron después de llevar a cabo varias pruebas, consistentes en variantes de las ecuaciones del modelo ITU, así como en modificaciones en los parámetros de PSO, siguiendo el diagrama de flujo mostrado en la Figura 8, con el fin de hallar el menor valor RMSE posible para el conjunto de todas las localidades consideradas en este trabajo.

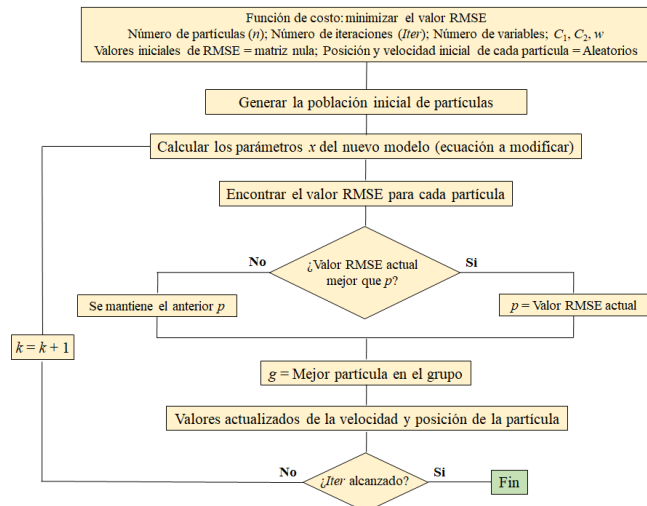


Fig. 8. Diagrama de flujo de PSO para la sintonización de las ecuaciones a modificar

Finalmente, las ecuaciones a modificar en el algoritmo del modelo ITU resultaron ser:

- El factor de ajuste en la dirección vertical,  $v_{0,01}$ , para el 0,01% del tiempo, de la ecuación (1):

$$v_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \varepsilon} \left[ 31 \left( 1 - e^{-\frac{\varepsilon}{1+\chi}} \right) \sqrt{\frac{LR Y_{0,01}}{x_1 f^4}} - 0,45 \right]} \quad (8)$$

mediante la cual se modifica el coeficiente de  $f^4$ , mediante el parámetro de ajuste  $x_1$ .

- La atenuación por lluvias,  $A_p$ , de la ecuación (2):

$$A_p = A_{0,01} \left( \frac{p}{0,01} \right)^{-[x_2 0,655 + x_3 0,033 \ln(p) - 0,045 \ln(A_{0,01}) - \beta(1-p) \sin \varepsilon]} \quad (9)$$

mediante la cual se modifican el término 0,655 y el coeficiente de  $\ln(p)$ , por medio de los parámetros de ajuste  $x_2$  y  $x_3$ , respectivamente.

En cuanto a los parámetros de PSO, los valores resultantes para el mejor ajuste de las ecuaciones (8) y (9) fueron:

- Número de partículas,  $n = 10$
- Número de iteraciones,  $Iter = 100$
- Número de variables = 3 (los factores de ajuste  $x_1, x_2, x_3$ )
- $w = 0,9$
- $C_1 = 2,5$
- $C_2 = 0,5$

Los valores obtenidos para los parámetros de ajuste  $x_1, x_2, x_3$ , fueron 0,5944, 0,8405 y 3,5167, respectivamente, resultando para el modelo ITU modificado (ITU-Mod) el algoritmo del modelo original, cambiando las ecuaciones (1) y (2) por las siguientes ecuaciones:

$$v_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \varepsilon} \left[ 31 \left( 1 - e^{-\frac{\varepsilon}{1+\chi}} \right) \sqrt{\frac{LR Y_{0,01}}{0,5944 f^4}} - 0,45 \right]} \quad (10)$$

$$A_p = A_{0,01} \left( \frac{p}{0,01} \right)^{-[0,5505 + 0,116 \ln(p) - 0,045 \ln A_{0,01} - \beta(1-p) \sin \theta]} \quad (11)$$

El valor RMSE arrojado por el nuevo modelo ITU para las cada una de localidades, así como para la totalidad de las mismas, se resumen en la Tabla 2

TABLA 2. VALOR RMSE (MODELO ITU-MOD)

RMSE (dB)					
Bukit Jalil	Cyberjaya	Bangkok	Milan	Edimburgo	Global
4,6917	4,5310	0,8262	4,8008	6,2282	4,6244

Comparando los valores RMSE mostrados en las Tablas 1 y 2, se observa un notorio mejor desempeño por parte del modelo desarrollado en este artículo, en comparación con la versión original del modelo ITU, en la predicción de la atenuación por lluvias en sistemas de comunicación vía satélite, para las localidades consideradas. Esta conclusión es reforzada por el porcentaje de reducción del valor RMSE, que se muestra en la Tabla 3, para cada uno de los enlaces, así como para el conjunto total de enlaces.

