

**SISTEMA DE CONSULTA EN LÍNEA SOBRE PROPUESTA NORMATIVA PARA
PROMOCIÓN DEL USO EFICIENTE DEL ESPECTRO**

FABIAN HUMBERTO HERRERA SANTANA

UNIVERSIDAD EL EXTERNADO DE COLOMBIA

FACULTAD DE DERECHO

BOGOTÁ D.C.

2019

**SISTEMA DE CONSULTA EN LÍNEA SOBRE PROPUESTA NORMATIVA PARA
PROMOCIÓN DEL USO EFICIENTE DEL ESPECTRO**

FABIAN HUMBERTO HERRERA SANTANA

**Trabajo de grado para optar al título de maestría en derecho del estado con
énfasis en regulación y gestión de telecomunicaciones**

Directora: MARTHA LILIANA SUAREZ PEÑALOZA

UNIVERSIDAD EL EXTERNADO DE COLOMBIA

FACULTAD DE DERECHO

BOGOTÁ D.C.

2019

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

AGRADECIMIENTOS

Considero el desarrollo del presente proyecto un gran hito en mi trayectoria académica y laboral, y definitivamente existen numerosas personas y entidades a quienes debo agradecer por su apoyo moral o económico pues sin su colaboración alcanzar esta meta hubiera sido solo un sueño. A continuación, relaciono a algunas de ellas, consciente de que se me pueden estar escapando muchas más.

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, a mi esposa y a mi familia por el soporte que en mi vida representan y por contagiarme de la fortaleza necesaria para afrontar cualquier reto.

Agradezco también a la Universidad Externado de Colombia por su calidad en educación, por ideología de libertad de pensamiento, que además de pregonar también defiende y adopta como parte de su ADN.

Un agradecimiento especial Al Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, en particular al programa de Gobierno Digital por su apoyo económico para el desarrollo de este estudio postgradual.

CONTENIDO

	Pág.
1 INTRODUCCIÓN	1
2 EFICIENCIA EN EL USO DEL ESPECTRO.....	3
2.1 CONCEPTOS TÉCNICOS	3
2.1.1 Sistemas de comunicación.....	3
2.1.2 Eficiencia en el uso del espectro	4
2.1.3 Modulación	5
2.1.4 Tipos de modulación.....	6
2.1.5 Eficiencia espectral y otros parámetros de calidad	7
2.1.6 Capacidad del canal	8
2.2 ANÁLISIS DE RECOMENDACIONES INTERNACIONALES SOBRE USO EFICIENTE DEL ESPECTRO.....	10
2.2.1 Manual de Gestión de espectro de la UIT	10
2.2.2 Recomendación UIT-R SM.1046.....	13
2.2.3 Recomendación UIT-R SM. 1271.....	17
2.2.4 Recomendación UIT-R. SM 856.....	18
2.2.5 Recomendación UIT-R SM.1599.....	19
3 EFICIENCIA EN DERECHO COMPARADO	20
3.1 ESTADOS UNIDOS	20
3.2 MÉXICO	27
3.3 BRASIL	36
3.4 PERÚ	40
3.5 COLOMBIA	46
4 PROPUESTA PARA MEDICIÓN DE EFICIENCIA.....	53
5 SISTEMA DE CONSULTA EN LÍNEA	62

CONCLUSIONES	68
BIBLIOGRAFÍA	70

TABLA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Elementos de un sistema de comunicaciones	3
Figura 2. Marco institucional para la gestión del espectro en los EE.UU.	21
Figura 3. Estructura del sistema de consulta en línea.....	62
Figura 4. Página Principal - Uso eficiente del espectro ANE.....	63
Figura 5. Resolución - Uso eficiente del espectro ANE.....	63
Figura 6. Reporte de Información - Uso eficiente del espectro ANE	65
Figura 7. Propuesta de Medición - Uso eficiente del espectro ANE	65
Figura 8. Página de Bibliografía - Uso eficiente del espectro ANE.....	67

1 INTRODUCCIÓN

La importancia de las telecomunicaciones para el desarrollo económico y social es ampliamente reconocida a nivel mundial. Por tal razón, cada día se desarrollan nuevas aplicaciones de telecomunicaciones y la demanda de servicios crece de manera exponencial¹, lo cual genera como consecuencia también una demanda exponencial de espectro.

La parte del espectro electromagnético usado para las telecomunicaciones, conocida como espectro radioeléctrico, es una porción limitada en la cual se deben organizar todos los servicios de telecomunicaciones existentes garantizando operatividad de todos ellos, por lo que el uso eficiente del espectro es un elemento importante para cualquier administración. El espectro radioeléctrico como recurso limitado además cuenta con un importante valor económico y social.

Con la evolución de la tecnología se han realizado importantes avances en cuanto al mejor aprovechamiento del espectro radioeléctrico, esto es, en su uso eficiente, como se presentará más adelante en el presente documento. La búsqueda de una mayor eficiencia espectral no se da solamente en el plano técnico, las diferentes administraciones trabajan en medidas administrativas, económicas y regulatorias para promover el uso eficiente del recurso y obtener el mayor beneficio social posible.

El presente documento realiza una revisión de las estrategias administrativas, económicas, técnicas y regulatorias para promover el uso eficiente del espectro, identificando mejores prácticas y realizando una evaluación del marco normativo colombiano y la pertinencia de desarrollar o complementar la regulación existente.

Finalmente, el presente trabajo propone la publicación de los resultados de la investigación en un sistema de consulta en línea para facilitar su divulgación entre los interesados.

El contenido relevante del presente documento se ha dividido en capítulos estructurados de la siguiente manera:

¹ ERICSSON. *Ericsson Mobility Report*. Junio 2017. Estocolmo, Suecia. Disponible en: <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2017/ericsson-mobility-report-june-2017.pdf>. Fecha de consulta: 24 de junio de 2018.

El capítulo denominado ***Eficiencia en el uso del espectro*** presenta las definiciones básicas necesarias para la comprensión del documento, continua con la formulación usada a nivel internacional para el Factor de Utilización del Espectro (EUF) y la Eficiencia en el Uso del Espectro (EUE) y finaliza con el análisis de las recomendaciones internacionales con relación a la eficiencia en el uso del espectro. Más que un desarrollo propio del autor es una presentación en sus propias palabras de teoría que ya ha sido suficientemente desarrollada en la literatura.

El capítulo denominado ***Eficiencia en derecho comparado*** realiza un benchmarking sobre normatividad en uso del espectro en diferentes países, identificando mejores prácticas. Adicionalmente se realiza un análisis de la normatividad vigente en Colombia y se realizan recomendaciones en cuanto a aplicación de mejores prácticas internacionales.

El capítulo denominado ***Propuesta para medición de eficiencia*** se desarrolla una propuesta de cálculo de la eficiencia en el uso del espectro para redes móviles, priorizando la simplicidad, puesto que de la investigación desarrollada en capítulos anteriores se concluye que la barrera de implementación hasta el momento ha sido precisamente la complejidad de cálculo y cantidad de información requerida.

El capítulo denominado ***Sistema de consulta en línea*** propone la publicación de una sistema de consulta en línea para la propuesta desarrollada, un primer desarrollo incluyendo la información que debería ser puesta en conocimiento del público es presentado.

Finalmente, el capítulo ***Conclusiones*** condensa los resultados obtenidos durante la investigación.

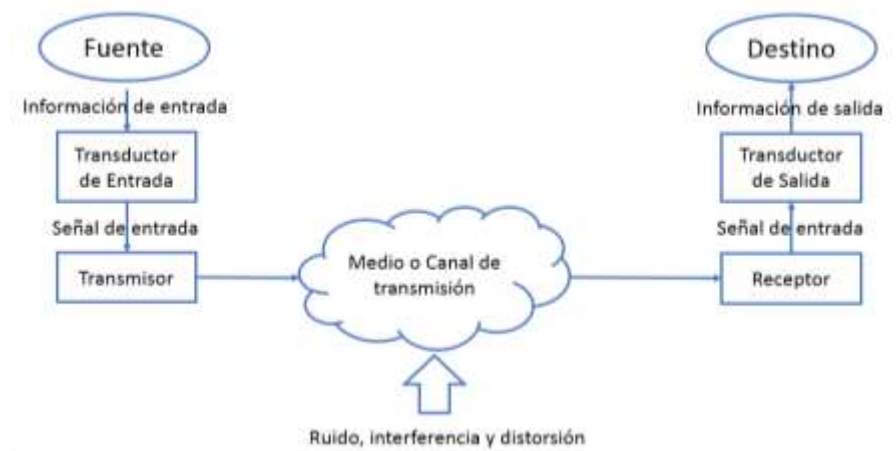
2 EFICIENCIA EN EL USO DEL ESPECTRO

2.1 CONCEPTOS TÉCNICOS

2.1.1 Sistemas de comunicación

Un sistema de comunicación puede ser definido como el conjunto de elementos (transmisor, canal, receptor) que hacen posible la transmisión de información de un punto a otro. Si en el sistema de comunicación intervienen tecnologías electrónicas, entonces estamos hablando de un sistema electrónico de comunicaciones y es posible que se requieran de elementos adicionales (transductores) que adecuen la información transmitida en forma de una señal que pueda ser enviada por el transmisor a través del canal, en cuyo caso se tendría un sistema como el mostrado en la Figura 1.

Figura 1. Elementos de un sistema de comunicaciones



Fuente: propia

En cuanto a los elementos que componen el sistema de comunicaciones, el transmisor es el encargado de adecuar el mensaje al canal presentándolo en forma de señal². Para lograr una transmisión eficiente y efectiva, se deben desarrollar varias operaciones de procesamiento de la señal. La más común e importante es la

² EVELIUX. *Modelo de un sistema de comunicaciones*. En: Artículos sobre redes, telecomunicaciones y tecnologías de la información. Disponible en: <http://www.eveliux.com/mx/Modelo-de-un-sistema-de-comunicaciones.html>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

modulación, un proceso mediante el cual se modifica uno o varios parámetros de una señal portadora (amplitud, frecuencia, fase) con base en el mensaje, teniendo en cuenta las características físicas del canal de transmisión. El canal de transmisión es el medio entre el transmisor y el receptor, por el cual viajará la señal modulada conteniendo el mensaje. Este medio puede ser un par de alambres de cobre, un cable coaxial, el aire, etc. En todos los medios de transmisión se presenta el fenómeno de atenuación, esto es, la disminución progresiva de la potencia de la señal conforme viaja a través del canal. Por su parte, el Receptor es encargado de recibir la señal que llega por el canal, realizar la demodulación respectiva y entregarla al transductor de salida.

2.1.2 Eficiencia en el uso del espectro

Un caso especial de los sistemas de comunicación son aquellos que usan el espectro radioeléctrico como canal de comunicación, permitiendo que la transmisión de la información se realice de forma inalámbrica. En este caso, el espectro radioeléctrico se convierte en un recurso compartido, generando retos adicionales como mayores posibilidades de interferencia.

En este punto se hace evidente la característica de escases del recurso entendido como un medio de comunicación que debe ser compartido por una enorme cantidad de servicios, aplicaciones y usuarios de telecomunicaciones, con lo cual la necesidad de hacer un uso eficiente toma mucha importancia.

La **eficiencia en el uso del espectro** radioeléctrico es un concepto mucho más amplio que el de **eficiencia espectral**³, ya que implica no solo una optimización desde el punto de vista técnico, sino la consideración de muchas otras variables tales como la igualdad en la oportunidad de acceso al recurso, la posibilidad de que sea utilizado para todas las aplicaciones de radiocomunicaciones existentes, la atribución a los servicios que más beneficio social generen, la asignación a los usuarios/operadores que más lo valoren, entre otras.

³ La eficiencia espectral es una medida netamente técnica que será presentada en los numerales siguientes y da razón del aprovechamiento del ancho de banda asignado para una transmisión de información en un sistema de comunicación determinado.

En la edición del año 2005 del Manual de Gestión Nacional del Espectro de la UIT⁴, el cual es un documento cuyo propósito es servir de guía para la gestión del espectro radioeléctrico que realizan las diferentes administraciones, se aborda el tema definiéndolo como eficacia⁵ en el uso del espectro radioeléctrico. Dicho manual enuncia en su introducción lo siguiente: *"Aunque no es fácil definir qué se entiende por eficacia de un sistema de gestión del espectro, se sabe que, en general, está relacionada con la capacidad del sistema para satisfacer las necesidades del país, y salvaguardar el interés general cuando se distribuye el espectro entre los usuarios de las radiocomunicaciones"*⁶, el cual presenta la relación entre el uso eficaz del espectro y la satisfacción de las necesidades de cada país.

2.1.3 Modulación

Modulación es el proceso mediante el cual la información es transformada en una señal adecuada para su transmisión por el canal de comunicación. La modulación se logra modificando algún parámetro de una señal portadora de acuerdo con la información que se desee transmitir. La modificación de dicho parámetro debe ser reversible, esto es, debe poder seguirse un proceso inverso mediante el cual el receptor pueda recuperar la información a partir de la señal transmitida, que al ser recibida se encontrará degradada luego de su paso por el canal de transmisión. Este último proceso se conoce como demodulación. Un equipo electrónico que realice los procesos tanto de modulación como de demodulación se conoce como MODEM.

En muchas ocasiones la degradación de la señal al pasar por el canal es tanta que es imposible reconstruir la información. En realidad, el nivel de degradación que permite la reconstrucción de la información enviada depende en gran medida del

⁴ UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Manual de Gestión Nacional de Espectro*. Oficina de Radiocomunicaciones. Edición 2005. Disponible en: <https://www.itu.int/pub/R-HDB-21-2005/es>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

⁵ El término "eficacia", empleado en la versión en español de los documentos de la UIT es presentado en las versiones en inglés como "efficiency". La definición de "efficiency" que se presenta en diccionarios de inglés (<http://www.merriam-webster.com/dictionary/efficiency>) se ajusta a la definición en español de la palabra "eficiencia" (<http://dle.rae.es/?id=EPVwpUD>). Por lo anterior, cuando se citen en textos de la UIT la palabra "eficacia" se debe entender como "eficiencia".

⁶ UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Manual de Gestión Nacional de Espectro*. Oficina de Radiocomunicaciones. Edición 2005. Disponible en: <https://www.itu.int/pub/R-HDB-21-2005/es>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

tipo de modulación utilizado, así como también la cantidad de espectro necesaria para la transmisión de la señal.

2.1.4 Tipos de modulación

La clasificación más general para los tipos de modulación es: a) modulación análoga y b) modulación digital.

La modulación análoga consiste en usar una señal con forma de onda senoidal, a la cual se le varía alguno de sus parámetros. Esta señal se conoce como portadora. Dependiendo del parámetro que se varíe se obtiene una modulación diferente, si se varía la amplitud de la señal se tiene una modulación en amplitud (AM), si se varía la frecuencia se tiene una modulación en frecuencia (FM) y si se varía la fase se tiene una modulación de fase (PM). Estos esquemas de modulación análoga son muy usados en radiodifusión de radio y televisión, aunque actualmente muchos países se encuentran en una etapa de migración de modulación análoga a digital para estos servicios, por las ventajas que esta última ofrece como tolerancia al ruido y mayor eficiencia espectral.

En una modulación digital, las señales de modulación y demodulación son pulsos digitales (representaciones de 1's y 0's), en lugar de formas de ondas analógicas⁷. Aun así, la transmisión puede usar portadoras analógicas. En esencia, hay tres técnicas de modulación digital que se suelen utilizar⁸: transmisión (modulación) por desplazamiento de frecuencia (Frequency-Shift Keying, FSK), transmisión por desplazamiento de fase (Phase-Shift Keying, PSK), y modulación directa por desplazamiento de amplitud (Amplitud-Shift Keying, ASK), sin embargo, es raro usar la ASK a menos que se use el código Morse. Existe en cambio, una variación conocida como modulación por amplitud en cuadratura (Quadrature Amplitud Modulation, QAM) que si es muy común⁹.

⁷ ELECTRÓNICA DIGITAL. *Modulación digital: FSK-PSK-QAM*. Disponible en: <https://www.electronicafacil.net/tutoriales/MODULACION-DIGITAL-FSK-PSK-QAM.php>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

⁸ Conservada desde los días del código Morse, la palabra keying suele utilizarse para denotar esquemas de modulación digital.

⁹ BLAKE, Roy. *Sistemas electrónicos de comunicaciones*. Segunda edición. Ed. Thomson. 2004. 985 págs.

2.1.5 Eficiencia espectral y otros parámetros de calidad

Cuando se diseña un sistema de comunicaciones, especialmente aquellos que son radiodifundidos, se busca entre otros objetivos, lograr un uso adecuado del canal de transmisión, esto es, hacer un uso eficiente del espectro radioeléctrico en reconocimiento de su condición de recurso limitado. Para lo anterior, se define la **eficiencia espectral** como un parámetro que da cuenta del adecuado aprovechamiento que se hace de determinada banda de frecuencia usada para la transmisión de las señales.

Para el caso de las comunicaciones analógicas, es decir aquellas que transmiten las señales análogas moduladas mediante técnicas análogas, como es el caso de la radiodifusión sonora (con modulaciones AM y FM) y de la antigua radiodifusión de televisión con modulación analógica, la eficiencia espectral se define directamente como el ancho de banda usado para la transmisión de determinada señal. Las fórmulas matemáticas para el cálculo de los anchos de banda requeridos en cada tipo de modulación análoga pueden ser consultados en cualquier libro de sistemas de comunicación^{10 11}.

Por otra parte, la eficiencia espectral no es el único parámetro usado para dar razón de la calidad del sistema de comunicación análogo, también se encuentra por ejemplo la **relación señal a ruido SNR** (*Signal-Noise Ratio*) la cual da razón de la confiabilidad de la modulación frente a la presencia de ruido en el canal de transmisión.

Para el caso de los sistemas de comunicación con modulación digital, la SNR definida para sistemas análogos no aporta información valiosa por cuanto en un sistema digital el aumento de ruido no implica mayores errores en los bits transmitidos. Por lo anterior, para sistemas digitales se realiza la definición de un parámetro más adecuado conocido como **BER** (*Bit Error Rate*), que da razón de la confiabilidad de la comunicación frente a pérdidas de información en los sistemas digitales.

Por su parte, la eficiencia espectral para sistemas digitales se define matemáticamente de la siguiente manera:

¹⁰ *Ibíd.*

¹¹ HAYKIN, Simón. *Sistemas electrónicos de comunicación*. Primera edición. Ed. Limusa Wiley. 2002. 816 págs.

$$E=R/B \text{ [bps/Hz]}$$

En donde **R** es la tasa de transmisión expresada en bits por segundo [**bits/s=bps**] y **B** representa el ancho de banda utilizado para la transmisión en Hertz [**Hz**].

De la definición matemática se observa que la eficiencia espectral da razón de la velocidad de transmisión de cada bit por cada Hertz utilizado. En la práctica, la eficiencia espectral se interpreta como una medida de que tan eficientemente se está haciendo uso de la banda de frecuencia usada en la transmisión, así, entre más alto es el valor de la eficiencia espectral, mejor uso se está haciendo de la banda de frecuencia.

2.1.6 Capacidad del canal

Usualmente un sistema de comunicaciones inalámbrico debe operar dentro de una banda de espectro delimitada, por lo cual, la única posibilidad para aumentar la velocidad de transmisión de datos es aumentar la eficiencia espectral de la modulación. Como ejemplo, citemos el caso presentado por María Carmen España Boquera, en su libro Servicios Avanzados de telecomunicación¹², en el cual se supone una comunicación de régimen binario (representación de bits con valores de 0 o 1 únicamente) para la cual el mínimo ancho de banda que permite realizar una transmisión libre **interferencias entre símbolos**¹³ corresponde a un canal con respuesta espectral rectangular cuyo ancho de banda es igual a la mitad de la tasa de transmisión, es decir, **B=R/2**. Esta condición derivada por Nyquist determina la máxima eficiencia espectral de un enlace en banda base binario, que aplicando la definición matemática resultaría en que **E=R/B=R/(R/2)=2 [bps/Hz]**.

