

RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SITIO DE CALIBRACIÓN DE ANTENAS DEL CENAM (CALTS-CENAM)

Victoria Molina L., Israel García R.
Laboratorios de Campos Electromagnéticos y de Antenas, Centro Nacional de Metrología,
km 4.5 carr.a los Cués, El Marqués, Qro.
Tel: 01 442 2110500, Fax: 01 442 2110548, E-mail: vmolina@cenam.mx

Resumen. El sitio de calibración de antenas del CENAM (CALTS-CENAM) está siendo caracterizado para ser empleado como un sitio de referencia nacional, para lo cual es preciso medir la atenuación de sitio normalizada (ASN), parámetro que a su vez depende, en cierta medida de la conductividad eléctrica del plano de tierra. En este artículo se describe el problema de medición que representó medir la resistividad eléctrica a una muestra de 1800 m^2 con 3,6 mm de espesor empleando la técnica de van der Pauw. En nuestro conocimiento, no existe alguna otra referencia que trate sobre la medición de resistividad eléctrica en muestras de tan grandes dimensiones, y ésta es la principal aportación del trabajo realizado.

1. INTRODUCCIÓN

Teniendo en consideración las características de construcción del CALTS-CENAM tratadas con detalle en [1] se plantea el siguiente objetivo.

Es necesario asegurarse que toda la plataforma metálica que constituye el CALTS-CENAM, tal como fue construida e instalada en el CENAM, presente una resistividad del orden de $1,7 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$, que es el valor asignado para el acero negro. Estos resultados permitirán predecir los valores de ASN que se esperan del CALTS-CENAM [2].

El problema que se plantea tiene las siguientes características: Será necesario medir la resistividad de una plataforma metálica rectangular de 1800 m^2 , que no está construida en una sola pieza sino por 5 cuerpos unidos entre sí por varios conectores flexibles de acero inoxidable, estañados en las zonas de ensamble [2]. Cada cuerpo a su vez está construido por tramos de lámina, cuyas dimensiones aproximadas son de $91 \text{ cm} \times 2,40 \text{ m}$, soldados tanto a la rejilla Irving, como entre segmentos adyacentes por más de 40 puntos de soldadura.

2. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DE VAN DER PAUW

La técnica de van der Pauw será empleada en la medición de resistividad del CALTS-CENAM. Se trata de una técnica a cuatro hilos en la que, el espesor de la muestra es la única dimensión física que se requiere para aplicarla. Esta técnica se basa en mediciones de resistencia de la muestra y tiene la gran ventaja que es independiente de la forma que tenga la muestra de material que se desea medir. Para estimar la resistividad en una lámina de

material que tiene una forma como la que se ilustra en la Figura 1, se emplea la ecuación (1) [2-3]:

$$e \left(-\frac{\pi d}{\rho} R_{12,43} \right) + e \left(-\frac{\pi d}{\rho} R_{23,14} \right) = 1 \quad (1)$$

donde d es el espesor de la lámina del material de muestra y ρ la resistividad de esta muestra. Si se conocen d y las resistencias $R_{43,21}$ y $R_{32,14}$, entonces la ecuación (1) establece que la resistividad, ρ , es la única cantidad desconocida.

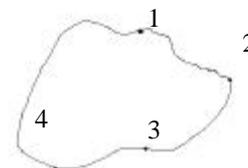


Figura 1. Muestra de material laminar uniforme, con cuatro contactos en la periferia del material

El valor de la resistencia $R_{12,43}$ se puede estimar aplicando en los contactos 1 y 2 una corriente conocida y midiendo en las terminales 4 y 3 la tensión generada por esa corriente. Análogamente, la resistencia $R_{23,14}$ se estima aplicando en los contactos 2 y 3 una corriente conocida, y midiendo la tensión generada en las terminales 1 y 4. Con estos dos valores de resistencias puede estimarse una resistividad de la muestra, digamos ρ_a . Luego, para la misma muestra puede considerarse otra configuración mediante la cual se estimen otros dos valores de resistencias, $R_{34,21}$ y $R_{41,32}$ a partir de los cuales se obtiene otro valor de resistividad, digamos ρ_b . Así la resistividad de la muestra en cuestión es el valor promedio de las resistividades ρ_a y ρ_b [2-3].