TABLA 3. REDUCCIÓN (%) DEL VALOR RMSE

RMSE (dB)					
Bukit Jalil	Cyberjaya	Bangkok	Milan	Edimburgo	Global
31,20	62,85	73,08	50,65	26,85	46,80

## VI. CONCLUSIONES

Se desarrolló un nuevo modelo para la predicción de la atenuación por lluvias en sistemas de comunicación vía satélite operando en frecuencias superiores a 10 GHz, tomando en cuenta para ello mediciones llevadas a cabo del

mencionado parámetro en enlaces localizados en Malasia, Tailandia, Italia y Escocia. La totalidad de los enlaces en cuestión, específicamente, cinco (5), abarcaron diversos valores de frecuencia y ángulos de elevación de la estación terrena, así como diferentes tipos de polarización de la señal.

El modelo desarrollado resultó de la sintonización del modelo de atenuación por lluvias para enlaces satelitales contenido en la Recomendación ITU-R P.618-14 (modelo ITU), al conjunto de valores de dicho parámetro obtenidos de los cinco (5) enlaces arriba señalados, utilizando para ello inteligencia artificial, que es una de las tecnologías base de la Industria X.0 (Industria 4.0 e Industria 5.0); específicamente, se empleó la optimización por enjambre de partículas (PSO, *Particle Swarm Optimization*), para ajustar tres (3) factores del modelo ITU con la finalidad de minimizar el valor de la raíz del error medio cuadrático (RMSE, *Root Mean Square Error*). La evaluación cuantitativa, basada precisamente en el valor RMSE, muestra que efectivamente el modelo original de predicción de desvanecimiento por lluvias fue satisfactoriamente ajustado a las referidas mediciones, ya que, además de la reducción significativa del 46,80% del valor RMSE (de 8,927 dB a 4,6244 dB) arrojado por el nuevo modelo en comparación con modelo ITU original en la estimación de la atenuación por lluvias del conjunto de los enlaces, también hubo una notoria disminución del valor RMSE obtenido para cada uno de las localidades consideradas, específicamente, entre el 26,85% y el 73,08%.