Sin embargo, menciona la autora que la forma rectangular de la respuesta de este canal no es la más adecuada, en primer lugar, porque es muy difícil implementar la caída abrupta en el límite de la banda y, en segundo lugar, porque la **respuesta impulso**¹⁴ asociada, que es una señal **Sinc**, ocasiona que el sistema sea muy sensible a fluctuaciones en el instante de muestreo. Por tanto, suelen elegirse

¹² ESPAÑA BOQUERA, María Carmen. *Servicios Avanzados de telecomunicación*. Ed. Díaz de Santos S.A. España. 2003. 780 págs.

¹³ Interferencias entre símbolos hace referencia a la interferencia que se genera en un canal de comunicaciones entre dos símbolos consecutivos, 1s o 0s.

¹⁴ La respuesta a una entrada conformada por una señal impulso a un sistema lineal e invariante con el tiempo permite caracterizar el comportamiento del sistema.

formas de canal con descensos suavizados en el límite de la banda, los cuales deben cumplir la condición de presentar simetría impar en la frecuencia $f=R/2$, con lo cual el ancho de banda aumenta. Una de las formas habitualmente implementadas es la de coseno elevado. Para esta forma de respuesta en frecuencia, el ancho de banda resultante es de $B=(1+R_o)R/2$, siendo R_o el factor que representa el incremento de ancho de banda con respecto al filtro de Nyquist y cuyo valor se encuentra entre 0 y 1. Como consecuencia la eficiencia espectral se reduce y pasa a valer $E=2/(1+R_o)$. Así, para un valor típico de $R_o=1/3$, la eficiencia espectral resultante es de $E=1,5$ [bps/Hz].

Ahora bien, la modulación también afecta la eficiencia espectral, así por ejemplo, al modular una señal en amplitud, el ancho de banda requerido para la transmisión se duplica, con lo cual la eficiencia espectral se reduce a la mitad. Como ejemplo, en un canal telefónico, con un ancho de banda de $B=3,1$ KHz se podría alcanzar una tasa de transmisión para una señal modulada en AM con una portadora senoidal de máximo de $2,4$ Kbps. Sin embargo, hoy en día se dispone de modems cuyas velocidades de transmisión llegan a los $33,6$ Kbps.

Como se puede observar, las tasas de transmisión logradas son superiores al límite establecido por el criterio de Nyquist. Esto es posible al implementar modulaciones multinivel en vez de códigos binarios, a costa de mayor complejidad en el sistema ya que para la misma tasa de bits, la densidad espectral de potencia que generan estos códigos ocupa un menor ancho de banda, por lo que representan una mayor eficiencia espectral.

En una señalización en banda base multinivel, una secuencia de m bits consecutivos se hace corresponder a uno entre $M=2^m$ símbolos (por ejemplo, niveles de amplitud distintas). Si el periodo de duración de cada uno de estos símbolos es T_s , la tasa binaria asociada es m/T_s . Siguiendo el criterio de Nyquist, esto corresponde a una eficiencia espectral de $E=2m=2 \log_2 M$ [bps/Hz]. Si, además, se tienen en cuenta la forma del canal distinta de rectangular y una modulación paso banda (la cual requiere el doble del ancho de banda base), se obtiene que la eficiencia espectral resultante es $E=2 \log_2 M / (1+R_o)$ [bps/MHz]. Según esta última expresión, sería factible aumentar indefinidamente la capacidad del canal tan solo incrementando el número de niveles empleados. Sin embargo, esta conclusión es errónea, ya que no se ha tenido en cuenta el ruido del canal. Así, existen dos factores principales que limitan la eficiencia espectral, que son la interferencia entre símbolos y el ruido.

En presencia de ruido, la máxima capacidad de un canal obedece la siguiente ley, según Shannon: $C=2B \log_2 \sqrt{1+SNR}$. La máxima eficiencia espectral es, por lo tanto, $E=2B \log \sqrt{1+SNR}$.

El punto para resaltar es que la eficiencia espectral de un sistema de comunicaciones depende del esquema de modulación y se encuentra limitada al valor impuesto por el teorema de Shannon.

2.2 ANÁLISIS DE RECOMENDACIONES INTERNACIONALES SOBRE USO EFICIENTE DEL ESPECTRO

Una medida de eficiencia relaciona los recursos utilizados para la consecución de un fin, con los logros obtenidos. Así, un sistema es más eficiente en tanto consiga mayores logros con menos recursos. En este orden de ideas, la eficiencia en el uso del espectro podría definirse de muchas formas dependiendo de cómo se conciben los logros, los cuales podrían estar definidos en términos económicos, sociales, técnicos, etc.

A continuación, se presenta un análisis de las definiciones y recomendaciones expedidas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) con relación a este tema.

2.2.1 Manual de Gestión de espectro de la UIT

El Manual de Gestión de Espectro de la UIT fue publicado en 1995¹⁵ y actualizado en 2005¹⁶ y en 2015¹⁷, este manual menciona: *“La eficacia de utilización del espectro es una medida técnica de con qué eficacia se está utilizando el espectro. La fórmula de la eficacia de utilización del espectro es una fórmula conceptual general a la que se tienen que añadir muchos detalles antes de que se pueda aplicar*

¹⁵ UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Manual de Gestión Nacional de Espectro*. Oficina de Radiocomunicaciones. Edición 1995. Disponible en: <https://www.itu.int/pub/R-HDB-21-1995/es>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

¹⁶ UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Manual de Gestión Nacional de Espectro*. Oficina de Radiocomunicaciones. Edición 2005. Disponible en: <https://www.itu.int/pub/R-HDB-21-2005/es>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

¹⁷ UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Manual de Gestión Nacional de Espectro*. Oficina de Radiocomunicaciones. Edición 2015. Disponible en: <https://www.itu.int/pub/R-HDB-21/es>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

a un determinado problema”. Con esta definición la UIT previene de la necesidad de adaptar la fórmula a cada caso para su aplicabilidad.

Una primera aproximación para buscar estandarización y comparabilidad es utilizar las definiciones realizadas en el Manual de Gestión de Espectro de la UIT, en el cual se proponen formas para el cálculo de la eficiencia. Para ello define en primer lugar el concepto de **utilización de espectro** como: “la cantidad de espectro radioeléctrico que se está utilizando en una determinada circunstancia”¹⁸. La utilización del espectro se puede definir mediante la siguiente fórmula:

$$U = B \times S \times T$$

Donde

- *U*: factor de utilización del espectro.
- *B*: anchura de banda de frecuencia.
- *S*: espacio geométrico (normalmente una superficie).
- *T*: tiempo.

El valor de utilización del espectro refleja que un sistema radioeléctrico funciona a una determinada frecuencia situada en una determinada anchura de banda, en un determinado emplazamiento y en por un tiempo dado.

Ahora bien, el valor de la utilización del espectro sirve de entrada para calcular la **eficacia en la utilización del espectro (EUE)**, definida como la relación entre la información transferida y el grado de utilización del espectro. Para ello se emplea la siguiente expresión:

$$EUE = M / U = M / (B \times S \times T)$$

Donde:

- *M*: efecto útil que se consigue con el sistema de telecomunicaciones considerado
- *U*: factor de utilización del espectro para ese sistema.

Por otra parte, dado que es posible usar la información sobre la eficacia de utilización del espectro para comparar las eficacias de dos sistemas, resulta conveniente definir una **eficacia relativa del espectro (ERE)**. Dicha eficacia relativa

¹⁸ *Ibíd.* p. 286.

presenta la ventaja de entregar un dato más fácil de analizar que el valor de eficiencia en la utilización del espectro en sí. La fórmula para la eficacia relativa en la utilización del espectro es:

$$ERE = EUE_r / EUE_p$$

Donde:

- *ERE*: eficiencia relativa en la utilización del espectro, es decir la relación entre las EUE
- *EUE_p*: eficiencia en la utilización del espectro de un sistema «patrón»
- *EUE_r*: eficiencia en utilización del espectro de un sistema real.

No obstante lo anterior, el Manual de Gestión de Espectro de la UIT expone la siguiente consideración: *“Cabe destacar que aunque la eficacia de utilización del espectro es un factor importante, no es el único factor que hay que considerar. Otros factores son la selección de la tecnología o del sistema, así como las repercusiones económicas, la disponibilidad del equipo, su compatibilidad con equipos y técnicas existentes, la fiabilidad del sistema y otros factores de explotación.”*¹⁹

Finalmente, el Manual de Gestión de Espectro indica que las medidas para la utilización del espectro constituyen un punto de partida para la comparación de sistemas en el mismo servicio y sugiere un conjunto de medidas básicas, que, si se implantan con limitaciones técnicas y financieras, lograrán mejorar la eficacia de utilización del espectro. Las medidas mencionadas son las siguientes:

“1. Optimizar (cuando se desarrollan nuevas instalaciones o se modernizan sistemas radioeléctricos) los parámetros electromagnéticos del sistema que determinan el volumen frecuencia-espacio con el fin de reducir dicho volumen, facilitando así la compartición de frecuencias entre diferentes servicios y acomodando más redes en una zona determinada.

2. Planificar redes teniendo en cuenta las características nominales de los sistemas radioeléctricos, en particular reduciendo «márgenes» innecesarios en la potencia de transmisión, la altura de las antenas, la intensidad de campo de la señal recibida, etc.

¹⁹ *Ibíd.* p. 286.

3. Utilizar configuraciones de red para servicios de radiocomunicaciones y de radiodifusión, que se aproximen tanto como teóricamente sea posible a las redes óptimas, desde el punto de vista de la eficacia de utilización del espectro.

4. Adoptar técnicas de modulación y parámetros de equipos para una utilización eficaz de las bandas de frecuencias, con el fin de acercarse lo más posible a un «sistema radioeléctrico ideal».

5. Utilizar el factor tiempo junto con un sistema apropiado para mejorar la eficacia de utilización del tiempo.”²⁰

De los párrafos anteriores se concluye qué:

- El Manual de Gestión de Espectro define la eficacia de utilización del espectro como una medida técnica de con qué eficacia se está utilizando el espectro.
- La medición de la eficacia en la utilización del espectro es diferente para cada tipo de sistema o servicio.
- La eficiencia en la utilización del espectro es una expresión compleja que contempla el efecto útil y el uso del espectro del sistema de comunicación analizado.

La eficiencia en la utilización del espectro es un concepto que se puede aterrizar de formas diferentes, al considerar las variables técnicas y económicas relacionadas con los sistemas de comunicaciones.

2.2.2 Recomendación UIT-R SM.1046

La Recomendación UIT-R SM.1046 “Definición de la eficacia en la utilización del espectro por un sistema de radiocomunicaciones”²¹, la cual considera que existen diversos factores que influyen en la utilización eficaz del espectro, y que es necesario definir el grado de eficacia de utilización de espectro (EUE), especialmente mediante tecnologías nuevas o mejoradas, recomienda lo siguiente:

1 que, como concepto básico, se utilice el dominio combinado anchura de banda – espacio - tiempo como medida de la utilización del espectro, el

²⁰ Ibíd. p. 299.

²¹ UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). Recomendación UIT-R SM.1046-3. Definición de la eficacia en la utilización del espectro por un sistema de radiocomunicaciones. Oficina de Radiocomunicaciones. Aprobado septiembre de 2017. Disponible en: <http://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1046/en>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

«factor de utilización del espectro», como se indica en el Anexo 1 para los equipos radioeléctricos de transmisión y recepción;

2 que la base para calcular la eficacia de utilización del espectro (EUE), o eficacia espectral para abreviar, sea la determinación del efecto útil que consiguen los sistemas de radiocomunicación mediante la utilización del espectro y el factor de utilización del espectro, como se indica en el Anexo 1. En el Anexo 2 aparecen algunos ejemplos de utilización de este concepto;

3 que, para comparar las eficacias espectrales entre diversos sistemas de radiocomunicaciones, se utilice el concepto básico de eficacia relativa del espectro como se indica en el Anexo 1

4 que las comparaciones entre las eficacias espectrales se lleven a cabo únicamente entre tipos similares de sistemas radioeléctricos que proporcionan servicios de radiocomunicaciones idénticos, como se indica en el § 4 del Anexo 1;

5 que para determinar la EUE se consideren las interacciones de diversos sistemas y redes de radiocomunicaciones dentro de un entorno electromagnético particular²²

En otras palabras, se debe considerar limitar el cálculo de la eficiencia a tipos similares de sistemas que proporcionen servicios idénticos.

2.2.2.1 Factor de utilización del espectro

El Anexo 1 de la Recomendación UIT-R SM.1046 presenta los criterios generales para evaluar el factor de utilización del espectro y grado de eficacia de utilización, para ello presenta en primer lugar el factor de utilización del espectro.

El factor de utilización del espectro es el concepto que refleja que un sistema radioeléctrico funciona a una determinada frecuencia, situada en una determinada anchura de banda, en un determinado emplazamiento y en un instante dado. Se expresa como:

$$U = B \times S \times T$$

²² Ibid. p.1.

Siendo

- *U*: factor de utilización del espectro.
- *B*: anchura de banda de frecuencia.
- *S*: espacio geométrico (normalmente una superficie).
- *T*: tiempo.

Los tres factores deben considerarse de forma simultánea y optimizarse.

Ahora bien, en muchas aplicaciones, la dimensión del tiempo puede ignorarse puesto que el servicio funciona de manera continua. Pero en algunos servicios, es importante compartir el factor tiempo.

Sobre el espacio geométrico de interés, se tiene que está relacionado con los transmisores y los receptores radioeléctricos.

En primer lugar, los transmisores radioeléctricos utilizan el espectro-espacio llenando parte del mismo con potencia radioeléctrica; tanta potencia, en algunos casos, que los receptores de otros sistemas no pueden funcionar en ciertas ubicaciones, horas y frecuencias debido a la aparición de interferencia inaceptable.

En segundo lugar, los receptores utilizan el espectro-espacio porque lo niegan a los transmisores. El simple funcionamiento físico del receptor no provoca ninguna interferencia, sin embargo, las autoridades niegan licencias de explotación a los transmisores a fin de garantizar la recepción libre de interferencias. La protección puede ser en espacio (distancia de separación, distancia de coordinación), en frecuencia (bandas de guarda) o incluso en tiempo. Esta denegación constituye la «utilización» del espacio por parte del receptor. Las bandas de radioastronomía son un ejemplo típico de reconocimiento de utilización del espacio espectral por el receptor.

Debido a lo anterior, se deben incorporar en el cálculo los dos espacios, el espacio del transmisor y el espacio del receptor.

Finalmente, cabe resaltar que el espacio geométrico denegado puede ser un volumen, una línea como por ejemplo la órbita de los satélites geoestacionarios, o un sector angular alrededor de un punto. La cantidad de espacio denegado depende de la densidad espectral de potencia.

2.2.2.2 Eficiencia en la utilización del espectro

El factor de utilización del espectro sirve de entrada para calcular la eficiencia en la utilización del espectro (EUE) a través de la siguiente expresión compleja:

$$EUE = \{M, U\} = \{M, B \cdot S \cdot T\}$$

Donde:

- M : efecto útil que se consigue con el sistema de telecomunicaciones considerado
- U : factor de utilización del espectro para ese sistema.

2.2.2.3 Eficiencia relativa en la utilización del espectro

El concepto de ERE puede utilizarse para comparar las eficiencias en la utilización del espectro de dos tipos similares de sistemas de radiocomunicaciones que proporcionen el mismo servicio.

Esta eficacia relativa se define como la relación entre dos eficiencias en la utilización del espectro, una de las cuales puede ser la eficiencia en la utilización del espectro de un sistema utilizado como patrón de comparación. Es decir,

$$ERE = \frac{EUE_r}{EUE_p}$$

Siendo:

- ERE : eficiencia relativa en la utilización del espectro, es decir la relación entre las EUE.
- EUE_p : eficiencia en la utilización del espectro de un sistema «patrón».
- EUE_r : eficiencia en la utilización del espectro de un sistema real.

Los candidatos más adecuados para un sistema patrón son los siguientes:

- El sistema más eficiente teóricamente.
- Un sistema que puede ser definido y comprendido fácilmente.
- Un sistema ampliamente utilizado que constituya, de hecho, un patrón en la industria.

La ERE será un número positivo con valores entre cero e infinito. Si el sistema patrón elegido es el sistema más eficaz teóricamente, la ERE variará normalmente entre cero y uno.

2.2.3 Recomendación UIT-R SM. 1271

La Recomendación UIT-R SM.1271²³ “*Utilización eficaz del espectro empleando métodos probabilísticos*”, como punto de partida, considera lo siguiente:

- a) *que la tecnología de comunicaciones ha experimentado grandes avances durante la última década y la utilización de los servicios de radiocomunicaciones por las administraciones ha multiplicado la demanda de espectro radioeléctrico;*
- b) *que la compartición de frecuencias es uno de los aspectos importantes para la utilización eficaz del espectro de frecuencias;*
- c) *que muchas directrices y criterios de compartición se basan en las hipótesis de interferencia más desfavorables*
- d) *que la utilización más eficaz del espectro puede depender de la aceptación de criterios de calidad de funcionamiento elaborados mediante la aplicación de métodos probabilísticos;*
- e) *que sería necesario determinar las características estadísticas de las señales deseada e interferente para evaluar las situaciones de compartición del espectro y la utilización del espectro en función de las normas de calidad de funcionamiento,”*²⁴

A partir de lo anterior la UIT recomienda que, para lograr la utilización más eficaz del espectro, se considere la utilización de las probabilidades de interferencia, empleando técnicas tales como las indicadas en el Anexo 1 y en el Anexo 2 de la recomendación UIT-R SM.1271.

En primer lugar, el Anexo 1 de la recomendación UIT-R SM.1271 presenta como ejemplo un método para calcular la probabilidad de interferencia debido a múltiples fuentes interferentes. Este ejemplo parte de la simplificación de la situación con

²³ UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Recomendación UIT-R SM. 1271-0. Utilización eficaz del espectro empleando métodos probabilísticos*. Oficina de Radiocomunicaciones. Aprobado 24 de octubre de 1997. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1271-0-199710-l/en>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

²⁴ *Ibíd.* p 1.

hipótesis como una distribución uniforme de los transmisores interferentes todos radiando la misma potencia, entre otros.

En segundo lugar, el Anexo 2 de la recomendación UIT-R SM.1271 presenta como ejemplo un método para calcular la probabilidad de interferencia de estación de base a estación móvil y de estación móvil a estación de base en un sistema dúplex móvil terrestre. Como se enuncia, el método está restringido al servicio móvil terrestre.

En síntesis, sobre esta recomendación se debe resaltar que la UIT reconoce que los criterios de compartición se basan en las hipótesis de interferencia más desfavorables y que para lograr la utilización más eficaz del espectro, se considere la utilización de las probabilidades de interferencia.

2.2.4 Recomendación UIT-R. SM 856

La Recomendación UIT-R SM.856²⁵ *“Nuevas técnicas y sistemas eficaces desde el punto de vista del espectro”*, recomienda que *“se considere la utilización de compensadores de interferencia, pantallas y antenas adaptativas como método adicional de reducir la interferencia y mejorar la utilización del espectro, permitiendo a los enlaces que interfieren funcionar simultáneamente, con un mínimo de interferencia”*

La Recomendación soporta su propuesta en el ejemplo presentado en el Anexo 1 de la Recomendación UIT-R SM.856, donde se utilizan técnicas de antena adaptativa para reducir la distancia de reutilización cocanal entre estaciones base y, finalmente, concluye que pueden lograrse notables mejoras en la distancia de reutilización utilizando en la estación base antenas adaptativas.