2.1 Muestras con un eje de simetría

Cuando la medición de resistividad se realiza empleando la técnica de van der Pauw en muestras que presentan al menos un eje de simetría, el procedimiento se simplifica y sólo es necesario realizar una medición de resistencia [2].

3. MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DEL CALTS-CENAM

Sólo cuatro requisitos deben ser considerados para poder aplicar la técnica de van der Pauw [2]: 1). La muestra debe tener una forma plana de espesor constante; 2). La muestra no debe tener ningún hoyo aislado; 3). La muestra debe ser homogénea e isotrópica y 4). Se requieren cuatro contactos en la muestra que deben estar en los bordes; el área de éstos debe ser un orden de magnitud menor que el área de la muestra completa.

Para considerar al plano de tierra metálico como una muestra homogénea e isotrópica de espesor constante, fue necesario asegurarse de que no hubiesen hoyos aislados significativos con respecto al tamaño de la plataforma, razón por lo cual se instaló el plato metálico del tornamesa y se aseguraron los contactos eléctricos entre esta pieza y el resto de la plataforma metálica empleando escobillas. Los huecos de las entrecalles fueron tapados, y las áreas de los espacios que existen entre los puntos de soldadura se consideran despreciables cuando se les compara con el área total de la plataforma metálica. También, fue necesario flotar el plano metálico desconectando todos los puntos de unión a tierra física [2]. La geometría del plano metálico simplifica en gran medida la aplicación de esta técnica; se seleccionaron los bordes de las cuatro esquinas para realizar los cuatro contactos eléctricos, cuya área es significativamente más pequeña que el área total del plano de tierra.

En cuanto a las mediciones que se realizan al aplicar la técnica de van der Pauw, es necesario medir la resistencia de la lámina empleando al menos dos configuraciones diferentes. En cada configuración se alimenta una corriente al plano metálico y luego se mide la tensión generada por esa corriente. Para realizar la conexión entre los instrumentos y el plano de tierra, se emplearon cables de 50 m de longitud, de un calibre adecuado para soportar hasta 60 A de corriente [2].

Para disminuir las fuentes de error e incertidumbre en la medición de resistividad se procedió de la siguiente manera. En las esquinas del plano de tierra se soldaron trozos de solera de acero inoxidable con el fin de lograr contactos eléctricos seguros; para conectar los cables al plano de tierra se emplearon tornillos nuevos de acero inoxidable; para conectar los cables a los equipos de medición se emplearon zapatas de cobre. Se emplearon, así mismo instrumentos de medición calibrados con trazabilidad a patrones nacionales.

3.1 Aplicación del procedimiento general en la técnica de van der Pauw

3.1.1 Configuraciones básicas

Para estimar la resistividad eléctrica, ρ , del CALTS-CENAM, haciendo uso de la técnica de van der Pauw, es necesario obtener dos valores de resistividad, ρ_a y ρ_b . Las configuraciones 2-A y 2-C, así como 2-B y 2-D fueron empleadas para estimar ρ_a y ρ_b respectivamente.

3.1.2. Cancelación de fem's térmicas

Las configuraciones de las Figuras 2-A a 2-D serían suficientes para estimar un valor promedio de resistividad, sin embargo, para cancelar las fem's térmicas, se realiza una medición adicional en cada configuración invirtiendo la fuente de corriente sin alterar las conexiones realizadas al plano metálico. Para cada configuración de la Figura 2 se realizaron 10 mediciones de tensión, con la previsión de que antes de cualquier medición, se ajustara a cero el nanovóltmetro eliminando así el corrimiento de tensión que pudiera ser originado tanto por la longitud de los cables empleados, como por las pequeñas tensiones ocasionadas por el efecto de termopar de los contactos eléctricos [2].