## REFERENCIAS

- [1] K. L. Jones and A. L. Allison, "The Great Convergence and the Future of Satellite-enabled Direct-to-Device," 2023. [Online]. [https://csp.aerospace.org/sites/default/files/2023-09/Jones-Allison\\_GreatConvergence\\_20230919.pdf](https://csp.aerospace.org/sites/default/files/2023-09/Jones-Allison_GreatConvergence_20230919.pdf) [Accessed: Nov. 29, 2023].
- [2] A. Saeed, H. E. Yaldiz and F. Alagoz, "GHz-to-THz Broadband Communications for 6G Non-terrestrial Networks," *ITU Journal on Future and Evolving Technologies*, vol. 4, no. 1, pp. 241-250, March 2023. <https://doi.org/10.52953/AOKY1032>
- [3] N. A. Pérez-García et al., L. M. Rujano-Molina and J. M. Torres-Tovio et al., "Fenómenos Atmosféricos que afectan a las Comunicaciones Vía satélite," en *Planificación y Dimensionamiento de Sistemas de Comunicación Vía Satélite*, N. A. Perez-Garcia, J. M. Torres-Tovio, A. D. Pinto-Mangones and E. J. Ramirez, Eds. Montería, Colombia: Sello Editorial Corporación Universidad del Sinú, 2018, pp. 72-121.
- [4] J. M. Torres-Tovio, A. D. Pinto-Mangones, N. A. Pérez-García, K. L. Buelvas-Cantero, S. O. Castaños-Rivera and M. L. Pérez-Cabrera, "Cálculo de Enlace en Sistemas de Comunicación Vía Satélite," en *Planificación y Dimensionamiento de Sistemas de Comunicación Vía Satélite*, N. A. Perez-Garcia, J. M. Torres-Tovio, A. D. Pinto-Mangones and E. J. Ramirez, Eds. Montería, Colombia: Sello Editorial Corporación Universidad del Sinú, 2018, pp. 122-140.
- [5] International Telecommunication Union, "ITU-R Recommendation P.618-14: Propagation Data and Prediction Methods required for the Design of Earth-space Telecommunication Dystems," Geneva, Switzerland, 2023.
- [6] A. A. Kadkol, "Mathematical Model of Particle Swarm Optimization: Numerical Optimization Problems," in *Applying Particle Swarm Optimization: New Solutions and Cases for Optimized Portfolios*, B. A. Mercangoz, Ed. Cham, Switzerland: Springer, 2021, pp. 73-95.
- [7] A. D. Pinto-Mangones, N. A. Perez-Garcia and X. A. Lascano-Filian et al., "Evaluation of 1-minute Integration Time Rain Rate Statistics in Ecuador for Radio Propagation Applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 7, pp. 1298-1302, July 2022. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2022.3161903>
- [8] N. Pérez-García, A. D. Pinto and J. M. Torres et al., "Preliminary Rain Rate Statistics with One-minute Integration Time for Radio Propagation Uses in Venezuela," *Electronics Letters*, vol. 59, no. 6, pp. 1-3, March 2023. <https://doi.org/10.1049/el12.12725>
- [9] Union Internacional de Telecomunicaciones, "Recomendación UIT-R P.837-7: Características de la Precipitación para establecer Modelos de Propagación," Ginebra, Suiza, 2017.
- [10] K. S. Kaswan, J. S. Singh and A. Kumar A, *Swarm Intelligence. An Approach from Natural to Artificial*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2023.
- [11] A. D. Pinto-Mangones, J. M. Torres, H. Bula, T. P. Pérez-Di Santis and N. A. Pérez-García, "Optimización de un Arreglo Circular de Antenas con Distribución Continua de Corriente de Alimentación, utilizando PSO (*Particle Swarm Optimization*)," *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 20, no. 81, pp. 202-212, Diciembre 2016. [Online]. [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1316-48212016000400007&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212016000400007&lng=es&nrm=iso&tlng=es) [Accessed: Feb. 6, 2024].
- [12] N. A. Pérez-García, A.D. Pinto and J. M. Torres et al., "Improved ITU-R Model for Digital Terrestrial Television Propagation Path Loss Prediction," *Electronics Letters*, vol. 53, no. 13, pp. 832-834, June 2017. <https://doi.org/10.1049/el.2017.1033>
- [13] L. Rajasekar and N. A. Prabha, "Carrier Interference Compensation using PSO Algorithm," *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, Special Issue, vol. 118, no. 18E, pp. 4031-4037, 2018. [Online]. <https://acadpubl.eu/jsi/2018-118-18/issue18e.html> [Accessed: Dec. 19, 2023].
- [14] Y. Zhang and L. Yan L., "Face Recognition Algorithm Based on Particle Swarm Optimization and Image Feature Compensation," *SoftwareX*, vol. 22, article 101305, pp. 1-15, May 2023. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2023.101305>
- [15] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN 1995), Perth, Australia, November-December 1995. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- [16] D. P. Kumar, "Particle Swarm Optimization: The Foundation," in *Applying Particle Swarm Optimization: New Solutions and Cases for Optimized Portfolios*, Mercangoz B.A., Ed. Cham, Switzerland: Springer, 2021, pp. 97-110.
- [17] D. Elhani D., A. C. Megherbi, A. Zitouni, F. Dornaika, S. Sbaa and A. Taleb-Ahmed, "Optimizing Convolutional Neural Networks Architecture Using a Modified Particle Swarm Optimization for Image Classification," *Expert Systems with Applications*, vol. 229, part A, article 120411, pp. 1-17, November 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120411>
- [18] E.R. Delgado-Cuadro, "Optimización de la Recomendación ITU-R P.1812-3, para la Predicción de Pérdidas de Propagación en Sistemas de Televisión Digital Terrestre (TDT)," Trabajo de Titulación, Maestría en Telecomunicaciones, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2016. [Online]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/aafb3b7c-9db1-4bb4-83b6-34d324c220a4/D-106120.pdf> [Accessed: Dec. 12, 2023].
- [19] A. Kaveh. *Advances in Metaheuristic Algorithms for Optimal Design of Structures*. Third Edition. Cham, Switzerland: Springer, 2021.
- [20] P. M. Kalaivaanan, A. Sali, R. S. A. R. Abdullah, S. Yaakob, M. J. Singh and A. M. Al-Saegh, "Evaluation of Ka-Band Rain Attenuation for Satellite Communication in Tropical Regions Through a Measurement of Multiple Antenna Sizes," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 18007-18018, January 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2966873>
- [21] D. Lakanchanh, P. Udomareyasap, N. Leelaruji and N. Hemmakorn, "Propagation Effect by Rain in Ku and Ka band Satellite Communication System," 2006 International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT 2006), Bangkok, Thailand, October 2006. <https://doi.org/10.1109/ISCIT.2006.339921>
- [22] D. Lakanchanh, A. Datsong, N. Leelaruji and N. Hemmakorn, "Rainfall Rate and Rain Attenuation in Ku-Band Satellite Signal in Thailand and Laos," 2006 SICE-ICASE International Joint Conference, Busan, Korea (South), October 2006. <https://doi.org/10.1109/SICE.2006.314906>
- [23] M. Zemba, J. Nessel, C. Riva, L. Luini and G. Goussetis G., "NASA's Alphasat Propagation Terminals: Milan, Italy, and Edinburgh, Scotland," *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 37, no. 5 (Special Issue: Alphasat Aldo Paraboni Ka and Q/V Experiment), pp. 502-512, September/October 2019. <https://doi.org/10.1002/sat.1296>
- [24] L. Luini, "Theoretical and Experimental Investigation of Second-order Atmospheric Effects Impairing W-band SatCom Systems," Final Technical Report, Air Force Office of Scientific Research (AFOSR), United States, 2022.