²⁵ UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Recomendación UIT-R SM. 856-1. Nuevas técnicas y sistemas eficaces desde el punto de vista del espectro*. Oficina de Radiocomunicaciones. Aprobado marzo de 1997. Disponible en: <http://www.itu.int/rec/R-REC-SM.856/en>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

2.2.5 Recomendación UIT-R SM.1599

La Recomendación UIT-R SM.1599²⁶ “*Determinación de la distribución geográfica y de las frecuencias del factor de utilización del espectro a efectos de planificación de frecuencias*”, reconociendo que la disponibilidad de frecuencias radioeléctricas del espectro no ocupadas es una condición para satisfacer la demanda del espectro, recomienda lo siguiente

- 1 *que las administraciones utilicen, en los procesos de planificación, datos sobre la distribución geográfica y de las frecuencias del factor de utilización del espectro;*
- 2 *que para determinar la distribución geográfica y de las frecuencias del factor de utilización del espectro se apliquen los métodos que figuran en el Anexo 1.*²⁷

Ahora bien, el anexo 1 de dicha recomendación presenta en primer lugar una descripción general de los métodos para obtener información detallada sobre el grado de congestión del espectro, y en segundo lugar un método simplificado de evaluación detallada del grado de congestión del espectro. Este método simplificado parte del conocimiento de la ubicación de las estaciones que hacen uso del espectro objeto del estudio, del uso del espectro que dichas estaciones realizan y las reglas de separación en frecuencia y en distancia aplicables a las estaciones radioeléctricas de referencia y existentes, entre otras.

Resumiendo, en esta recomendación la UIT reconoce la importancia de evaluar la disponibilidad de espectro y proporciona métodos para evaluar la congestión del espectro.

²⁶ UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Recomendación UIT-R SM. 1599-1. Determinación de la distribución geográfica y de las frecuencias del factor de utilización del espectro a efectos de planificación de frecuencias*. Oficina de Radiocomunicaciones. Aprobado 10 de febrero de 2007. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1599-1-200702-l/en>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

²⁷ *Ibíd.* p.1.

3 EFICIENCIA EN DERECHO COMPARADO

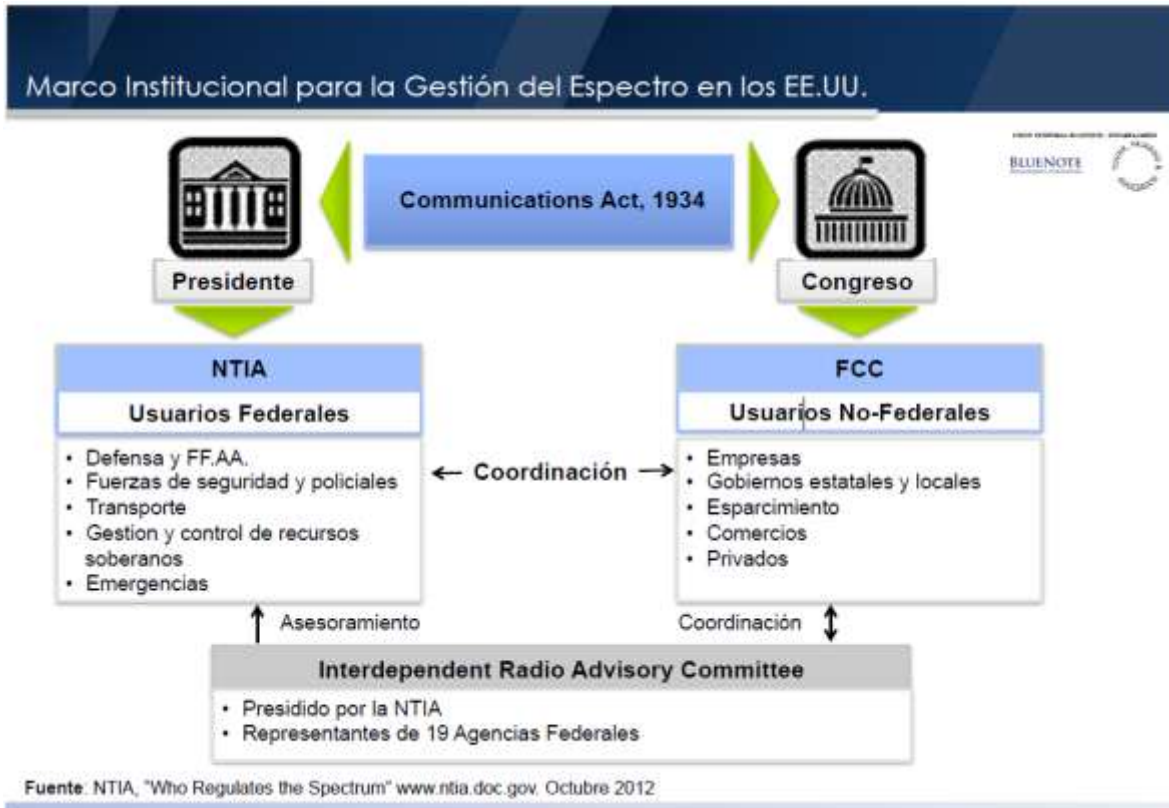
3.1 ESTADOS UNIDOS

Existen en Estado Unidos dos agencias dentro del gobierno con funciones en relación con la gestión del espectro radioeléctrico:

- La *Federal Communications Commission (FCC)*: Creada en el *Communications Act* de 1934 como una agencia independiente del Gobierno, con supervisión y dependencia directa del Congreso. Es la entidad encargada de la regulación de espectro para el sector privado y los gobiernos locales y estatales.
- La *National Telecommunications and Information Administration (NTIA)*: La NTIA dependiente del *Department of Commerce* fue creada en 1978 consolidando otras oficinas preexistentes del Poder Ejecutivo. Es la agencia que asesora al Presidente sobre temas y políticas para las telecomunicaciones y la información, además del rol ejecutivo correspondiente. Sus responsabilidades incluyen la gestión del espectro para uso del Gobierno Federal y la identificación de espectro que se pueda destinar a usos comerciales, en coordinación con la FCC; la promoción de políticas concernientes a la economía de Internet; la administración de fondos y programas para el desarrollo y despliegue de la banda ancha y otras tecnologías en los Estados Unidos; y fomentar la investigación y el desarrollo tecnológico tanto en la industria como en las agencias del gobierno.

Además, existe el *Interdependent Radio Advisory Committee (IRAC)*, un órgano dependiente de la NTIA que tiene como principal función asignar frecuencias entre agencias del gobierno, así como desarrollar y ejecutar políticas, procedimientos y especificaciones técnicas relativas a la asignación, gestión y uso del espectro. Lo anterior se ilustra en la Figura 2.

Figura 2. Marco institucional para la gestión del espectro en los EE.UU.



Fuente: COLOMBIA. Agencia Nacional del Espectro. *Modelos y medidas orientadas a la flexibilización de la gestión de espectro radioeléctrico*. Contrato No. 087/2012 con UT Bluenote – Tovarjardo, Bogotá D.C. 2012.

La distribución de frecuencias entre uso Federal y no Federal se realiza mediante la coordinación entre la FCC y la NTIA.

En cuanto a normatividad, las leyes que rigen el uso del espectro en Estados Unidos son la *Communications Act* de 1934, junto con todas sus enmiendas incluyendo la *Telecommunications Act* de 1996 y la *Commercial Spectrum Enhancement Act* de

2004. Estas normas se encuentran incorporadas en el Título 47 del Código de los Estados Unidos (47USC)²⁸.

En junio de 2002 la FCC establece la *Spectrum Policy Task Force* con la tarea de identificar y evaluar cambios en las políticas de espectro que maximicen el beneficio público, teniendo en consideración la protección contra interferencias, el uso eficiente del espectro, asegurar las comunicaciones de seguridad pública y las implicaciones de las políticas internacionales sobre el espectro²⁹.

El *Spectrum Policy Task Force* publicó el *Report of the Spectrum Efficiency Working Group*³⁰, documento en el cual propone tres definiciones y formas de medir la eficiencia:

Eficiencia Espectral que se define como la máxima cantidad de información transmitida (salida) dentro de una cantidad de espectro dada (entrada) o la mínima cantidad de espectro requerida para transmitir una cantidad de información dada. Puede ser expresada como:

$$\text{Eficiencia Espectral} = \frac{\text{Salida}}{\text{Espectro impactado}}$$

Eficiencia Técnica que evalúa cómo las entradas (espectro, equipos, otro capital, trabajo) se desarrollan en procura de obtener la mejor salida con los menores costos asociados en recursos, considerando no solo el espectro sino los equipos, el capital y el trabajo. Puede ser expresada como:

$$\text{Eficiencia Técnica} = \frac{\text{Salida}}{\text{Costo de todas las entradas}}$$

Eficiencia Económica que estima cómo todas las entradas se desarrollan para generar el mayor valor para el consumidor. Valor se refiere a el valor de la información transmitida. Puede ser expresada como:

²⁸ COLOMBIA. Agencia Nacional del Espectro. *Modelos y medidas orientadas a la flexibilización de la gestión de espectro radioeléctrico*. Contrato No. 087/2012 con UT Bluenote – Tovarfajardo, Bogotá D.C. 2012.

²⁹ *Ibíd.*

³⁰ ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA. Federal Communications Commission. *Report of the Spectrum Efficiency Working Group*. Spectrum Policy Task Force. 15 de noviembre de 2012. Disponible en: https://transition.fcc.gov/sptf/files/SEWGFinalReport_1.pdf. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

$$\text{Eficiencia Económica} = \frac{\text{Valor de la Salida}}{\text{Costo de todas las entradas}}$$

Al ser definiciones independientes, resulta que la maximización de un tipo de eficiencia no implica necesariamente la maximización de las otras, de hecho, el trabajo realizado para mejorar una de ellas puede ir en detrimento de las otras.

Adicionalmente, se concluye tal como lo hace la UIT, que cada tipo de servicios debe tener su propia métrica de eficiencia y que no es posible comparar eficiencias entre diferentes servicios.

En el 2011, el *Technological Advisory Council*, que es un grupo asesor de la FCC organizado bajo la autoridad del *Federal Advisory Committee Act* y conformado por un grupo de expertos que ayudan a la FCC a identificar áreas importantes de innovación y desarrollar políticas de tecnología informada que respalden la competitividad de Estados Unidos y la creación de empleos en la economía global, publicó un estudio en métricas de eficiencia del espectro, en cual se reconoce que aunque no es posible establecer una métrica única para medir la eficiencia en el uso del espectro, se han desarrollado métricas que permiten comparar la eficiencia entre sistemas similares (por ejemplo, bits por segundo por Hertz por kilómetro cuadrado para servicios móviles). Advierten que además de estas métricas es necesario analizar con detenimiento algunos otros elementos como lo son el costo y calidad de los servicios, entre otros.

Es importante resaltar que aunque en el documento se definen unidades de métrica de eficiencia en el uso del espectro para los servicios móviles, las mediciones aún no se han implementado.

Por otra parte, en el año 2004 se creó el “*Commerce Spectrum Management Advisory Committee*”, un comité de expertos para asesorar a la NTIA en políticas de espectro. En 2008 este Comité elaboró un documento sobre eficiencia en el uso del espectro.³¹

³¹ ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA. Commerce Spectrum Management Advisory Committee. *Definitions of Efficiency in Spectrum Use*. Working Group 1. 1 de octubre de 2008. Disponible en:

Este documento trata sobre los diferentes mecanismos que pueden ser aplicados para efectuar mediciones de eficiencia relacionados con el uso del espectro. En él se plantea la necesidad de tener claro el propósito de la medición y los tipos de uso del espectro que se pretende evaluar, pues las comparaciones de eficiencia proporcionan información útil si se trata de usos del espectro con características comunes; sin embargo, menciona que estimados gruesos de eficiencia espectral podrían ser útiles en ciertas oportunidades ya que permite la comparación entre tecnologías.

Según la síntesis realizada para la ANE en 2012³², los usos del espectro y las formas de medición de eficiencia propuestas en el documento son las siguientes:

- **Sistemas de difusión:** Estos sistemas se caracterizan por poner a disposición muchos conjuntos de datos que son seleccionables individualmente por muchos receptores. Eficiencia = Cantidad de conjuntos de información/Ancho de banda [MHz].
- **Sistemas de comunicación personal:** La eficiencia está dada por la tasa de transmisión [Mbps] o cantidad de canales [canales] sobre el ancho de banda utilizado [Mbps].
- **Sistemas direccionales punto a punto:** La eficiencia es una función de la tasa de transmisión sobre un ancho de banda dado y de la capacidad para operar varios enlaces cercanos e independientes en la misma frecuencia.
- **Transmisores/receptores que no son de comunicaciones:** En este grupo están los sistemas de radares. En este caso la comparación de eficiencia solo se puede hacer entre radares de capacidades similares y no aplica ningún tipo de análisis relacionado con cantidad de información transmitida.
- **Sistemas satelitales:** Por su gran cubrimiento se puede considerar que son sistemas altamente eficientes. La evolución tecnológica de las estaciones terrenas y espaciales y de los sistemas de lanzamiento han hecho que los sistemas actuales tengan una eficiencia más de 50 veces superior a los sistemas de dos décadas atrás.

<https://www.ntia.doc.gov/report/2008/definitions-efficiency-spectrum-use>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

³² COLOMBIA. Agencia Nacional del Espectro. *Modelos de medición y sistemas de incentivos orientados a promover el uso eficiente del espectro*. Informe I. Análisis normativa y casos internacionales, contrato de consultoría con Gómez Consultores, Bogotá D.C. Noviembre de 2012.

- **Receptores pasivos:** Sistemas de radioastronomía y vigilancia del espacio, monitoreo remoto y sistemas meteorológicos son parte de este grupo. La eficiencia puede estar dada por la reserva de espectro solo para las áreas donde se ubican los sensores o por la correcta ubicación de dichos sensores. Por ejemplo, por la distancia a la que pueden ubicarse otros sistemas que pueden interferir a estos receptores.
- **Aplicaciones de corto alcance:** Incluye sistemas Bluetooth, WiFi y sistemas anti-colisión de corto alcance, entre otros. Se destaca la evolución y alta eficiencia que estos sistemas han logrado en menos de 10 años. Su eficiencia puede ser evaluada por su capacidad de bits/segundo/Hertz en un área determinada.

En el documento se destaca que el objetivo de la política de espectro debe ser maximizar la utilidad y el beneficio del espectro lo cual es un propósito mayor en comparación con el logro de la eficiencia técnica. En la práctica se pueden dar alternativas o combinaciones que generan una mayor eficiencia o beneficio. En ese orden de ideas se plantea que la eficiencia en el uso del espectro para comunicaciones es el resultado de todos los mensajes enviados a través de las comunicaciones de todos los usuarios en un período de tiempo dado, dividido por la cantidad de espectro utilizado, medición que resulta imposible de efectuar. Adicionalmente, los sistemas militares o de seguridad pública pueden tener requerimientos particulares que afectan la eficiencia de uso del espectro pero que son primordiales para garantizar su disponibilidad y el éxito de las actividades que soportan.

Para la formulación matemática del cálculo de eficiencia para los diferentes sistemas de comunicaciones, el estudio hace referencia a los mecanismos propuestos en la recomendación UIT-R SM.1046. Para otro tipo de sistemas se recomienda investigación adicional.

También en el año 2008 siguiendo una directiva presidencial el Departamento de Comercio presentó un plan para identificar incentivos que promuevan el uso

eficiente del espectro, por parte tanto de usuarios de gobierno como de usuarios privados.³³

Las alternativas para promover el uso eficiente del espectro que fueron incluidas este plan fueron las siguientes³⁴:

- Determinar si el establecimiento de tarifas fomenta mayor eficiencia en el uso del espectro del gobierno. Establecer metodologías para calcular las tarifas y determinar el monto de dichas tarifas considerando el efecto potencial en la efectividad de la misión de las agencias y en las operaciones internacionales.
- Examinar otros incentivos que le permitan a las agencias beneficiarse de la reducción o eliminación del uso del espectro.
- Identificar opciones para dar mayor flexibilidad a las agencias en la administración de sus frecuencias, tales como, uso compartido y comercio entre usuarios federales
- Identificar otros incentivos para utilizar sistemas más eficientes.
- Considerar modelos posibles para estimar el valor económico de porciones de espectro dadas.
- Examinar incentivos para las agencias que deseen incrementar el uso de servicios o tecnologías comerciales y así posibiliten la disminución del espectro atribuido al gobierno federal.
- Desarrollar y soportar la legislación necesaria para implementar los incentivos.

Como conclusión de todos estos estudios, la FCC promueve como estrategias para búsqueda de un uso más eficiente del espectro las siguientes:

- La flexibilidad en el uso del espectro;
- El desarrollo y despliegue de tecnologías avanzadas;

³³ ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA. U.S. Department of Commerce. *Plan to Identify and Implement Incentives that Promote More Efficient and Effective Use of Spectrum*. 2008. Disponible en: https://www.ntia.doc.gov/legacy/osmhome/reports/Incentives_Plan.pdf. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

³⁴ COLOMBIA. Agencia Nacional del Espectro. *Modelos de medición y sistemas de incentivos orientados a promover el uso eficiente del espectro*. Informe I. Análisis normativa y casos internacionales, contrato de consultoría con Gómez Consultores, Bogotá D.C. Noviembre de 2012.

- Mercados secundarios de espectro.

3.2 MÉXICO

En México el Instituto Federal de Telecomunicaciones – IFT es la entidad encargada del desarrollo eficiente de la radiodifusión y las telecomunicaciones, teniendo a su cargo la regulación, promoción y supervisión del uso, aprovechamiento y explotación del espectro radioeléctrico, las redes y la prestación de los servicios de radiodifusión y telecomunicaciones, así como del acceso a infraestructura activa, pasiva y otros insumos esenciales.

En el año 2013 el IFT publicó un documento titulado “*El Espectro Radioeléctrico en México. Estudios y Acciones – Más y Mejor Espectro para Banda Ancha*”³⁵, en el cual se menciona que el proyecto “*obedece a la necesidad de encontrar alternativas viables que coadyuven a definir una estrategia a mediano plazo respecto de la labor del sector en materia de planeación y administración del espectro radioeléctrico y tiene entre sus objetivos el servir como guía para definir la política regulatoria a la que deberán sujetarse las acciones orientadas a la planificación del espectro radioeléctrico en nuestro país, incluyendo la atribución, clasificación, métodos de asignación, radio-monitoreo y mecanismos de recuperación de espectro; así como lineamientos específicos para evaluar el uso eficiente de este recurso.*” NFT

Los objetivos planteados en el documento se listan a continuación:

1. *Presentar una visión integral del entorno asociado a la planeación del espectro radioeléctrico.*
2. *Desarrollar un diagnóstico sobre los procedimientos y mecanismos asociados a la planeación, administración y vigilancia del espectro radioeléctrico.*
3. *Desarrollar un diagnóstico general sobre el uso de los rangos de espectro de mayor relevancia, con especial énfasis en bandas identificadas como IMT.*

³⁵ MÉXICO. Instituto Federal de Telecomunicaciones. *El espectro radioeléctrico en México. Estudio y acciones - Más y Mejor Espectro para Banda Ancha*. Unidad de Espectro Radioeléctrico. Ciudad de México. 2013. Disponible en: <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/espectro-radioelectrico/el-espectro-radioel-ctrico-en-mexico.estudio-y-acciones-final-consulta.pdf>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

4. *Establecer un plan de acciones enfocado a mejorar y actualizar los procedimientos y mecanismos asociados a la planeación, administración y vigilancia del espectro radioeléctrico, incluyendo todas las modalidades de uso del espectro.*
5. *Establecer un plan de acciones a corto y mediano plazo orientado a optimizar el uso de diversos segmentos de frecuencias, con especial énfasis en bandas identificadas como IMT.³⁶*

En el documento se desarrolla el marco teórico, en el cual se revisan recomendaciones internacionales que reconocen la importancia de realizar un uso eficiente del espectro, luego se realiza un diagnóstico general del uso de bandas de frecuencia en México que abarca las bandas más relevantes entre los 30 MHz y los 300 GHz. Finalmente se plantean planes de acción, uno de los cuales se titula “Diseño e implementación de una metodología de estimación de eficiencia espectral” en la cual se propone lo siguiente:

Para lograr el uso eficiente del espectro se requiere de la puesta en marcha de acciones concretas orientadas a lograr la maximización de la utilización de los recursos del espectro, mediante la aplicación de medidas en diferentes áreas del ecosistema que integra a las redes de telecomunicaciones y los servicios que a través de estas se prestan.