3.2 Aplicación del procedimiento para muestras con un eje de simetría

Para aplicar el método para muestras con un eje de simetría al CALTS-CENAM se definieron las configuraciones de la Figura 3, donde el eje de simetría es la línea que va del punto M al punto O. También en este caso en cada configuración mostrada en la Figura 3, se realizó una medición adicional invirtiendo la fuente de corriente para cancelar las fem's térmicas [2]. Los resultados obtenidos se analizarán más adelante.

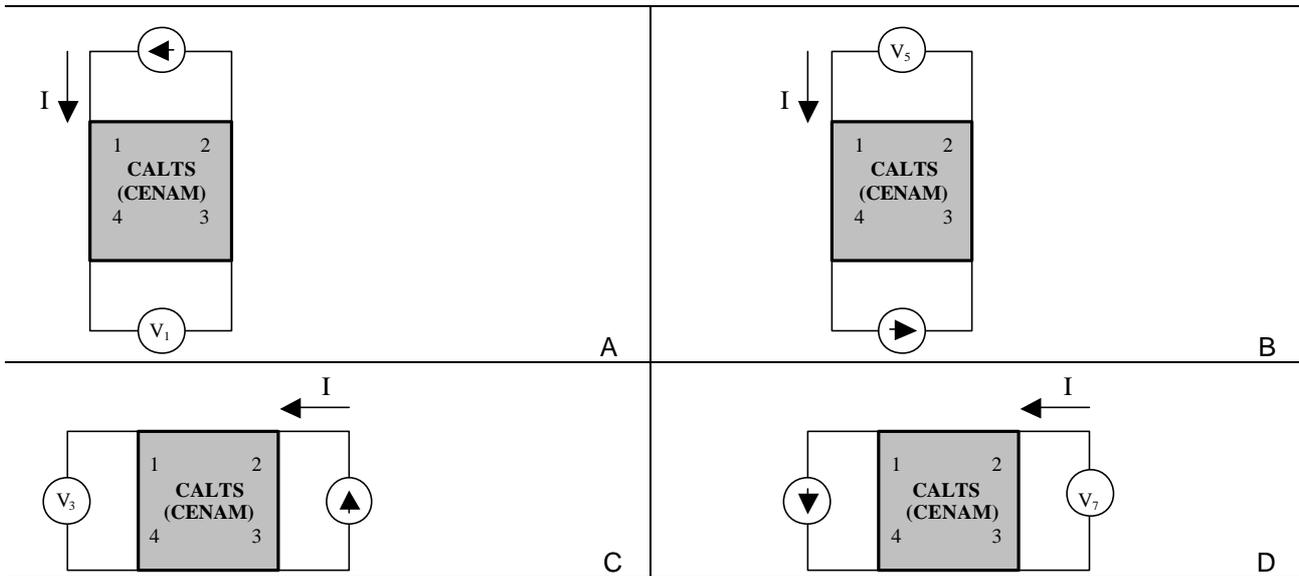


Figura 2. Configuraciones para medir r en una muestra

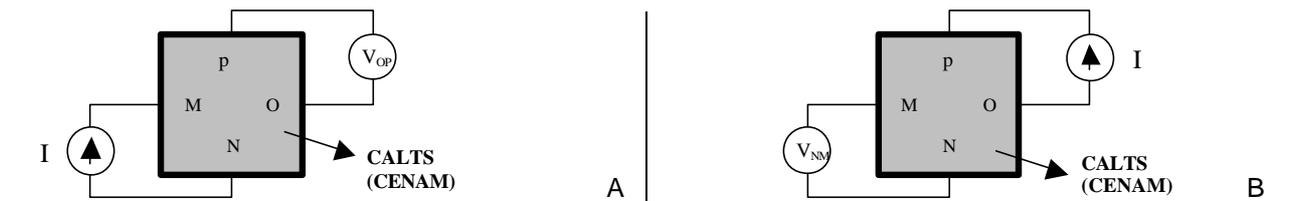


Figura 3. Configuraciones para medir r cuando la muestra tiene un eje de simetría

3.3 Sistema de medición

El sistema de medición empleado para realizar las mediciones de resistividad se basa en el uso de una fuente de corriente y un nanovóltmetro. Para conocer con exactitud el valor entregado por la fuente de corriente se empleó un derivador de $1\text{ m}\Omega$. Para asegurar la calidad de las mediciones, el derivador fue calibrado para $1\text{ m}\Omega$ y el nanovóltmetro fue calibrado en las escalas de 1 mV y 10 mV . La calibración de estos instrumentos proporciona trazabilidad a los patrones nacionales de tensión y de resistencia [2]. En las figuras 2 y 3 se ha obviado la representación del derivador.