Deben analizarse aspectos sociales, técnicos, administrativos, financieros, de planeación y estrategia de negocios que deben ser cuidadosamente analizados a fin de que los operadores de las redes tengan la posibilidad de ofrecer servicios con un alto grado de confiabilidad, con capacidad suficiente para atender la creciente demanda en el corto y largo plazo, y que tengan la flexibilidad necesaria para evolucionar tecnológicamente.³⁷

Tabla 1. Metodología propuesta por México

Situación actual
<ul style="list-style-type: none"> • <i>La eficiencia en el uso del espectro no es un concepto que cuente con una métrica establecida.</i> • <i>Existen asignaciones en bandas del espectro cuya intensidad de uso es baja.</i> • <i>En algunos casos, las asignaciones de espectro han derivado en un elemento especulativo que busca encarecer dicho recurso.</i>

³⁶ *Ibíd.* p.13

³⁷ *Ibíd.* p.191

<ul style="list-style-type: none"> Hoy día no existen obligaciones para los regulados relacionadas con el uso eficiente del espectro que les es asignado o concesionado.
<p>Problemática</p>
<ul style="list-style-type: none"> No se cuenta con una metodología ni con criterios mínimos para efectuar mediciones sobre el grado de eficiencia en el uso de bandas del espectro. No existen lineamientos, criterios o procedimientos para medir el grado de eficiencia en el uso del espectro. No se ha encontrado experiencia internacional relevante relacionada con aplicación de métodos para determinar la eficiencia espectral de bandas en uso. Al no contar con una metodología, se desconocen las afectaciones económicas y sociales causadas por el uso ineficiente del espectro. Hoy en día las autoridades del sector no cuentan con instrumentos normativos para establecer obligaciones a los regulados relacionadas con el uso eficiente de los recursos del espectro.
<p>Acciones propuestas</p>
<ol style="list-style-type: none"> REALIZAR ESTUDIO QUE COMPILE LA EXPERIENCIA INTERNACIONAL SOBRE DETERMINACIÓN DE MÉTODOS PARA EVALUAR LA EFICIENCIA EN EL USO DEL ESPECTRO. REALIZAR ESTUDIOS ENCAMINADOS AL DESARROLLO DE METODOLOGÍAS Y OBTENCIÓN DE MÉTRICAS SOBRE EL USO EFICIENTE DEL ESPECTRO. CON BASE EN LOS ESTUDIOS REALIZADOS DEFINIR UNA METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL APLICABLE A MÉXICO, CONSIDERANDO LAS CARACTERÍSTICAS PARTICULARES DEL SECTOR NACIONAL DE LAS TELECOMUNICACIONES. DEFINIR FORMALMENTE LA METODOLOGÍA QUE SE ADOPTARA PARA SU APLICACIÓN EN LOS PROCESOS DE LA MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA DEL ESPECTRO. EJECUCIÓN CONTINUA DE LOS MECANISMOS Y PROCEDIMIENTOS MEDIANTE LOS CUALES SE EFECTUARÁ LA MEDICIÓN DEL GRADO DE EFICIENCIA EN EL USO DEL ESPECTRO. ADECUAR LOS EQUIPAMIENTOS Y APLICACIONES UTILIZADOS POR LA RENAR PARA LA EJECUCIÓN TÉCNICA DE LAS MEDICIONES RELACIONADAS CON LA METODOLOGÍA DE EFICIENCIA ESPECTRAL 7. EMISIÓN DE LAS DISPOSICIONES DE CARÁCTER GENERAL QUE DEFINAN LAS CONDICIONES, LINEAMIENTOS Y APLICABILIDAD BAJO LAS CUALES SE REALIZARÁN LAS MEDICIONES, REPORTES Y MEDIDAS CORRECTIVAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA EN EL USO DEL ESPECTRO.
<p>8. Fundamentos jurídicos</p>
<p>CFT realiza estudios e investigaciones (LFT Art. 9-A fracción II).</p> <p>CFT emite disposiciones administrativas (LFT Art. 9-A fracción I).</p> <p>CFT administra el espectro y promueve su uso eficiente (LFT Art. 9-A fracción VIII) CFT ejerce facultad de supervisión y verificación (LFT Art. 9-A fracción XIII).</p> <p>SCT establece mecanismos para asegurar el uso eficiente del espectro (LFT Art. 70).</p>
<p>Implicaciones técnicas</p>
<ul style="list-style-type: none"> Existe una amplia cantidad y complejidad de variables que deben tomarse en cuenta para el desarrollo de la metodología.

<ul style="list-style-type: none"> • Se desconoce si existe alguna herramienta informática especializada para correr simulaciones de los modelos propuestos para su evaluación. • Verificar la compatibilidad de la infraestructura y equipamiento de la RENAR para el apoyo técnico de la metodología.
Implicaciones legales
<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere de reformas al marco normativo para otorgar atribuciones al órgano regulador en materia de medición de la eficiencia del espectro, y en su caso, la aplicación de acciones correctivas. • Es probable que sea necesario enfrentar recursos jurídicos interpuestos contra la aplicación de la metodología y disposiciones emitidas.
Técnicas por resolver
<ul style="list-style-type: none"> • Definir el grupo de expertos que serán convocados para participar en los estudios propuestos. (Académicos, consultores, fabricantes, operadores, etc.) • Determinar en qué bandas del espectro y en cuales servicios será posible implementar la metodología. • Definir estrategia de consulta y negociación con los regulados para permitir la implantación de la metodología. • Determinar el grado de compatibilidad técnica de la RENAR con la metodología que se defina. • Evaluar el impacto en los recursos humanos y materiales de la Comisión para la implantación de la metodología.

Fuente: MÉXICO. Instituto Federal de Telecomunicaciones. *El espectro radioeléctrico en México. Estudio y acciones - Más y Mejor Espectro para Banda Ancha*. Unidad de Espectro Radioeléctrico. Ciudad de México. 2013. Disponible en: <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/espectro-radioelectrico/el-espectro-radioelctrico-en-mexico.estudio-y-acciones-final-consulta.pdf>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

En el año 2015, el IFT publicó el documento “*Estudio de Métricas de Eficiencia Espectral*”³⁸, para la definición de los elementos que formarán parte de las métricas de eficiencia espectral, así como las metodologías de medición que permitan cuantificarlas. El documento es resultado de una consultoría realizada por *Analysys Mason Limited*, para la cual se mencionan como objetivos principales:

- identificar métricas de eficiencia espectral para asegurar que el espectro radioeléctrico sea utilizado de manera racional y eficiente, y

³⁸ MÉXICO. Instituto Federal de Telecomunicaciones. *Estudio de métricas de eficiencia espectral*. Informe de consultoría con *Analysys Mason Limited*. Ciudad de México. 3 de noviembre de 2015. Disponible en: <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/espectro-radioelectrico/el-espectro-radioelctrico-en-mexico.estudio-y-acciones-final-consulta.pdf>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

- formular recomendaciones sobre cómo la medición de dichas métricas puede contribuir a conseguir un mejor aprovechamiento del espectro en México y promover una asignación óptima del mismo.

Este documento se encuentra compuesto por dos secciones tituladas: “*Revisión del uso del espectro en México*” y “*Evaluación de los factores que impactan en el uso eficiente del espectro*”.

El documento reconoce que “*el definir y medir el concepto de “eficiencia” es una tarea especialmente compleja. Por tal motivo, si bien muchos reguladores se esfuerzan en conseguir una mayor eficiencia en el uso del espectro, pocos la reportan o la utilizan como una consideración primordial en su toma de decisiones.*”

En la primera parte del documento titulada “*Revisión del uso del espectro en México*” se describe a grandes rasgos el uso actual de las tendencias internacionales en cuanto a uso de tecnologías de radiocomunicaciones para la provisión de servicios satelitales y terrestres, comparándolas con la situación en México, luego se realiza un análisis de los mecanismos de asignación de bandas de frecuencia que se utilizan en México (Concesiones, etc.) y finalmente se presentan los principales cambios previstos en las atribuciones de espectro en México.

La segunda parte del documento titulada “*Evaluación de los factores que impactan en el uso eficiente del espectro*” se menciona la importancia de usar las métricas de eficiencia espectro como guía para la toma de decisiones y no como único elemento a considerar:

“Las métricas de eficiencia espectral pueden ayudar a los reguladores en la toma de decisiones sobre estos asuntos. No obstante, dichas métricas sólo pueden ser utilizadas a modo de guía al existir muchos otros factores relevantes que han de tenerse en cuenta; utilizar como métrica exclusivamente el grado de eficiencia técnica con el cual se está utilizando el recurso espectral puede acarrear la toma de decisiones inadecuadas.

El enfoque idóneo consiste en utilizar métricas de eficiencia espectral para determinar cuál sería el uso más eficiente que se podría dar al espectro en un escenario óptimo, para luego evaluar si existen factores que puedan generar problemas en su uso. Con base en ese análisis, se puede entonces tomar una decisión sobre si los factores identificados son lo suficientemente importantes como para decidir no asignar el espectro para aquel uso considerado como óptimo. Otros factores que también podrían ser relevantes son: eficiencia económica (por ejemplo, medida en términos de contribución a la economía nacional), demanda de espectro, armonización regional o internacional, consecución de los objetivos de política nacional, gestión de interferencias, aplicabilidad del espectro para usos particulares y factores

tecnológicos (incluyendo consideraciones sobre las antenas, como la energía, tamaño y ubicación).”

El documento inicia revisando la definición de eficiencia espectral, a la cual se agrega el componente espacial en los siguientes términos:

“La unidad de medida del espectro radioeléctrico es el Hertz, o más comúnmente el MegaHertz (MHz). Así, la eficiencia espectral podría medirse sencillamente como el número de bit/s transferidos por MHz o bit/s/MHz.

En la mayoría de los casos es recomendable añadir a la definición una dimensión del área de cobertura. Esto es porque no todas las concesiones cubren la misma área geográfica – por ejemplo, algunas pueden ser de cobertura regional y otras de cobertura nacional. Además, algunos servicios pueden ser ofrecidos sólo en ciertas zonas, como áreas urbanas, lo cual ha de tenerse en cuenta. En este caso, la unidad de medida podría traducirse en bit/s/MHz/km², y puede aplicarse a la totalidad del país o a zonas geográficas más pequeñas. Se trata de una unidad de medida genérica que podría, en principio, ser aplicada a cualquier tipo de sistema. Asimismo, permite comparaciones más sencillas con otros países que publiquen métricas similares ya que, como los países presentan tamaños muy diferenciados, si no se incluyera el término km² se necesitaría realizar un trabajo adicional para poder comparar dichos países con diferentes tamaños.”

El documento recomienda la excepción para sistemas de radiodifusión, tanto satelitales como terrestres, sugiriendo que estos sean medidos sin la unidad de km², debido a que en estos casos se transmite el mismo volumen de información a lo largo de la región radiodifundida sin importar el área de cobertura y además tener una métrica en bits/s/Hz para radiodifusión deja claro que no se puede realizar una comparación con otros tipos de servicio, que serían medidos en bits/s/Hz/km².

Posteriormente, el documento presenta un análisis de las características y funcionamiento de diversos servicios de telecomunicaciones, definiendo las unidades de medida en que deberían estar expresadas las métricas de eficiencia espectral para cada uno. Lo anterior es resumido en el siguiente cuadro.

Tabla 2. Análisis de las características y funcionamiento de diversos servicios de telecomunicaciones

Categoría de uso	de	Bandas de frecuencia objeto de estudio	Métrica de eficiencia propuesta	Factores técnicos que afectan a este servicio	Factores económicos y/o de demanda que afectan a este servicio
Radiodifusión por satélite		11.7–12.75GHz 17.3–17.8GHz	Bits/s/Hertz – para cada sistema individual	<p>La cobertura regional y/o global que proporcionan los sistemas satelitales implica que es esencial conseguir una armonización del espectro a nivel internacional, ya que los sistemas están diseñados para poder dar cobertura a múltiples países y regiones utilizando la misma banda de frecuencia</p> <p>El elevado costo del lanzamiento de un satélite y los largos plazos que transcurren entre su diseño y su lanzamiento implica que una vez que los sistemas han sido diseñados y desplegados no es posible actualizarlos fácilmente</p>	<p>La amplia cobertura geográfica de los sistemas satelitales y su dispersa base de suscriptores no implica necesariamente que este tipo de sistemas sean una opción menos favorable que otros sistemas que tienen un mayor número de suscriptores por área (por ejemplo, los sistemas móviles)</p> <p>La amplia cobertura geográfica de los sistemas satelitales no puede ser replicada por los sistemas terrestres ya que estos sistemas no pueden cubrir de forma comercialmente viable las áreas escasamente pobladas que cubren los sistemas satelitales</p>
Sistemas satelitales fijos		<p>Banda C: 3.7–4.2GHz 5850–7075MHz</p> <p>Banda Ku: 11.7–12.2GHz 14–14.5GHz</p> <p>Banda Ka: 17.7–21.2/ 27.5–31GHz</p>	Bits/s/Hertz/km ² – para cada sistema individual, medido para el área de cobertura del sistema dentro del país de interés ¹¹	<p>La cobertura regional y/o global que proporcionan los sistemas satelitales implica que es esencial conseguir una armonización del espectro a nivel internacional, ya que los sistemas están diseñados para poder dar cobertura a múltiples países y regiones utilizando la misma banda de frecuencia</p> <p>El elevado costo del lanzamiento de un satélite y los largos plazos que transcurren entre su diseño y su lanzamiento implica que una vez los sistemas han sido diseñados y desplegados no es posible actualizarlos fácilmente</p>	Además de los factores arriba mencionados, cabe notar que algunos sistemas satelitales fijos son utilizados para proporcionar servicios de radiodifusión satelital. Por ello, es preciso analizar la demanda de los diferentes tipos de sistemas ya que son múltiples los servicios que pueden ser provistos a través de sistemas satelitales
Redes móviles de acceso público (voz y datos)		<p>Banda 700: 703–748/ 758–803MHz</p> <p>Banda 850: 824–849/ 869–894MHz</p> <p>Banda AWS: 1710–1780/ 2155–2180MHz</p> <p>Banda PCS: 1850–1910/ 1930–1990MHz</p> <p>Banda 2500: FDD 2500–2570/ 2620–2690MHz TDD 2570–2620MHz</p>	Bits/s/Hertz/km ² – para cada sistema medido a nivel nacional	<p>La generación de tecnología utilizada impactará en la eficiencia técnica del sistema – las tecnologías más modernas son más eficientes pero el costo de actualización de las redes es significativo</p> <p>La armonización del espectro a nivel internacional es crítica para que los terminales móviles puedan ser diseñados de una manera efectiva en términos de costos y para que los usuarios puedan utilizar sus terminales móviles en distintas regiones</p>	Mientras la migración de 2G a 3G y de 3G a 4G mejora la eficiencia técnica del espectro, la modernización de las redes requiere de cuantiosas inversiones, y es posible que también haya que actualizar los equipos utilizados en las radio bases (por ejemplo, nuevas antenas para abarcar un mayor rango de frecuencias en 4G)
Enlaces fijos		3.4–3.7GHz 5725–5850MHz 7110–7725MHz 10.15–10.65GHz 14.5–15.35GHz 21.2–23.6GHz 37–38.6GHz 71–76GHz y	Bits/s/Hertz/km ² – para el total de enlaces medidos en el área de servicio	<p>La compartición del espectro es a menudo posible entre enlaces fijos y otros servicios</p> <p>Los enlaces de corto alcance normalmente se pueden implementar de manera más eficiente en las bandas de frecuencia más altas (lo que significa que las posibilidades de reutilización de las frecuencias son mayores v. por tanto, hay una mejora en la</p>	El exceso de demanda de espectro para enlaces fijos suele darse en algunas bandas de frecuencia más que en otras. Deberían diseñarse implementaciones prácticas, como por ejemplo para que los enlaces se desplieguen en las bandas más acordes a la longitud requerida para su operación. Los enlaces más cortos pueden acomodarse en bandas de frecuencia más altas donde hay

	81-86GHz		eficiencia en el uso de la banda	más ancho de banda disponible, para así dejar las bandas de frecuencia más bajas para enlaces más largos a fin de proporcionar la propagación necesaria
Redes móviles privadas	136-174MHz 380-399.9MHz 410-430MHz 440-450MHz 806-814 / 851-858MHz	Bits/s/Hertz/km ² – para todos los sistemas en una banda medido de forma local o regional	La compartición del espectro también es posible con las redes móviles privadas	–
Radiodifusión de televisión terrestre	VHF: 54-72MHz 76-88MHz 174-216MHz UHF: 470-608MHz	Bits/s/Hertz – para cada sistema individual	Cabe señalar que en ocasiones es necesario asumir ciertos compromisos en el diseño de sistemas de radiodifusión para cumplir los objetivos marcados (por ejemplo, uso de redes multi-frecuencia en lugar de redes de frecuencia única para evitar problemas de interferencia y reducir el costo de despliegue a través de las áreas de servicio más amplias)	La compartición del espectro a través de la implementación de white spaces puede ser posible, lo cual mejoraría la eficiencia del espectro acomodando múltiples usos en el mismo ancho de banda. La eficiencia sería entonces la suma de la eficiencia para la radiodifusión de televisión terrestre + la eficiencia de los usos compartidos (white spaces)
Radiodifusión terrestre sonora (AM/FM y digital)	Radio AM: 535-1705kHz Radio FM y radio digital: 88-108MHz	Bits/s/Hertz – para cada sistema individual	No existen factores técnicos que afecten al sistema	La compartición en el uso de las mismas técnicas que en la televisión para white spaces puede ser posible, lo cual mejoraría la eficiencia económica del espectro acomodando múltiples usos en el mismo ancho de banda. La eficiencia técnica sería entonces la suma de la eficiencia para la radiodifusión de radio + la eficiencia de los usos compartidos (white spaces)

Fuente: MÉXICO. Instituto Federal de Telecomunicaciones. *Estudio de métricas de eficiencia espectral*. Informe de consultoría con Analysys Mason Limited. Ciudad de México. 3 de noviembre de 2015. Disponible en: <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/espectro-radioelectrico/el-espectro-radioel-ctrico-en-mexico.estudio-y-acciones-final-consulta.pdf>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

Como conclusión, el documento no define el término de “eficiencia espectral”, sino que analiza las unidades de medida que debería tener la métrica usada en diferentes tipos de servicio y se orienta más hacia un enfoque de reorganización del espectro para la introducción de nuevos servicios de radiocomunicaciones y nuevas tecnologías (rebanding).

En diciembre de 2018 el IFT publicó un nuevo documento titulado “*Medición de la eficiencia espectral – Definiciones y consideraciones a observar para su aplicación en México*”³⁹, el cual es una consulta pública en la cual explora la posibilidad de definir una *Métrica Integral de Eficiencia Espectral (MIDEE)*, buscando que a futuro pueda ser obligatoria para todos los concesionarios, para lo cual este documento

³⁹ MÉXICO. Instituto Federal de Telecomunicaciones. *Medición de la eficiencia espectral – Definiciones y consideraciones a observar para su aplicación en México*. Dirección de ingeniería y tecnología. Unidad de espectro radioeléctrico. México D.F. Diciembre de 2018. Disponible en: <http://www.ift.org.mx/industria/consultas-publicas/consulta-publica-de-integracion-acerca-de-los-elementos-valorarse-en-el-desarrollo-de-las-metricas>. Fecha de consulta: 11 de marzo de 2019.

busca que la industria, la academia y la sociedad civil contribuyan en el análisis de los elementos a incluir en la MIDEE.

En este documento el IFT resalta un elemento importante que pocas veces se ha mencionado en otros estudios y es la relación entre la eficiencia espectral y la calidad en la prestación del servicio. A partir de esto, propone la siguiente definición de eficiencia espectral:

“Eficiencia Espectral: es la capacidad de los sistemas de telecomunicaciones o radiodifusión de transmitir la mayor cantidad de información utilizando una cantidad de espectro radioeléctrico determinada, manteniendo la calidad de las comunicaciones al menos en un nivel mínimo determinado.*

**Dicha capacidad es dependiente de las características tecnológicas, regulatorias y del entorno socioeconómico relacionadas con el servicio de telecomunicaciones o radiodifusión de que se trate.”*

Así mismo, propone los siguientes principios que debe atender una métrica de eficiencia espectral:

*“**Objetiva:** aquellos factores que contemple la fórmula deben estar basados en los hechos y en la lógica, y no así en argumentos subjetivos y/o arbitrarios;*

***Precisa:** para lograr la cuantificación de la eficiencia espectral debe existir una fórmula para tal propósito, la cual sea obtenida a través de una metodología clara, cuya aplicación no dé lugar a confusión, discrecionalidad o ambigüedad tanto para el Instituto como para los regulados;*

***Verificable:** debe existir un mecanismo por parte del Instituto que permita al concesionario verificar que el cálculo de la fórmula se haya realizado de forma transparente y, sobre todo, que la información proporcionada por el concesionario para el cálculo de la métrica pueda ser corroborada o verificada por el Instituto.*

***Temporal:** debido al dinamismo de la tecnología, la sociedad y los mercados, así como a la constante evolución de los servicios de radiocomunicaciones, una métrica nunca será perpetua, por lo que ésta debe revisarse periódicamente y, en su caso, modificarse para evitar que se vuelva obsoleta.”*

En ese sentido, propone para la MIDEE la siguiente definición:

“Métrica Integral de Eficiencia Espectral (MIDEE): conjunto de submétricas, compuestas de consideraciones cualitativas y/o cuantitativas, utilizadas para medir, comparar y dar seguimiento a la eficiencia espectral.”

Se contempla que la MIDEE, sea un indicador compuesto por al menos tres submétricas, las cuales son: la Métrica de Eficiencia Espectral Técnico-Regulatoria (MEET-R), la Métrica de Eficiencia Económica (MEEc) y la Métrica de Calidad (MC). Para cada una de estas se da una descripción general de lo que debería medir, sin embargo, no se propone una fórmula de cálculo.

Finalmente, el documento presenta algunas consideraciones que motivarán las preguntas formuladas como consulta pública, tales como que a la fecha existen concesionarios con condiciones de despliegue de red pactadas desde el momento de otorgamiento del permiso, y la aplicabilidad de la MIDEE para Operadores Móviles Virtuales – OMV.

En todo caso el mismo documento reconoce que *“el cálculo de la EE es logrado a partir de la aplicación de una fórmula y su metodología relacionada, **cuyos parámetros no están hasta ahora definidos.**”* (NFT) (EE es la sigla usada en el documento para referirse a Eficiencia Espectral).

3.3 BRASIL

La administración de Brasil es de las pocas que cuenta con una regulación expedida conteniendo métricas relacionadas con eficiencia espectral. Lo anterior mediante la Resolución 548 del 8 de noviembre de 2010⁴⁰ de la Agencia Nacional de Telecomunicaciones - Anatel, a través de la cual se indican los mecanismos para evaluar la eficiencia del uso del espectro radioeléctrico en bandas utilizadas por sistemas punto a punto, sistemas punto a área y sistemas satelitales.

Ahora bien, el artículo 3 de la mencionada resolución de Anatel menciona los siguientes escenarios donde puede aplicar la evaluación de la eficiencia en el uso del espectro:

- I. En evaluación de proyectos técnicos;

⁴⁰ BRASIL. Agencia Nacional de Telecomunicaciones. *Resolución 548. Regulación para la Evaluación de la Eficiencia del Uso del Espectro de Radiofrecuencias*. 8 de noviembre de 2010. Publicado en DOU 11 de noviembre de 2010, rectificado en el DOU 04 de febrero de 2011. Disponible en: <http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2010/47-resolucao-548>. Fecha de consulta: 11 de marzo de 2019.

- II. En el proceso de prórroga de las autorizaciones de uso de radiofrecuencias;
- III. En la definición del precio al público por el derecho al uso de radiofrecuencia;
- IV. Como un criterio técnico objetivo para la evaluación determinado sistema o aplicación particular;
- V. Como un criterio adicional en los procedimientos de autorización de uso de radiofrecuencias, en función de la solución técnica propuesta;
- VI. Antes de la aprobación del proceso de fusión o consolidación.

Y por otra parte, el artículo 5 de la misma resolución establece los principios generales que deben considerarse en la evaluación de la eficiencia del uso del espectro radioeléctrico:

- I. El espectro radioeléctrico es un recurso limitado, constituyéndose en bien público, administrado por Anatel;
- II. El uso del espectro radioeléctrico para los servicios de radiocomunicaciones se debe hacer de manera eficiente y adecuada;
- III. Anatel puede restringir el uso de ciertas frecuencias o bandas de frecuencias, teniendo en cuenta el interés público y el uso eficiente y apropiado del espectro;
- IV. El uso de radiofrecuencia está sujeta a su compatibilidad con la actividad o servicio a ser proporcionado, en particular con respecto a la potencia, la banda de transmisión y la técnica empleada.

La resolución de Anatel también presenta el concepto de ineficiencia como el incumplimiento, en un tiempo determinado de los indicadores de eficiencia establecidos en la ella. Para cumplir con lo anterior se indica la periodicidad de la evaluación del uso eficiente del espectro y posteriormente se establecen las sanciones por uso ineficiente del espectro.

La resolución se basa en las recomendaciones de la UIT- R para definir una medida de uso eficiente desde el punto de vista de la eficiencia espectral, y mide su uso eficiente a través de la EUE. Asimismo, define la Eficiencia Relativa de Uso del Espectro (ERUE) como la relación entre la eficiencia de uso del espectro del sistema o aplicación considerada y la eficiencia de uso del espectro de un sistema utilizado como referencia.

Al sistema de referencia, lo denomina como Índice Mínimo de EUE (IME), el cual es el índice mínimo de EUE que es establecido en un Acto específico de ANATEL o en el reglamento específico de condiciones de uso de la banda de frecuencias y debe ser cumplido por el sistema o aplicación, en función del tipo de sistema, la banda de frecuencias y el espacio geométrico asignado (unidad federativa, áreas de numeración, conjunto de municipios o el área de autorización).

Para los servicios públicos móviles, el EUE está dado por:

$$EUE = \frac{M}{B * S}$$

Donde:

- EUE es el uso de la eficiencia del espectro [Erlang/km MHz] o [Tb/km MHz]
- M es la cantidad de información transmitida [Tb] o tráfico telefónico [Erlang], en el mes bajo análisis
- B es el ancho de banda de radiofrecuencia asignado [MHz], y
- S es el espacio geométrico asignado [km²]

Para evaluar la eficiencia en el uso del espectro Anatel definió dos indicadores que se describen a continuación:

- Índice Mínimo de Eficiencia (IME): Índice mínimo de EUE definido por la Anatel que debe ser cumplido por un sistema o aplicación. Se pueden fijar diferentes IME por tipo de sistema, por banda de frecuencias o por espacios geométricos negados.
- Índice Temporal de EUE (ITE): índice que representa por medio de una regresión lineal, la evolución del EUE a lo largo del tiempo.

Ambos indicadores se determinan mediante la razón entre la cantidad de información transferida y la utilización del espectro empleado en la transferencia.

De todas formas, la ineficiencia en el uso del espectro se puede considerar justificada en los siguientes casos:

- Si la ineficiencia en el uso del espectro se relacionada con el cumplimiento de obligaciones de cobertura.
- Si suspender el uso del espectro (por parte de un operador) perjudica la competencia.
- Si la ineficiencia en el uso del espectro se relacionada con el cumplimiento de requerimientos de calidad del servicio.

Ahora bien, para definir los indicadores Anatel ajusta las fórmulas presentadas en la Resolución 548 de 2010 a partir de las fórmulas propuestas por la UIT en la Recomendación UIT-R SM.1046⁴¹, de la siguiente forma:

- Modifica la fórmula de uso eficiente del espectro (fórmula 2 de la Resolución 548 de 2010) agregando el término “ k ” que representa un factor de proporcionalidad específico para cada aplicación o sistema.
- Agrega el término “ $?$ ” a la fórmula de radio del sector circular del espacio negado (fórmulas 8 y 12 de la Resolución 548 de 2010) para reflejar el efecto de la atenuación por gases.
- Agrega el término “ M_t ” a la fórmula del nivel de interferencia a la entrada del receptor (fórmulas 9 y 13 de la Resolución 548 de 2010) para tener en consideración el margen típico del sistema.
- Establece una fórmula para la eficiencia en el uso del espectro de un conjunto de sistemas punto a punto en una determinada región (fórmula 15 de la Resolución 548 de 2010).
- Modifica la fórmula de uso eficiente del espectro (fórmulas 17 y 18 de la Resolución 548 de 2010) agregando el término “ S_{EF}/S_{ATO} ” y “ N_D/N_{TD} ” que representan un factor de proporcionalidad específico para sistemas punto área.
- Modifica la fórmula de uso eficiente del espectro (fórmula 21 de la Resolución 548 de 2010) agregando el término “ N_D/N_{TD} ” que representa un factor de proporcionalidad específico para sistemas punto área por satélite.

La resolución no ha sido aplicada, hasta la fecha, a los servicios móviles ya que ANATEL no ha establecido el valor del IME. Como el valor del EUE se compara con el IME para sancionar o revertir el espectro, el Reglamento no puede ser aplicado sin el establecimiento previo de este sistema de referencia que mide la eficiencia espectral.

⁴¹ UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Recomendación UIT-R SM.1046-3. Definición de la eficacia en la utilización del espectro por un sistema de radiocomunicaciones*. Oficina de Radiocomunicaciones. Aprobado septiembre de 2017. Disponible en: <http://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1046/en>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

En consecuencia, a pesar de que la resolución sigue las recomendaciones de la UIT- R en la estimación de la eficiencia espectral (Tb/ km² MHz), esta no ha sido aplicada para los servicios móviles debido a las dificultades computacionales que ha tenido ANATEL para su implementación.

3.4 PERÚ

A la fecha, la forma en que Perú busca asegurar el uso eficiente del espectro radioeléctrico es mediante la Metas de Uso, cuyo régimen fue establecido por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTC) en la Resolución Ministerial No. 87-2002-MTC/15.03⁴².

La asignación de espectro radioeléctrico no se circunscribe a un único servicio público de telecomunicaciones, de conformidad con el artículo 208 del Reglamento General, que dispone:

“Artículo 208.- Asignación de espectro radioeléctrico en bandas atribuidas para la prestación de más de un servicio público de telecomunicaciones.

La asignación de espectro radioeléctrico en bandas atribuidas para la prestación de más de un servicio público de telecomunicaciones otorga a su titular el derecho a prestar estos servicios, siendo requisito previo para ello que el titular de la asignación de espectro cuente con la concesión que lo habilite a prestar los servicios públicos de telecomunicaciones que correspondan a la atribución de la banda de frecuencias asignada.”

De esta manera, si un particular tiene asignada determinada porción del espectro radioeléctrico que inicialmente usaba para un determinado servicio público de telecomunicaciones, podrá usar dicho espectro, sin requerir una nueva asignación,

⁴² PERÚ. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. *Resolución Ministerial No. 87-2002-MTC/15.03. Norma de Metas de Uso de Espectro Radioeléctrico de Servicios Públicos de Telecomunicaciones*. Lima, 6 de febrero de 2002. Disponible en: <https://portal.mtc.gob.pe/comunicaciones/concesiones/normas/legales/documentos/normas/normas.pdf>. Fecha de consulta: 11 de marzo de 2019.

para otros servicios públicos de telecomunicaciones (bajo su concesión), siempre que la banda esté atribuida para este tipo de servicios en el PNAF

En diciembre de 2018, el MTC publicó para consulta pública un Proyecto de Resolución Ministerial⁴³ y su respectivo documento de soporte⁴⁴, que modifica la Norma de metas de uso, con su respectivo documento de soporte. En esta resolución se establecen las fórmulas de cálculo para las métricas de uso eficiente definidas en esta resolución, así como la obligación de reporte de información por parte de las compañías prestadoras de servicios.

En el documento de soporte el MTC menciona que *“es necesario contar con una política de gestión pública idónea y predecible que promueva el use eficiente de este recurso administrado por el Estado, procurando no generar distorsiones en el mercado del sector de telecomunicaciones. En tal sentido, se debe tomar en cuenta aspectos de tipo técnico, económico y social.”*

Sobre el aspecto técnico menciona que *“está relacionado con el objetivo global de asegurar que las bandas de frecuencia se utilicen permitiendo la máxima utilización del recurso, evitando, por ejemplo, interferencias y separaciones (bandas de guarda) innecesariamente amplias entre usuarios adyacentes en línea con la recomendación de la UIT”,* por lo cual recapitula la aproximación presentada por UIT usando el factor de utilización del espectro (U) como el producto de ancho de banda de frecuencia por el espacio geométrico (geográfico) y por el tiempo, y el efecto útil (EUE) y la eficiencia relativa en la utilización del espectro (ERE).

Sobre el aspecto económico afirma que *“están relacionados con la garantía de que el espectro radioeléctrico se utilice de tal modo que se satisfaga el objetivo nacional de conseguir una asignación eficiente de los recursos”* ya que *“el objetivo es maximizar el uso de los recursos para obtener el mayor valor para los usuarios*

⁴³ PERÚ. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. *Proyecto normativo para modificación de la Norma de Metas de Uso de Espectro Radioeléctrico de Servicios Públicos de Telecomunicaciones*. Lima, 21 de noviembre de 2018. Disponible en: http://portal.mtc.gob.pe/comunicaciones/regulacion_internacional/regulacion/proy%20normativos/RM_912-2018-MTC-01.03.pdf. Fecha de consulta: 11 de marzo de 2019.

⁴⁴ PERÚ. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. *Informe No. 519-2018-MTC/25 que sustenta el proyecto normativo para modificación de la Norma de Metas de Uso de Espectro Radioeléctrico de Servicios Públicos de Telecomunicaciones*. Lima, 09 de noviembre de 2018. Disponible en: http://portal.mtc.gob.pe/comunicaciones/regulacion_internacional/regulacion/proy%20normativos/INF_519-2018-MTC-26.pdf. Fecha de consulta: 11 de marzo de 2019.

promoviendo la competencia en el mercado”, y que en ese sentido los topes y los concursos son medidas ex ante que persiguen este objetivo, y el uso compartido (ej, espacios en blanco) son ejemplos de medidas ex post.

Finalmente, con respecto a la eficiencia social menciona que, *“los organismos reguladores internacionales tienen como objetivo que los servicios públicos de telecomunicaciones móviles de IMT se extiendan a lo largo del país y a la mayoría de la población, incluyendo áreas rurales o de preferente interés social. En tal sentido, el estudio de WIK(2012) incluye como una de las variables de medición de uso del espectro radioeléctrico, la variable cobertura geográfica o poblacional, de tal manera de garantizar la disponibilidad del servicio para todos los usuarios en una determinada zona.”*NFT

Buscando garantizar los tres tipos de eficiencia, se proponen 4 indicadores, a saber:

- i. Indicador n_1 relacionado a la evolución del uso de servicios en función a las velocidades de transmisión que entrega cada operadora en el periodo actual comparado con el periodo anterior.
- ii. Indicador n_2 relacionado con la evolución de la capacidad instalada se encuentra en función a los valores de capacidad teórica ofertada en el periodo actual comparado con el periodo anterior.
- iii. Indicador nu_{CI} denominado nivel de uso del espectro radioeléctrico mide cuanto de velocidad transmitida se ha entregado respecto a la capacidad teórica ofertada en un determinado periodo.
- iv. Indicador nu_{BA} relacionado con el nivel del uso de la banda de espectro asignada, en función a la cantidad de espectro radioeléctrico utilizado respecto a la porción total de espectro asignado a una operadora en una banda de frecuencia.

El estudio delimita el alcance de la metodología propuesta a las asignaciones de porciones de espectro radioeléctrico de servicios públicos, excepto las asignaciones para el servicio portador a través de enlaces punto a punto, así como las asignaciones de espectro correspondientes al segmento espacial de los sistemas satelitales.

El documento sostiene que:

“la selección de los indicadores condice con los criterios de medición de uso eficiente que refiere el documento Políticas de banda ancha para América Latina y el Caribe (OCDE/ BID, 2016). En dicho documento se declara que, para estimar la "eficiencia" del espectro, es indispensable medir el grado en el que se está utilizando bien este recurso.

En esta línea, la OCDE/ BID indica que, ya que no existen "métodos normalizados para medir la eficiencia de forma exhaustiva", se hace

necesario calcular varios indicadores considerando las características específicas de cada mercado.

(...)

Tomando estas recomendaciones, la metodología que esta administración promueve considera cumplir con los siguientes criterios:

- El cálculo de varios indicadores
- La limitación de estos a características particulares de los mercados: en determinada área geográfica y banda de frecuencias

En atención al primer criterio, la metodología aquí descrita considera el cálculo de los siguientes cuatro indicadores, los cuales, como se aprecia, abordan de forma directa o indirecta diversos enfoques de análisis como son el social (en cuanto al uso de los servicios y su evolución), económico (en cuanto a la promoción del desarrollo tecnológico y de la expansión de infraestructuras) y técnico (como relación directa de características y parámetros técnicos inherentes a las redes inalámbricas):

- a. Uso de los servicios públicos de comunicaciones
- b. Capacidad instalada
- c. Uso de la capacidad instalada
- d. Uso de la banda de espectro asignado”

La definición que se propone para cada uno de los 4 indicadores es la siguiente:

i. El nivel de evolución de uso de los servicios públicos de comunicaciones (n_1):

$$n_1 = \frac{T_tra_t}{T_tra_{t-1}}$$

Donde:

T_tra_t : Suma de los valores de *Throughput* máximo de todas las portadoras de Radiofrecuencia durante el semestre t de un operador por la cantidad de espectro radioeléctrico por cada asignación de una banda y por área de provincia. Se encuentra expresado en las unidades Mbps/Hz/km².

T_tra_{t-1} : Suma de los valores de *Throughput* máximo de todas las portadoras de Radiofrecuencia durante el semestre t-1 de un operador por la cantidad de espectro radioeléctrico por cada asignación de una banda y por área de provincia. Se encuentra expresado en las unidades Mbps/Hz/km².

t: Semestre actual

t-1: Semestre inmediato anterior al semestre actual.

El cálculo de T_{tra} se da a partir de la siguiente expresión:

$$T_{tra} = \frac{VT}{EREA * AP}$$

Donde:

VT: Suma de los valores de *Throughput* máximo de todas las portadoras de Radiofrecuencia durante el semestre *t* de un operador. Se encuentra expresado en las unidades Mbps.

AP: Superficie, en km², de una provincia asignada a un operador.