La medición del espesor de la lámina se realizó empleando un vernier calibrado [2].

4. ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE

Siguiendo las recomendaciones en [4] se realizó primeramente la estimación de incertidumbre en la medición del espesor de lámina; en este caso las principales componentes de incertidumbre fueron la dispersión de los datos y la resolución del

instrumento [2]. Posteriormente, fue estimada la incertidumbre del valor de la corriente empleado en todas las configuraciones de medición. En este caso, las principales componentes de incertidumbre fueron: la dispersión de las mediciones, el error del nanovóltmetro a 1 mV y la incertidumbre de este error, la resolución del nanovóltmetro, el error del derivador y su incertidumbre asociada.

Para cada serie de mediciones de tensión realizadas en cada una de las configuraciones, se estimó la incertidumbre correspondiente. En estos casos las principales componentes fueron: el error del nanovóltmetro a 1 mV y 10 mV y su incertidumbre asociada; la resolución del instrumento a 10 mV y a 1 mV ; así como la dispersión de los resultados. Todas estas componentes de incertidumbre se consideraron al momento de estimar el valor de resistividad eléctrica del CALTS-CENAM [2].

5. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

Como criterio de validación de los resultados que se obtengan aplicando el método general de van der

Pauw se considera que la diferencia entre ambos valores de resistividad, ρ_a y ρ_b , no debe exceder el 10% [2].

Adicionalmente, también con el fin de validar la aplicación de la técnica de van der Pauw al CALTS-CENAM, se aplicó esta técnica a dos muestras de acero negro de 91 cm x 2,40 m (muestra 1) y de 24 cm x 91 cm (muestra 2). Las mediciones se realizaron dentro del laboratorio y empleando los mismos cables utilizados durante la medición en el CALTS-CENAM. Los resultados de resistividad eléctrica obtenidos para cada muestra se discuten a continuación [2].

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

6.1 Resultados Obtenidos

La Tabla 1 muestra los resultados de resistividad obtenidos tanto para el CALTS-CENAM como para las muestras 1 y 2. En el caso del CALTS-CENAM se muestran los resultados que se obtuvieron al aplicar el método general y el método para ejes de simetría. Con fines de comparación, en la Tabla 1 también se proporcionan los valores de resistividad eléctrica del acero negro, del acero inoxidable, del acero 1020 y del zinc [2]. De la tabla anterior se puede analizar lo siguiente. Los resultados de resistividad obtenidos, tanto con el método general, como con el método en el que se hace uso de un eje de simetría, son mayores que la resistividad que se asigna al acero negro en la literatura. Este era el resultado esperado, la resistividad del CALTS-CENAM es mayor que la del acero negro puesto que este resultado refleja sus propias características de construcción: principalmente una gran cantidad de uniones mecánicas y eléctricas. Por otra parte, también debe considerarse que el CALTS-CENAM está permanentemente expuesto a la variación de las condiciones ambientales; en nuestro caso particular, los resultados de resistividad que se obtuvieron son el resultado de aplicar el proceso de medición a diferentes horas del día, por lo que consideramos que la variación en el valor de resistividad debida a los cambios de temperatura

ambiente, está reflejada en la dispersión obtenida en los resultados.