EREA: Porción de espectro radioeléctrico, en MHz, asignado a una operadora en una banda de frecuencia.

ii. **El nivel de evolución de la capacidad instalada (n_2):**

$$n_2 = \frac{T_{ins_t}}{T_{ins_{t-1}}}$$

Donde:

T_{ins_t} : Suma de los valores de capacidad teórica ofertada en todas las portadoras de Radiofrecuencia de un operador durante el semestre *t* por la cantidad de espectro radioeléctrico por cada asignación de una banda y por área de provincia. Se encuentra expresado en las unidades Mbps/Hz/km².

$T_{ins_{t-1}}$: Suma de los valores de capacidad teórica ofertada en todas las portadoras de Radiofrecuencia de un operador durante el semestre *t-1* por la cantidad de espectro radioeléctrico por cada asignación de una banda y por área de provincia. Se encuentra expresado en las unidades Mbps/Hz/km².

t: Semestre actual

t-1: semestre inmediato anterior al año actual.

El cálculo de T_{ins} se da a partir de la siguiente expresión:

$$T_{ins} = \frac{\sum_{i=1}^q c_i}{EREA * AP}$$

Donde:

C_i : Capacidad teórica ofertada por Portadora i . Se encuentra expresado en las unidades Mbps.

AP: Superficie, en km^2 , de una provincia asignada a un operador.

q : Cantidad total de Portadoras en una provincia asignada a una operadora en una determinada banda de frecuencia.

iii. El nivel de uso de la capacidad instalada ($nuCl$):

$$nuCl = \frac{T_{tra_t}}{T_{ins_x}}$$

Donde:

T_{tra_t} : Suma de los valores de *Throughput* máximo de todas las portadoras de RF durante el semestre t de un operador por la cantidad de espectro radioeléctrico por cada asignación de una banda y por área de provincia. Se encuentra expresado en las unidades Mbps/Hz/ km^2 .

x : Es el semestre actual (t) o semestre inmediato anterior al semestre actual ($t-1$), dependiendo del valor obtenido en n_2 . Si n_2 es menor que 1, entonces $x = t$, caso contrario, si n_2 es mayor o igual a 1, entonces $x = t-1$

T_{ins_x} : Suma de los valores de capacidad teórica ofertada en todas las portadoras de RF de un operador durante el semestre t por la cantidad de espectro radioeléctrico por cada asignación de una banda y por área de provincia. Se encuentra expresado en las unidades Mbps/Hz/ km^2 .

iv. El nivel de uso de la banda de espectro asignada ($nuBA$):

Se calcula por provincia asignada a un operador para una banda de frecuencia mediante la siguiente expresión

$$nuBA = \frac{\sum_{i=1}^j nuES_i}{j}$$

Donde:

j : Cantidad de Sectores (definidos en cada radio base) en un área de provincia de un operador en una determinada banda de frecuencia.

nuES: Nivel de uso de la porción de espectro radioeléctrico asignada en un sector i.

El procedimiento para calcular $nuES_i$ se da mediante la siguiente expresión:

$$nuES_i = \frac{\sum_{k=1}^c BW_k}{EREA}$$

Donde:

c: Cantidad de portadoras de 2G, 3G, 4G y 5G en un sector (definido en cada radiobase) en particular.

BW_k : Ancho de banda de espectro radioeléctrico, en Hz, de portadora k que opera en el sector en particular.

$EREA$: Porción de espectro radioeléctrico, en Hz, asignado a una operadora en una banda de frecuencia. De ser el caso en el que se aplique la funcionalidad de agregación de portadoras, se incorpora a tal porción inicial, el ancho de banda de la/s portadora/s de las otras bandas de frecuencias con las que se opere.

3.5 COLOMBIA

En el año 2012 la Agencia Nacional del Espectro publicó su “Manual de Gestión del Espectro Radioeléctrico”⁴⁵ compuesto por 9 títulos. El Título VIII titulado “Mediciones del factor de utilización y de la eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico”⁴⁶ aborda las cuestiones de por qué es importante tener en cuenta los principios de eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico, considera los principios generales y

⁴⁵ COLOMBIA. Agencia Nacional del Espectro. *Manual de gestión de espectro radioeléctrico*. Bogotá D.C. 20 de diciembre de 2012. Disponible en: <https://www.ane.gov.co/index.php/gestion-de-la-entidad/planeacion/56-poliliman/37-manuales>. Fecha de consulta: 11 de marzo de 2019.

⁴⁶ COLOMBIA. Agencia Nacional del Espectro. *Manual de gestión de espectro radioeléctrico. Título VIII Mediciones del factor de utilización y de la eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico*. Bogotá D.C. 31 de diciembre de 2012. Disponible en: https://www.ane.gov.co/images/ArchivosDescargables/Planeacion/poli-lineamientos-manuales/Manuales/ManualGestionEspectro/Titulo_VIII.pdf. Fecha de consulta: 11 de marzo de 2019.

buenas prácticas internacionales de gestión del espectro radioeléctrico con miras a la estimación y mejoramiento en su eficiencia desde los puntos de vista administrativos, económicos, técnicos y sociales. Haciendo uso de la formulación desarrollada por la UIT se describen los conceptos esenciales para expresar y evaluar el Factor de Utilización del Espectro – SUF y la Eficiencia en el Uso del Espectro - SUE, así como las metodologías para su cálculo. La formulación presentada en este título del Manual de Gestión del Espectro no se presenta en este documento pues corresponde a la misma ya desarrollada en el numeral dedicado a recomendaciones de la UIT.

El Manual de Gestión del Espectro concluye con la formulación de recomendaciones generales para ayudar a aumentar la eficiencia en el uso del espectro desde los puntos de vista mencionados (administrativos, económicos, técnicos y sociales), Estas recomendaciones son presentadas a continuación:

Recomendaciones generales:

1. Hacer de los objetivos de uso eficiente del espectro una parte importante de las políticas de gestión del espectro.
2. Velar por la aplicación de estas políticas en las prácticas diarias de la gestión del espectro.
3. Realizar auditorías periódicas sobre el uso de diferentes bandas del espectro y controlar a los titulares de licencias en el tema de la eficiencia con que utilizan el espectro asignado.

Aspectos administrativos:

1. La implementación eficiente y el buen funcionamiento de la organización de gestión del espectro radioeléctrico, como un ministerio especializado u organismo autónomo.
2. Realizando de manera transparente, no discriminatoria, las políticas económicamente eficientes y efectivas de gestión del espectro, que proporcionan seguridad jurídica.
3. La migración paulatina y gradual del modelo de gestión tradicional a un modelo híbrido que incorpore formas más liberales de la gestión del espectro, por lo general en forma de banda por banda, tales como la introducción del mercado secundario del espectro y/o la autorregulación de la industria en varias bandas, así como mayor promoción de un modelo de uso común en un número creciente de bandas de frecuencia.
4. Como otro aspecto de la migración gradual del modelo de gestión está la introducción de políticas que llevan a la flexibilización y la neutralidad tecnológica en el uso del espectro, mediante la reducción o eliminación de restricciones innecesarias y la eliminación de barreras regulatorias a fin de promover la

innovación, la creación de condiciones para el desarrollo de nuevos servicios, la reducción de riesgos de inversión y la estimulación de competencia entre las distintas tecnologías.

5. Facilitar la adopción oportuna de nuevas aplicaciones y tecnologías, mientras se protegen los servicios existentes de interferencias perjudiciales.
6. Asegurar el uso más eficiente de los recursos de espectro limitado a través de la eliminación de casos de uso ineficiente o acaparamiento de espectro asignado.
7. Alinear las políticas nacionales sobre el uso del espectro radioeléctrico con las recomendaciones internacionales, con el fin de lograr un rápido desarrollo de nuevas bandas y economías de escala.

Aspectos económicos:

1. Aplicación del principio de la autofinanciación de la organización de gestión del espectro a través del recaudo de tasas por el uso del espectro.
2. La asignación de espectro a los usuarios que generan el mayor valor de este recurso (eficiencia dinámica).
3. Mejorar la infraestructura del país mediante el uso eficiente e intensivo del espectro.
4. La adopción de respuestas flexibles a los cambios del mercado y las tecnologías con el fin de garantizar la asignación oportuna del espectro para nuevos servicios, una vez que sean viables técnica y comercialmente.
5. Reducir al mínimo las barreras de entrada, los costos de gestión del espectro de las transacciones y otras restricciones para asegurar un mercado de servicios inalámbricos eficiente y competitivo.
6. Regular los precios del espectro radioeléctrico, que sean transparentes, objetivos, no discriminatorios y adecuados a la calidad de las frecuencias asignadas.
7. Proporcionar incentivos para el retorno del espectro que ya no se usa, o cuyo uso no es técnicamente eficiente, así como la reorganización y reasignación del espectro radioeléctrico donde sea necesario, teniendo en cuenta el impacto que esto causa en los servicios existentes.
8. Llevar a cabo las consultas públicas, como condición previa para cambiar los objetivos o las políticas de gestión del espectro.

Aspectos sociales:

1. Apoyar las políticas públicas en los servicios de telecomunicaciones, la competencia en el mercado de las telecomunicaciones y las opciones para la elección del consumidor.
2. Salvaguardar los intereses del uso del espectro para el funcionamiento eficaz de la seguridad pública del Estado, el desarrollo socio-económico, salvaguardando la vida humana, la protección del medio ambiente, el alivio de desastres, los servicios de

emergencias aéreas y marítimos y otros servicios de telecomunicaciones de uso no comercial.

3. Asegurar la estabilidad regulatoria.
4. Promover activamente la presencia del Estado y la participación activa de todos los habitantes en la vida social, cultural, económica y política del país.
5. Promover el desarrollo tecnológico, así como el crecimiento económico sano y sostenible en todos los sectores de la vida nacional, incluida la educación, salud, trabajo, seguridad y justicia, industria, comercio, transporte, medio ambiente y las relaciones internacionales con otras naciones.
6. Asegurar la transparencia y permitir una amplia participación de todos los sectores de la nación en el establecimiento de políticas de gestión del espectro radioeléctrico.

Aspectos técnicos:

1. Optimización (en el desarrollo de nuevas instalaciones y modernización de los sistemas de radio) de los parámetros del sistema electromagnético que determina el volumen de frecuencias, lo que podría facilitar la compartición de frecuencias de los diferentes servicios y dar cabida a más redes en una determinada área.
2. Planificación de las redes con respecto a las características nominales de los sistemas de radio, en particular, la reducción innecesaria de “márgenes” de la potencia del transmisor, altura de la antena, fuerza de recepción de la señal de campo, etc.
3. Promoción de configuraciones de redes, para la provisión de servicios de radiocomunicación y de radiodifusión, que en teoría son lo más cercano posible a las redes óptimas, desde el punto de vista de la eficiencia de utilización del espectro.
4. La adopción de técnicas de modulación y de parámetros de los equipos para la utilización eficiente de las bandas de frecuencias, a fin de llegar lo más cerca posible a los límites potenciales de un “sistema de radio ideal”.
5. Uso del factor tiempo en relación con un sistema adecuado para lograr una mayor eficiencia del espectro.

También, en el año 2012 la Agencia Nacional del Espectro contrató una consultoría denominada “Modelos de medición y sistemas de incentivos orientados a promover el uso eficiente del espectro”⁴⁷, la cual fue desarrollada por Gómez Consultores, la cual culminó con tres informes. En el primer informe se realiza un relevamiento

⁴⁷ COLOMBIA. Agencia Nacional del Espectro. *Modelos de medición y sistemas de incentivos orientados a promover el uso eficiente del espectro*. Informe I. Análisis normativa y casos internacionales, contrato de consultoría con Gómez Consultores, Bogotá D.C. Noviembre de 2012.

internacional analizando los desarrollos realizados en algunos países en cuanto a eficiencia en el uso del espectro, el segundo informe realiza un análisis de la normatividad de Colombia, que concluye validando la factibilidad constitucional de imponer medidas de uso eficiente del espectro por parte de la administración, el establecimiento de mercados secundario de espectro, la posibilidad de sancionar por uso ineficiente del espectro, ente otros aspectos. En el tercer y último informe se presentan los mecanismos aplicables a Colombia, entre los cuales se encuentran:

- Desarrollo de mercados secundarios
- Subastas en bloque de grupos de frecuencias punto a punto
- Establecimiento de sobretasas por congestión
- Establecimiento de sobretasas por uso ineficiente
- Mecanismos de tasación especiales para entidades estatales
- Indicadores mínimos de eficiencia
- Desarrollo de sustitutos de mercado

Co respecto al establecimiento de indicadores de obligatorio cumplimiento, el informe acoge nuevamente la propuesta de la UIT, sobre lo cual menciona⁴⁸: *“en consideración a que uno de los propósitos fundamentales del objeto de este proyecto tiene que ver con los métodos de medición de la eficiencia en el uso del espectro, se dedicarán algunos de los apartes siguientes a dificultades específicas relacionadas con la aplicación de tales métodos de medición”*. En efecto, continua presentando la dificultad de definición de una métrica estándar que aplique a todos los servicios de radiocomunicaciones y permita compáralos, por lo cual recomienda la clasificación por servicios, se menciona que además de la dificultad en la definición de los indicadores está también la definición de los valores mínimos que deberían tener dichos indicadores y concluye que *“aunque con lo propuesto se busca establecer mecanismos de cálculo cuya aplicación sea lo más simple posible, se recomienda su utilización únicamente en los casos en que no es posible recurrir a otros mecanismos de promoción del uso eficiente del ERE y solo en bandas cuyo factor de ocupación esté por encima del umbral definido para calificarlas como bandas congestionadas”*, esto debido a la dificultad de aplicación y cálculo de estos indicadores.

⁴⁸ *Ibíd.*

Este informe también presenta ejemplos de cálculo para casos particulares (ej. Punto a punto), como los incluidos en la Recomendación UIT-R SM.1046-2.

El informe concluye con las siguientes conclusiones:

- *En el caso de aplicar herramientas relacionadas con el cálculo de factores de congestión, debe preverse el desarrollo de herramientas informáticas adecuadas que permitan tanto la fácil incorporación y registro de información proveniente de otros sistemas o de los usuarios del espectro, así como su verificación y el cálculo correspondiente.*
- *Los mecanismos que generan indicadores de eficiencia son complejos en su implementación y carga operativa para las partes en materia de información y mediciones, por lo que solo se aconsejan ante la ausencia de otras alternativas.*

De forma paralela, la Agencia Nacional del Espectro adelantó en 2012 una consultoría sobre flexibilización de espectro⁴⁹, a la cual dio continuidad en una siguiente fase en 2013, contratando una nueva consultoría denominada “*Estructuración de una propuesta para la implementación de mecanismos de flexibilización de la gestión del espectro en el país y construcción de una herramienta de cálculo de indicadores de la eficiencia en el uso del espectro*”⁵⁰, la cual fue trabajada por Gómez Consultores. Gran parte de los 4 informes que componen esta consultoría se dedican al desarrollo del mercado secundario de espectro, sin embargo, el capítulo 4 del segundo informe se dedica a la descripción de una herramienta automatizada para la medición o cálculo de la eficiencia del uso del espectro que permita a la Agencia Nacional del Espectro realizar diagnósticos internos en diferentes bandas de frecuencia, a la cual se le denominó INDEFI (por su principal funcionalidad de calcular los “Indicadores de Eficiencia” del uso del espectro).

INDEFI permitía realizar el cálculo de indicadores de eficiencia de la forma en que se proponen en la Recomendación UIT-R SM.1046-2, para lo cual era alimentada

⁴⁹ COLOMBIA. Agencia Nacional del Espectro. *Modelos y medidas orientadas a la flexibilización de la gestión de espectro radioeléctrico*. Contrato No. 087/2012 con UT Bluenote – Tovarfajardo, Bogotá D.C. 2012.

⁵⁰ COLOMBIA. Agencia Nacional del Espectro. *Estructuración de una propuesta para la implementación de mecanismos de flexibilización de la gestión del espectro en el país y construcción de una herramienta de cálculo de indicadores de la eficiencia en el uso del espectro*. Contrato de consultoría con Gómez Consultores, Bogotá D.C. Diciembre de 2013.

con datos tomados de un sistema conocido como SGE, que es usado por el Ministerio de TIC y la ANE en su proceso de gestión de espectro y que, entre otras funcionalidades cuenta con acceso a una base de datos con los parámetros técnicos de las asignaciones de espectro realizadas en el país, también debía ser alimentado con datos del DANE y el IGAC y con datos adicionales que debían ser solicitados a los asignatarios por no contarse con registros administrativos de esta información, tal es el ejemplo del tráfico cursado por los enlaces punto a punto.

Debido a la información con que no cuenta la entidad, y la dificultad que representa su consecución por la carga operativa que representa para los asignatarios, la herramienta INDEFI no ha sido utilizada para el cálculo de las eficiencias para las que fue programada.

4 PROPUESTA PARA MEDICIÓN DE EFICIENCIA

En cuanto a la medición de la eficiencia en el uso del espectro, de la revisión internacional es claro que todas las administraciones coinciden con la recomendación incluida en el manual de la UIT⁵¹ y algunas de sus recomendaciones, en donde se indica que el cálculo es diferente para cada tipo de servicio y de sistema, y una simple comparación de medidas entre sistemas llevaría a falsas conclusiones, como se cita a continuación:

“La medición de la eficacia de utilización del espectro es diferente para cada tipo de sistema o de servicio. Por ejemplo, el cálculo de la eficacia del espectro para sistemas punto a punto es diferente del cálculo para sistemas por satélite o móviles terrestres. Por lo tanto, sólo se puede hacer una comparación entre tipos de sistemas similares y en bandas de frecuencias o canales específicos. También puede ser provechoso realizar una comparación de la eficacia del espectro o de su utilización en función del tiempo de un único sistema para observar si se producen mejoras en el ámbito específico estudiado.”⁵²

México ha propuesto para su país la definición de los indicadores de eficiencia espectral clasificando los servicios de radiocomunicaciones en las siguientes categorías:

- Radiodifusión por satélite
- Sistemas satelitales fijos
- Redes móviles de acceso público (voz y datos)
- Enlaces fijos
- Redes móviles privadas
- Radiodifusión de televisión terrestre
- Radiodifusión terrestre sonora (AM/FM y digital)

Para cada una de estas categorías ha establecido las unidades de medida que debería tener el indicador de eficiencia en el uso del espectro, sin embargo, no ha profundizado sobre la formulación matemática, sobre la disponibilidad de

⁵¹ UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Manual de Gestión Nacional de Espectro*. Oficina de Radiocomunicaciones. Edición 2015. Disponible en: <https://www.itu.int/pub/R-HDB-21/es>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

⁵² *Ibíd.* p. 286.

información con que cuenta la administración para su cálculo o sobre la obligación de reporte de información que debe imponerse a los administrado para poder realizar dicho cálculo.

Por la gran cantidad de servicios de radiocomunicaciones, conviene entonces priorizar el análisis en aquellos de mayor impacto, a saber: Punto a punto, punto multipunto y servicios móviles terrestres IMT.

Para el servicio punto a punto y punto-multipunto las aproximaciones más desarrolladas entre los países consultados, son aquellas que se han venido proponiendo en la Agencia Nacional del Espectro. En cuanto a servicios móviles terrestres IMT la propuesta más desarrollada parece ser hasta el momento la de Perú, en donde se proponen fórmulas de cálculo y pone a discusión el proyecto de resolución mediante el cual se impondría la obligación de reporte de información. Al respecto resulta importante resaltar que esta propuesta aún está en etapa de discusión y no se ha aplicado realmente, por lo cual a la fecha no se podría tomar como mejor práctica, ya que la carga operativa que la propuesta impone para los asignatarios en cuanto a reporte de información y su posterior análisis en cabeza de la administración podría hacerla inoperante.

Por lo anterior, se propone en este proyecto una aproximación más conservadora, definiendo una medición que pueda ser fácilmente aplicada al servicio móvil terrestre IMT, teniendo presente que, a mayor certeza en el indicador definido, mayor complejidad de aplicación. Por el contrario, si se para la definición del indicador se realizan suposiciones gruesas (por ejemplo, el área de cobertura por celda, que como es usual, en la práctica podría no ser una huella circular de radio definido), se sacrificará precisión para ganar simplicidad.

La propuesta entonces es inicialmente proponer un indicador de fácil cálculo, puesto que debido a la complejidad del problema y a la intención de definir un indicador lo más elaborado posible, se percibe que el avance de todas las administraciones consultadas es poco o incluso nulo. Es claro que inicialmente este indicador no podrá ser usado como elemento de regulación, pero al menos permitirá tener una primera comparación en cuanto a desempeño de las redes de servicios móviles terrestres destinadas a las IMT, y será un primer paso hacia la definición de indicadores más elaborados.

Retomando las definiciones del Anexo 1 de la Recomendación UIT-R SM.1046, tenemos que el **factor de utilización del espectro (U)** se expresa como:

$$U = B * S * T$$

Para el caso de los servicios móviles terrestres el ancho de banda (*B*) corresponde a la asignación realizada a cada operador, el espacio geométrico (*S*) corresponde

a área superficial de cobertura y la variable de tiempo (T) no sería relevante por cuanto debemos suponer que cada red se mantiene en operación todo el tiempo.

Posteriormente, se define la **eficacia en la utilización del espectro (EUE)**, definida como la relación entre la información transferida y el grado de utilización del espectro. Para ello se emplea la siguiente expresión:

$$EUE = \frac{M}{U} = \frac{M}{B * S * T}$$

Siendo M el efecto útil que se consigue con el sistema de telecomunicaciones considerado.

Al analizar el comportamiento de la fórmula planteada para la EUE, encontramos que de acuerdo con la definición de eficiencia (logros/recursos) se busca la maximización de M haciendo uso de los menores recursos posibles (B , S , T). Es claro que para el caso de servicios IMT, servicio en el cual los planes de asignación de los países se definen basándose en estimaciones de crecimiento de las demandas de servicio, el objetivo no es en si mismo el menor uso del espectro asignado a una compañía, sino por el contrario, el ideal sería que usara todo el espectro que le ha sido asignado para mejorar la cantidad y calidad de los servicios prestados. Similar razonamiento puede ser aplicado a la variable de área geométrica, en donde lo ideal no es reducir el espacio denegado como ocurre en servicios como el punto a punto, sino maximizar el área de cobertura buscando un objetivo de servicio universal, es así como el ideal es lograr la cobertura del 100% del territorio nacional. La variable tiempo como ya se explico no resulta relevante para efectos de comparación pues se asume que la red se mantiene disponible el 100% del tiempo.

Debido a lo anterior, el presente proyecto propone una definición de eficiencia en el uso del espectro para servicios móviles más alineada con los objetivos técnicos, económicos y sociales para este servicio de la forma en que se presenta a continuación.

Como lo menciona el MTC de México en su documento de consulta pública y otros países como USA, para evaluar adecuadamente la eficiencia se debe tomar en cuenta aspectos de tipo técnico, económico y social.

Sobre el aspecto técnico menciona que “*está relacionado con el objetivo global de asegurar que las bandas de frecuencia se utilicen permitiendo la máxima utilización del recurso, evitando, por ejemplo, interferencias y separaciones*”. En este sentido una métrica de eficiencia técnica debe reflejar que tan evolucionada está la tecnología con respecto a los últimos desarrollos, por lo cual un indicador de este

tipo podría ser definido relacionando las velocidades ofrecidas por las tecnologías instaladas con las velocidades instaladas por las tecnologías ofrecidas por los últimos avances popularizados comercialmente:

$$\varepsilon_t = \frac{\sum_{i=1}^n V_{ins_i}}{n * V_{ideal}}$$

Donde:

- ε_t : Eficiencia técnica del operador.
- V_{ins_i} : Velocidad pico teórica de cada estación base i de las n estaciones base del operador.
- V_{ideal} : Velocidad pico teórica de la mejor solución comercial con el tamaño de bloque definido por la administración.

Sobre el aspecto económico afirma que “*están relacionados con la garantía de que el espectro radioeléctrico se utilice de tal modo que se satisfaga el objetivo nacional de conseguir una asignación eficiente de los recursos*”, por lo cual, un indicador que pretenda medir esta eficiencia económica podría implicar como variables la cantidad de espectro en uso Vs la cantidad de espectro asignado al operador para este tipo de servicios. Este indicador a su vez da razón de grado de aprovechamiento del recurso por el cual el asignatario pagó cuantiosas cantidades de dinero:

$$\varepsilon_e = \frac{\sum_{i=1}^n BW_{ins_i}}{n * BW_{ideal}}$$

Donde:

- ε_e : Eficiencia económica del operador.
- BW_{ins_i} : Ancho de banda usado en cada estación base i de las n estaciones base del operador.
- BW_{ideal} : Ancho de banda asignado al operador.

Finalmente, con respecto a la eficiencia social menciona que, “*los organismos reguladores internacionales tienen como objetivo que los servicios públicos de telecomunicaciones móviles de IMT se extiendan a lo largo del país y a la mayoría de la población, incluyendo áreas rurales o de preferente interés social.*”, por lo cual, el indicador de eficiencia social debe tener en cuenta el área de cobertura de la red del operador:

$$\varepsilon_s = \frac{\sum_{i=1}^n S_{ins_i}}{S_{ideal}}$$

Donde:

- ε_s : Eficiencia social del operador.
- S_{ins_i} : Área de cobertura de cada estación base del operador. Por simplicidad se podría suponer una cobertura circular dependiendo de la banda de frecuencias usada en cada estación base. Claramente esta es una suposición fuerte, que afecta en gran medida el indicador pues no consideraría solapamientos de banda, configuración de las antenas, potencias particulares de cada estación base, características del terreno, sectores de cada estación base, etc. Una mejor aproximación considerando todas estas variables podría ser realizada mediante una simulación especializada, a costa de gran complejidad en su cálculo y necesidad de mayor detalle del diseño de la red de cada operador y su consecuente aumento en la carga operativa tanto para el operador como para la administración.
- S_{ideal} : Área de cobertura deseada para el país.

De esta forma, el indicador de uso eficiente del espectro radioeléctrico estaría dado por el producto de las tres eficiencias, a saber:

$$\varepsilon = \varepsilon_t * \varepsilon_e * \varepsilon_s = \frac{\sum_{i=1}^n V_{ins_i}}{n * V_{ideal}} * \frac{\sum_{i=1}^n BW_{ins_i}}{n * BW_{ideal}} * \frac{\sum_{i=1}^n S_{ins_i}}{S_{ideal}}$$

Ahora bien, la anterior definición nos lleva a determinar la información de cada estación base con que se debe contar para poder efectuar los cálculos:

- Cantidad de estaciones base
- Tecnología desplegada en cada una de ellas
- Ancho de banda efectivamente usado en cada una de ellas
- Bandas efectivamente usadas en cada estación base

Adicionalmente, si se desea mejorar el cálculo se podría necesitar la siguiente información:

- Ubicación de cada estación base
- Potencias de radiación en cada estación base
- Detalles de los equipos
- Cartografía nacional
- Detalle de las portadoras en cada banda de frecuencias por estación base

A continuación, se presenta una propuesta normativa para Colombia tomando como base el desarrollo realizado en el presente capítulo:



REPÚBLICA DE COLOMBIA



RESOLUCIÓN No. DEL [día] [mes] [año]

“Por la cual se dictan medidas sobre el uso eficiente del espectro para el servicio móvil terrestre prestado en bandas identificadas para las IMT”

LA DIRECTORA GENERAL DE LA AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO

En ejercicio de sus facultades legales y especialmente de las que le confieren la Ley 1341 de 2009, la Ley 1507 de 2012, la Ley 1753 de 2015, el Decreto 4169 de 2011, el Decreto 093 de 2010 y el Decreto 1083 de 2015 y,

CONSIDERANDO

Que el artículo 75 de la Constitución Política de Colombia establece que el espectro electromagnético es un bien público inenajenable e imprescriptible sujeto a la gestión y control del Estado, que se garantizará la igualdad de oportunidades en el acceso a su uso en los términos que fije la ley y que, para garantizar el pluralismo informativo y la competencia, el Estado intervendrá por mandato de la ley para evitar las prácticas monopolísticas en el uso del espectro electromagnético.

Que los artículos 101 y 102 de la Constitución Política de Colombia establecen que el espectro electromagnético es un bien público que forma parte de Colombia y pertenece a la Nación.

Que la parte del espectro electromagnético usado para las telecomunicaciones, conocida como espectro radioeléctrico, es una porción limitada en la cual se deben organizar todos los servicios de telecomunicaciones existentes garantizando operatividad de todos ellos, por lo que el uso eficiente del espectro es un elemento importante para cualquier administración. Que adicionalmente, el espectro radioeléctrico como recurso limitado además cuenta con un importante valor económico y social.

Que la Ley 1341 de 2009, por medio de la cual se definen los principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización del sector de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones –TIC–, establece en el numeral 3, del artículo 2, que el Estado fomentará el despliegue y uso eficiente de la infraestructura para la provisión de redes de telecomunicaciones y los servicios que sobre ellas se puedan prestar, y promoverá el óptimo aprovechamiento de los recursos escasos, como lo es el espectro radioeléctrico, con el ánimo de generar competencia, calidad y eficiencia, en beneficio de los usuarios.

Que el artículo 4 de la Ley 1341 de 2009 señala, entre otros fines de la intervención estatal en el sector de las TIC, el garantizar el uso adecuado del espectro radioeléctrico.

Que la Agencia Nacional del Espectro, en adelante la ANE, fue creada mediante la Ley 1341 de 2009 modificada mediante el Decreto 4169, como Unidad Administrativa Especial del orden nacional, con personería jurídica, autonomía técnica, administrativa, financiera y patrimonio propio adscrita al Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, en adelante MinTIC, con el objeto de brindar soporte técnico para la gestión, planeación, atribución y ejercicio de la vigilancia y control del espectro radioeléctrico.

Que la Corte Constitucional en las sentencias C-093 de 1996 y SU-182 de 1998, entre otras, ha reconocido el carácter de recurso escaso del espectro electromagnético, señalando que éste es la plataforma fundamental en el desarrollo de actividades informativas, recomendando en esa medida la necesidad de una mayor intervención estatal en el acceso al espectro electromagnético.

Que por lo mencionado, se hace necesario dictar medidas con relación al uso eficiente del espectro radioeléctrico.

Que en mérito de lo anterior,

RESUELVE

Artículo 1°. Objeto. La presente resolución tiene por objeto dictar medidas con relación al uso eficiente del espectro radioeléctrico conforme al marco normativo aplicable y con sujeción al Reglamento de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), y al Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias (CNABF).

Artículo 2°. Definiciones. Para los efectos de la presente resolución, se adoptan las definiciones que en materia de telecomunicaciones ha expedido la

Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). Adicionalmente se tendrá en cuenta la siguiente definición:

Eficiencia en el uso del espectro: Medida de con qué eficiencia se está utilizando el espectro cuya fórmula conceptual busca reflejar el aprovechamiento dado al recurso desde el punto de vista técnico, económico y social.

Artículo 3°. Cálculo de la eficiencia en el uso del espectro en bandas IMT. El cálculo de la eficiencia en el uso del espectro para el servicio móvil terrestre prestado en bandas identificadas para las IMT (Telecomunicaciones Móviles Internacionales) en Colombia se realizará de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n V_{ins_i}}{n * V_{ideal}} * \frac{\sum_{i=1}^n BW_{ins_i}}{n * BW_{ideal}} * \frac{\sum_{i=1}^n S_{ins_i}}{S_{ideal}}$$

Donde:

- ε : Eficiencia en el uso del espectro IMT del proveedor de redes y servicios.
- V_{ins_i} : Velocidad pico teórica de cada estación base i de las n estaciones base del proveedor de redes y servicios.
- V_{ideal} : Velocidad pico teórica de la mejor solución comercial con el tamaño de bloque definido por la administración.
- BW_{ins_i} : Ancho de banda usado en cada estación base i de las n estaciones base del proveedor de redes y servicios.
- BW_{ideal} : Ancho de banda asignado al proveedor de redes y servicios.
- S_{ins_i} : Área de cobertura de cada estación base del proveedor de redes y servicios. Por simplicidad se podría suponer una cobertura circular dependiendo de la banda de frecuencias usada en cada estación base. Claramente esta es una suposición fuerte, que afecta en gran medida el indicador pues no consideraría solapamientos de banda, configuración de las antenas, potencias particulares de cada estación base, características del terreno, sectores de cada estación base, etc. Una mejor aproximación considerando todas estas variables podría ser realizada mediante una simulación especializada, a costa de gran complejidad en su cálculo y necesidad de mayor detalle del diseño de la red de cada operador y su consecuente aumento en la carga operativa tanto para el operador como para la administración.
- S_{ideal} : Área de cobertura deseada para el país.

Parágrafo 1°. El área de cobertura de cada estación base del proveedor de redes y servicios (S_{ins_i}), se supondrá circular, con un radio dependiendo de la banda de frecuencias usada en cada estación base.

Parágrafo 2°. La Agencia Nacional del Espectro publicará en su página web la siguiente información necesaria para el cálculo de la eficiencia en el uso del espectro de acuerdo con la fórmula establecida en el presente numeral:

- a. Una tabla con las velocidades pico teóricas (V_{ins_i}) para las tecnologías móviles terrestres desplegadas por los proveedores de redes y servicios en las bandas identificadas para IMT en Colombia.
- b. La velocidad pico teórica de la mejor solución comercial (V_{ideal}).
- c. Una tabla con el radio en km para el cálculo de la cobertura circular de cada estación base (S_{ins_i}) para cada banda de frecuencias identificada para IMT Colombia.
- d. *El* área de cobertura deseada para el país (S_{ideal}).

Artículo 4°. Todo proveedor de redes y servicios que preste servicios móviles terrestres para uso público o privado, en bandas identificadas para las IMT en Colombia, deberá reportar mensualmente a la Agencia Nacional del Espectro la información de cada estación base en operación, sus coordenadas, la tecnología desplegada en cada estación, y el ancho de banda efectivamente utilizado por las portadoras configuradas en cada estación base.

Artículo 5°. Vigencia. La presente resolución rige a partir de la fecha de su publicación, y deroga las disposiciones que le sean contrarias.

COMUNÍQUESE Y CÚMPLASE

Dada en Bogotá, D. C., a los [día] de [mes] de 2019

[Firma]

**MARTHA LILIANA SUAREZ PEÑALOZA
DIRECTORA GENERAL**

5 SISTEMA DE CONSULTA EN LÍNEA

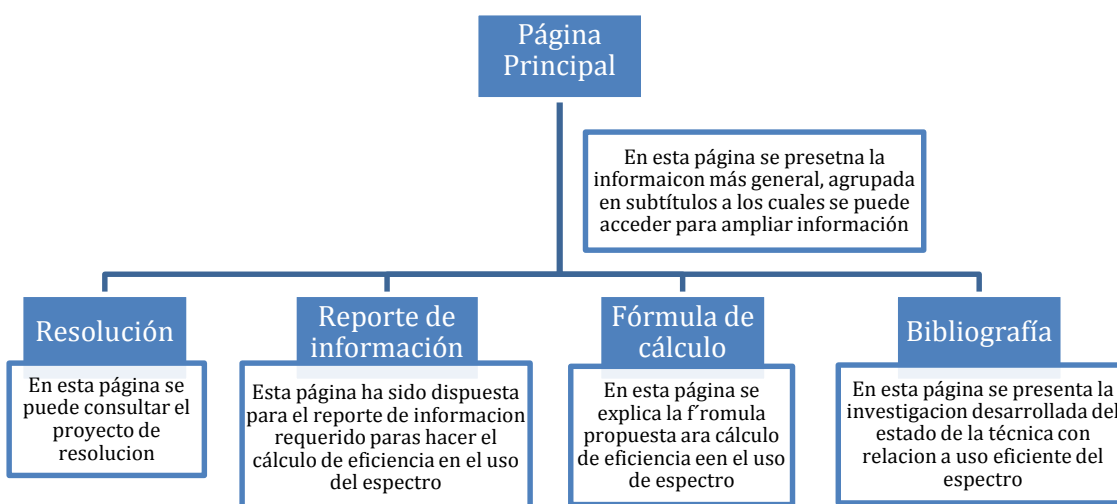
El presente trabajo propone la publicación de los resultados de la investigación desarrollada en los capítulos anteriores en un sistema de consulta en línea para facilitar su divulgación entre los interesados. Buscando este objetivo planteado, se ha desarrollado una propuesta de sistema de consulta en línea, el cual ha sido alojado en el siguiente link para consulta de todos los interesados:

<https://sites.google.com/view/eficiencia-espectral/p%C3%A1gina-principal>

En el presente capítulo se describe el sistema de consulta en línea, mostrando las diferentes páginas en que fue organizado el contenido para facilitar la consulta de la información.

La estructura propuesta para el sistema de consulta en línea es la siguiente:

Figura 3. Estructura del sistema de consulta en línea



Fuente: propia

El diseño del sistema de consulta en línea buscó mantener la imagen institucional de la página web de la Agencia Nacional del Espectro, en las siguientes Figuras se presenta el diseño de cada una de las páginas descritas con anterioridad.

Figura 4. Página Principal - Uso eficiente del espectro ANE



Fuente: propia

Figura 5. Resolución - Uso eficiente del espectro ANE

Resolución

http://sites.google.com/view/eficiencia-espectral/pagina-principal/resolucion

Aplicaciones Bookmarks Bricos - Personal Acceso cuentas de... Facebook YouTube Google Maps

Página principal

Inicio Publicado el 16 de 2016

Resolución uso eficiente del espectro

Obtener información

Resolución Colombia

Resolución con Dignidad

REPÚBLICA DE COLOMBIA

AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO

RESOLUCIÓN No. DE

"Por la cual se otorgan facultades sobre el uso eficiente del espectro para el servicio móvil fijo y se prohíbe su tenencia identificada por la RFP"

LA DIRECTORA GENERAL DE LA AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO

En ejercicio de sus facultades legales y especialmente de las que le confiere la Ley 1341 de 2006, la Ley 1607 de 2012, la Ley 1183 de 2010, el Decreto 4166 de 2011, el Decreto 081 de 2010 y el Decreto 1082 de 2015 y,

CONSIDERANDO

Que el artículo 15 de la Constitución Política de Colombia establece que el espectro electromagnético es un bien público reservado e inalienable sujeto a la gestión y control del Estado, que se garantizará la igualdad de oportunidades en el acceso a su uso en los términos que fija la Ley y que, para garantizar el desarrollo informativo y la competitividad, el Estado interviendrá por mandato de la ley para evitar las prácticas monopolísticas en el uso del espectro electromagnético.

Que los artículos 101 y 102 de la Constitución Política de Colombia establecen que el espectro electromagnético es un bien público que forma parte de Colombia y pertenece a la Nación.

Que la parte del espectro electromagnético usado para las telecomunicaciones, conocida como espectro radioeléctrico, es una porción limitada en la cual se deben regular, hacer los servicios de telecomunicaciones, evitando perjudicar la calidad de todos ellos, por lo que el uso eficiente del espectro es un elemento importante para cualquier administración. Que adicionalmente, el espectro radioeléctrico como recurso limitado además cuenta con un importante valor económico y social.

Que la Ley 1341 de 2006, por medio de la cual se definen los principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización del sector de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones -TIC-, establece en el numeral 2, del artículo 2, que el Estado fomentará el desarrollo y uso eficiente de la infraestructura para la provisión de redes de telecomunicaciones y los servicios que sobre ellas se puedan prestar, y promoverá el óptimo aprovechamiento de los recursos escasos, como lo es el espectro radioeléctrico, con el ánimo de generar competitividad, calidad y eficiencia, en beneficio de los usuarios.

Página 1 / 2

Indicador: Wsc-Cm-03-F1-A) Pasa a Super D/C
Categoría: TIC27. Teléfono: (57) 5 68 68 68

Indicador: F3000000

Correo: contacto@ane.gov.co
Teléfono: (57) 5 68 68 68
Página de seguridad, condiciones de uso y privacidad

Hecho con los nuevos sitios de Google para hacer sencillo en tener sitios actualizados

Crear un sitio

Fuente: propia

Figura 6. Reporte de Información - Uso eficiente del espectro ANE

Reporte de información

En esta página cada proveedor de redes y servicios debe reportar la información necesaria para el cálculo del indicador de eficiencia en el uso del espectro, para lo cual deberá adjuntar un código a la Agencia Nacional del Espectro.

Identificación del proveedor de redes y servicios

Reporte de información

Empresa

Tu empresa

Código *

Tu empresa

INFORMAR

Información estaciones base

Reporte - Hoja 1

ID	Longitud	Latitud	Tecnología	BW utilizado	Banda más baja utilizada
1					
2					
3					
4					
5					
6					
mas >					

Localización: Calle 93 # 17-45 Piso 4 Bogotá DC
 Documento: 17422, Teléfono: 01-610-0030
 Contacto Principal:
 E-mail: contacto@ane.gov.co
 Correo: SERVIDOR@ANE.GOV.CO
 Número de atención al público: Línea 01-610-0030, ext 300
 Política de seguridad, condiciones de uso y privacidad



Fuente: propia

Figura 7. Propuesta de Medición - Uso eficiente del espectro ANE

Formula

https://sites.google.com/site/eficiencia-especial/pagina-principal/formula

Aplicaciones Bookmarks Búsqueda Personal Acceso cuentas de... Facebook YouTube Google Maps

Página principal

ANE

GOBIERNO DE COLOMBIA

ANEXO 1000 / VÍDEO EFICIENTE DEL ESPECTRO

 Dispositivos de espectro
  Energía de espectro
  Gestión de Comunicaciones e Información
  Transformación e Innovación Regulatoria

EFICIENCIA EN EL USO DEL ESPECTRO

Fecha:
 Publicado: 01 Enero 2019

Explicación de la fórmula

[Opciones y notificaciones](#)

[Interacción Ciudadana](#)

[Suscribirse con Espectro](#)

PROPUESTA PARA MEDICIÓN DE EFICIENCIA

Se presenta para el cálculo del indicador de eficiencia en el uso del espectro una aproximación conservadora, definiendo una medición que pueda ser fácilmente aplicada al servicio móvil terrestre (MT), teniendo presente que, a mayor cercanía en el indicador definido, mayor complejidad de aplicación. Por el contrario, si se para la definición del indicador en realizar suposiciones generas (por ejemplo, el área de cobertura por celda, que como es usual, en la práctica podría no ser una huella circular de radio definida), se sacrificará precisión para ganar simplicidad.

La propuesta anterior es inicialmente tener un indicador de fácil cálculo, puesto que debido a la complejidad del problema y a la intención de definir un indicador lo más elaborado posible, se permite que el avance de todas las administraciones consultadas se poco o nulo sea. Es claro que inicialmente este indicador no podrá ser usado como elemento de regulación, pero al menos permitirá tener una primera comparación en cuanto a desempeño de las redes de servicios móviles terrestres destinadas a los MT, y será un primer paso hacia la definición de indicadores más elaborados.

Resaltando las definiciones del Anexo 1 de la Recomendación UIT-R SM 1546, tenemos que el **factor de utilización del espectro (U)** se expresa como:

$$U = B \cdot E \cdot T$$

Para el caso de los servicios móviles terrestres el ancho de banda (B) corresponde a la asignación realizada a cada operador, el espacio geométrico (E) corresponde a área superficial de cobertura y la variable de tiempo (T) no sería relevante por cuanto debemos asegurar que cada red se mantiene en operación todo el tiempo.

1

[Página](#)

Ubicación: Calle 14 # 17-63 Piso 4 Bogotá DC
 Dependencia: 14027, Teléfono: 371-6133-33-34
 Responsables Principales
 E-mail: comunicacion@anec.gov.co
 Correo para el contacto con el grupo de trabajo: comunicacion@anec.gov.co
 Puntos de contacto: comunicacion@anec.gov.co y comunicacion@anec.gov.co



[Crear un sitio](#)
[Definir un sitio](#)

Fuente: propia

Figura 8. Página de Bibliografía - Uso eficiente del espectro ANE

Bibliografía

ANÁLISIS DE RECOMENDACIONES INTERNACIONALES SOBRE USO EFICIENTE DEL ESPECTRO

Una medida de eficiencia relaciona los recursos utilizados para la consecución de un fin, con los logros obtenidos. Así, un sistema es más eficiente en tanto contenga mayores logros con menos recursos. En este orden de ideas, la eficiencia en el uso del espectro podría definirse de muchas formas dependiendo de cómo se conciben los logros, los cuales podrían estar definidos en términos económicos, sociales, técnicos, etc.

A continuación, se presenta un análisis de las definiciones y recomendaciones expuestas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones – UIT con respecto a este tema.

1. Manual de Gestión de espectro de la UIT

El Manual de Gestión de Espectro de la UIT menciona: "La eficiencia de utilización del espectro es una medida técnica de con qué eficacia se está utilizando el espectro. La fórmula de la eficiencia de utilización del espectro es una fórmula contextual general a la que se deben que añadir muchos detalles antes de que se

1

Compañía Sura, Calle 50 # 11-23, Bogotá D.C.
Código postal: 11021, Teléfono: (571) 490 00 00

Permiso de Funcionamiento

E-mail: ventas@suracompany.com
Correo para recibir el correo electrónico: ventas@suracompany.com
Número de licencia de funcionamiento: 11021, A 12-11

Política de privacidad, condiciones de uso y publicidad

Hecho con los nuevos sitios de Google, una forma sencilla de crear sitios web

Crear un sitio Denunciar abuso

Fuente: propia

CONCLUSIONES

El tema de eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico ha sido estudiado y trabajado por diferentes administraciones y organizaciones internacionales como lo es la Unión Internacional de Telecomunicaciones.

A la fecha, a pesar de que la eficiencia en el uso del espectro es de interés de todas las administraciones y reconocido internacionalmente como el objetivo principal de la gestión de espectro, pocas administraciones han trabajado el tema en profundidad.

La definición de indicadores y métricas de uso eficiente del espectro es un tema complejo, que además debe considerar varios enfoques como lo son el administrativo, el técnico, el económico y el social.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones y algunas administraciones como Estados Unidos, Brasil, México Colombia y Perú han realizado esfuerzos significativos en el desarrollo de métricas de uso eficiente del espectro, sin embargo, las propuestas realizadas implican cálculos complejos o dependientes de información con que no cuentan las administraciones y cuya consecución es complicada. Lo anterior ha dificultado la aplicación de dichas métricas.

Además de la definición de la métrica, existen otras complejidades asociadas como la definición de los valores mínimos aceptables para los indicadores.

Las métricas de uso eficiente del espectro deben ser definidas por cada tipo de servicios y no resulta conveniente su uso para comparación entre servicios, tal como lo recomienda la UIT.

En cuanto a formulación general para el cálculo de uso eficiente del espectro, la propuesta hasta el momento más aceptada y adoptada es la incluida en la Recomendación UIT-R SM.1046, en la cual se desarrolla el concepto de eficiencia en el uso del espectro *EUE* y expone diversos factores que influyen en la utilización eficaz del espectro sin embargo, la complejidad de la propuesta ha dificultado su implementación al punto que a la fecha, ningún país de los analizados en el presente trabajo, cuenta con regulación que fije niveles mínimos o que obligue a un reporte periódico de estos indicadores.

La recomendación UIT-R SM.1271 por su parte establece que los criterios de compartición se basan en las hipótesis de interferencia más desfavorables y que para lograr la utilización más eficaz del espectro, se considere la utilización de las probabilidades de interferencia.

La Recomendación UIT-R SM.856, revisa los casos donde se utilizan técnicas de antena adaptativa para reducir la distancia de reutilización cocanal entre estaciones

base y, finalmente, concluye que pueden lograrse notables mejoras en la distancia de reutilización utilizando en la estación base antenas adaptativas y por ende, presenta la relación entre los avances tecnológicos y la posibilidad de hacer un uso más intensivo del espectro.

La Recomendación UIT-R SM.1599 reconoce la importancia de evaluar la disponibilidad de espectro y proporciona métodos para evaluar la congestión del espectro.

Con respecto al servicio móvil terrestre IMT, actualmente Perú se encuentra en proceso de discusión de una propuesta de medición de indicadores de eficiencia en el uso del espectro y reporte de información que resulta interesante, sin embargo, aún no hay resultados concretos por cuanto el proceso aun no culmina.

El presente proyecto presenta una propuesta de cálculo de la eficiencia en el uso del espectro para redes móviles, priorizando la simplicidad.

El presente proyecto presenta una propuesta de cálculo de la eficiencia en el uso del espectro para redes móviles, priorizando la simplicidad de cálculo y recolección de información, esto implica necesariamente pérdida de precisión con respecto a la situación real de las redes, sin embargo, podría ser una primera solución viable a ser implementada por un país mientras maduran sus sistemas de recolección de información. Esta propuesta puede ser consultada en el capítulo 4 del presente documento.

Finalmente, el presente trabajo propone la publicación de los resultados de la investigación desarrollada en un sistema de consulta en línea, para facilitar su divulgación entre los interesados, para el cual se realiza un desarrollo que puede ser consultado en el capítulo 5.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. BLAKE, Roy. *Sistemas electrónicos de comunicaciones*. Segunda edición. Ed. Thomson. 2004. 985 págs.
- [2]. BRASIL. Agencia Nacional de Telecomunicaciones. *Resolución 548. Regulación para la Evaluación de la Eficiencia del Uso del Espectro de Radiofrecuencias*. 8 de noviembre de 2010. Publicado en DOU 11 de noviembre de 2010, rectificado en el DOU 04 de febrero de 2011. Disponible en: <http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2010/47-resolucao-548>. Fecha de consulta: 11 de marzo de 2019.
- [3]. COLOMBIA. Agencia Nacional del Espectro. Estructuración de una propuesta para la implementación de mecanismos de flexibilización de la gestión del espectro en el país y construcción de una herramienta de cálculo de indicadores de la eficiencia en el uso del espectro. Contrato de consultoría con Gómez Consultores, Bogotá D.C. Diciembre de 2013.
- [4]. COLOMBIA. Agencia Nacional del Espectro. *Manual de gestión de espectro radioeléctrico*. Bogotá D.C. 20 de diciembre de 2012. Disponible en: <https://www.ane.gov.co/index.php/gestion-de-la-entidad/planeacion/56-poliliman/37-manuales>. Fecha de consulta: 11 de marzo de 2019.
- [5]. COLOMBIA. Agencia Nacional del Espectro. *Manual de gestión de espectro radioeléctrico. Título VIII Mediciones del factor de utilización y de la eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico*. Bogotá D.C. 31 de diciembre de 2012. Disponible en: https://www.ane.gov.co/images/ArchivosDescargables/Planeacion/poliliman/lineamientos-manuales/Manuales/ManualGestionEspectro/Titulo_VIII.pdf. Fecha de consulta: 11 de marzo de 2019.
- [6]. COLOMBIA. Agencia Nacional del Espectro. *Modelos de medición y sistemas de incentivos orientados a promover el uso eficiente del espectro*. Informe I.

Análisis normativa y casos internacionales, contrato de consultoría con Gómez Consultores, Bogotá D.C. Noviembre de 2012.

- [7]. COLOMBIA. Agencia Nacional del Espectro. *Modelos y medidas orientadas a la flexibilización de la gestión de espectro radioeléctrico*. Contrato No. 087/2012 con UT Bluenote – Tovarfajardo, Bogotá D.C. 2012.
- [8]. COLOMBIA. Agencia Nacional del Espectro. *Propuesta para medir el uso eficiente del espectro radioeléctrico para sistemas punto a punto con visibilidad directa en el servicio fijo*. Subdirección de gestión y planeación técnica de espectro, Bogotá D.C. Diciembre de 2016.
- [9]. COLOMBIA. Congreso de la República. *Decreto 1078. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones*. Diario Oficial No. 49.523 del 26 de mayo de 2015. p. 1-172. Bogotá, D.C.
- [10]. COLOMBIA. Congreso de la República. *Decreto 2573. Por el cual se establecen los lineamientos generales de la Estrategia de Gobierno en Línea, se reglamenta parcialmente la Ley 1341 de 2009 y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 49.363. del 12 de diciembre de 2014. Bogotá, D.C.
- [11]. COLOMBIA. Congreso de la República. *Decreto 2618. Por el cual se modifica la estructura del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 48.647 del 17 de diciembre de 2012. p. 1-35. Bogotá, D.C.
- [12]. COLOMBIA. Congreso de la República. *Ley 1341. Por la cual se definen principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones -TIC-, se crea la Agencia Nacional del Espectro y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 47.426 del 30 de julio de 2009. p. 1-34. Bogotá, D.C.

- [13]. COLOMBIA. Congreso de la República. *Ley 1753. Por el cual se expide el Plan Nacional del Desarrollo 2014 – 2018 “Todos por un nuevo país”*. Diario Oficial No. 49.538 del 09 de junio de 2015. p. 1-114. Bogotá, D.C.
- [14]. ELECTRÓNICA DIGITAL. *Modulación digital: FSK-PSK-QAM*. Disponible en: <https://www.electronicafacil.net/tutoriales/MODULACION-DIGITAL-FSK-PSK-QAM.php>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.
- [15]. ERICSSON. *Ericsson Mobility Report*. Junio 2017. Estocolmo, Suecia. Disponible en: <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2017/ericsson-mobility-report-june-2017.pdf>. Fecha de consulta: 24 de junio de 2018.
- [16]. ESPAÑA BOQUERA, María Carmen. *Servicios Avanzados de telecomunicación*. Ed. Díaz de Santos S.A. España. 2003. 780 págs.
- [17]. ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA. Commerce Spectrum Management Advisory Committee. *Definitions of Efficiency in Spectrum Use*. Working Group 1. 1 de octubre de 2008. Disponible en: <https://www.ntia.doc.gov/report/2008/definitions-efficiency-spectrum-use>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.
- [18]. ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA. Federal Communications Commission. *Report of the Spectrum Efficiency Working Group*. Spectrum Policy Task Force. 15 de noviembre de 2012. Disponible en: https://transition.fcc.gov/sptf/files/SEWGFfinalReport_1.pdf. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.
- [19]. ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA. U.S. Department of Commerce. *Plan to Identify and Implement Incentives that Promote More Efficient and Effective Use of Spectrum*. 2008. Disponible en: https://www.ntia.doc.gov/legacy/osmhome/reports/Incentives_Plan.pdf. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.
- [20]. EVELIUX. *Modelo de un sistema de comunicaciones*. En: Artículos sobre redes, telecomunicaciones y tecnologías de la información. Disponible en:

- <http://www.eveliux.com/mx/Modelo-de-un-sistema-de-comunicaciones.html>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.
- [21]. HAYKIN, Simón. *Sistemas electrónicos de comunicación*. Primera edición. Ed. Limusa Wiley. 2002. 816 págs.
- [22]. MÉXICO. Instituto Federal de Telecomunicaciones. *El espectro radioeléctrico en México. Estudio y acciones - Más y Mejor Espectro para Banda Ancha*. Unidad de Espectro Radioeléctrico. Ciudad de México. 2013. Disponible en: <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/espectro-radioelectrico/el-espectro-radioel-ctrico-en-mexico.estudio-y-acciones-final-consulta.pdf>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.
- [23]. MÉXICO. Instituto Federal de Telecomunicaciones. *Estudio de métricas de eficiencia espectral*. Informe de consultoría con Analysys Mason Limited. Ciudad de México. 3 de noviembre de 2015. Disponible en: <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/espectro-radioelectrico/el-espectro-radioel-ctrico-en-mexico.estudio-y-acciones-final-consulta.pdf>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.
- [24]. MÉXICO. Instituto Federal de Telecomunicaciones. *Medición de la eficiencia espectral – Definiciones y consideraciones a observar para su aplicación en México*. Dirección de ingeniería y tecnología. Unidad de espectro radioeléctrico. México D.F. Diciembre de 2018. Disponible en: <http://www.ift.org.mx/industria/consultas-publicas/consulta-publica-de-integracion-acerca-de-los-elementos-valorarse-en-el-desarrollo-de-las-metricas>. Fecha de consulta: 11 de marzo de 2019.
- [25]. PERÚ. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. *Informe No. 519-2018-MTC/25 que sustenta el proyecto normativo para modificación de la Norma de Metas de Uso de Espectro Radioeléctrico de Servicios Públicos de Telecomunicaciones*. Lima, 09 de noviembre de 2018. Disponible en: http://portal.mtc.gob.pe/comunicaciones/regulacion_internacional/regulacio

n/proy%20normativos/INF_519-2018-MTC-26.pdf. Fecha de consulta: 11 de marzo de 2019.

- [26]. PERÚ. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. *Proyecto normativo para modificación de la Norma de Metas de Uso de Espectro Radioeléctrico de Servicios Públicos de Telecomunicaciones*. Lima, 21 de noviembre de 2018. Disponible en: http://portal.mtc.gob.pe/comunicaciones/regulacion_internacional/regulacion/proy%20normativos/RM_912-2018-MTC-01.03.pdf. Fecha de consulta: 11 de marzo de 2019.
- [27]. PERÚ. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. *Resolución Ministerial No. 87-2002-MTC/15.03. Norma de Metas de Uso de Espectro Radioeléctrico de Servicios Públicos de Telecomunicaciones*. Lima, 6 de febrero de 2002. Disponible en: <https://portal.mtc.gob.pe/comunicaciones/concesiones/normas/legales/documentos/normas/normas.pdf>. Fecha de consulta: 11 de marzo de 2019.
- [28]. UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Manual de Gestión Nacional de Espectro*. Oficina de Radiocomunicaciones. Edición 2015. Disponible en: <https://www.itu.int/pub/R-HDB-21/es>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.
- [29]. UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Manual de Gestión Nacional de Espectro*. Oficina de Radiocomunicaciones. Edición 2005. Disponible en: <https://www.itu.int/pub/R-HDB-21-2005/es>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.
- [30]. UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Manual de Gestión Nacional de Espectro*. Oficina de Radiocomunicaciones. Edición 1995. Disponible en: <https://www.itu.int/pub/R-HDB-21-1995/es>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.
- [31]. UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Recomendación UIT-R SM.1046-3. Definición de la eficacia en la utilización del espectro por*

un sistema de radiocomunicaciones. Oficina de Radiocomunicaciones. Aprobado septiembre de 2017. Disponible en: <http://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1046/en>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

[32]. UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Recomendación UIT-R SM. 1271-0. Utilización eficaz del espectro empleando métodos probabilísticos.* Oficina de Radiocomunicaciones. Aprobado 24 de octubre de 1997. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1271-0-199710-1/en>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

[33]. UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Recomendación UIT-R SM. 856-1. Nuevas técnicas y sistemas eficaces desde el punto de vista del espectro.* Oficina de Radiocomunicaciones. Aprobado marzo de 1997. Disponible en: <http://www.itu.int/rec/R-REC-SM.856/en>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.

[34]. UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Recomendación UIT-R SM. 1599-1. Determinación de la distribución geográfica y de las frecuencias del factor de utilización del espectro a efectos de planificación de frecuencias.* Oficina de Radiocomunicaciones. Aprobado 10 de febrero de 2007. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1599-1-200702-1/en>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2018.