El criterio de validación del 10% se cumple satisfactoriamente para los resultados obtenidos con ambos métodos, el método general y el de simetría. Puesto que en el método general no se asume ninguna simetría en la muestra, se obtiene mayor información sobre ésta al realizar mediciones en 4 configuraciones distintas; en cambio, a costa de suponer una simetría perfecta en la muestra, el método de simetría se simplifica y sólo es necesario realizar mediciones en una única configuración. Por esta razón consideramos que el resultado más cercano al valor verdadero de resistividad es el que se obtiene por el método general; el método de simetría puede emplearse para obtener una rápida estimación. Por otro lado cabe aclarar que debido a que la estimación de resistividad depende de la medición del espesor de la muestra, la incertidumbre por dispersión en las mediciones de resistencia, que se hacen al aplicar cada uno de estos métodos, queda oscurecida por resolución del vernier empleado para medir el espesor de la muestra; por esta razón se obtiene la misma incertidumbre en ambos métodos [2].

Con respecto a las muestras 1 y 2, éstas presentan una resistividad más baja que la obtenida para el CALTS-CENAM, esto se debe a que las muestras 1 y 2 no contienen uniones mecánicas.

6.2 Impacto de la resistividad medida en el módulo del coeficiente de reflexión en polarización horizontal y vertical

En el proceso de caracterización será necesario medir la ASN que depende del coeficiente de reflexión, el cual a su vez, depende de la conductividad eléctrica del plano metálico. Por lo que la evaluación de los resultados de resistividad obtenidos para el CALTS-CENAM podrá realizarse al estudiar su impacto en los valores del coeficiente de reflexión.

	Método general	Método de simetría	Placa de 91 cm x 24 cm	Placa de 91 cm x 240 cm	Acero Negro	Acero Inoxidable	Acero 1020	Zinc
ρ	$4,03 \times 10^{-7}$	$4,48 \times 10^{-7}$	$1,21 \times 10^{-7}$	$1,35 \times 10^{-7}$	$1,70 \times 10^{-7}$	$1,00 \times 10^{-7}$	$1,74 \times 10^{-7}$	$5,90 \times 10^{-8}$
$\rho + l$	$4,09 \times 10^{-7}$	$4,55 \times 10^{-7}$	$1,22 \times 10^{-7}$	$1,37 \times 10^{-7}$	Nota: En la literatura no se informa sobre la incertidumbre de estos valores.			
$\rho - l$	$3,97 \times 10^{-7}$	$4,41 \times 10^{-7}$	$1,20 \times 10^{-7}$	$1,33 \times 10^{-7}$				

Tabla 1. Comparación de resultados, donde l se refiere a la incertidumbre

Este análisis se realiza para polarización horizontal y vertical de las antenas empleadas en la medición de ASN, por lo cual se tiene un coeficiente de reflexión para polarización horizontal y un coeficiente de reflexión para polarización vertical [5].

El valor de conductividad eléctrica del CALTS-CENAM se estima de la siguiente manera [2]:

$$\sigma = 1/\rho \quad (2)$$

$$\sigma = 1/(4,03 \times 10^{-7} \Omega m) = 2,48 \times 10^6 [1/\Omega m] \quad (3)$$

con este valor de conductividad se estimó el módulo del coeficiente de reflexión complejo en polarización horizontal, ρ_H [5]:

$$\Gamma_H = \frac{\text{Sen} \gamma - (K - j60\lambda\sigma - \text{Cos}^2 \gamma)^{1/2}}{\text{Sen} \gamma + (K - j60\lambda\sigma - \text{Cos}^2 \gamma)^{1/2}} = \rho_H + j\phi_H \quad (4)$$

El módulo del coeficiente de reflexión complejo para polarización vertical, ρ_V , se obtiene por un procedimiento análogo [2, 5].

Considerando el proceso de medición de la ASN, es preciso hacer notar que el coeficiente de reflexión, ya sea que se trate de polarización horizontal o vertical, depende de la constante dieléctrica del medio de propagación (K), de la longitud de onda de la frecuencia de prueba (λ), de la conductividad eléctrica del CALTS-CENAM (σ) y del ángulo de incidencia (γ). Este último depende a su vez de la altura de la antena receptora (h_2), ya que la altura de la antena transmisora (h_1) se mantiene fija en el proceso de medición de la ASN [5]. Por lo tanto, como la altura de la antena receptora se varía de 1 m a 4 m en pasos de 10 cm, es posible obtener 30 valores diferentes del coeficiente de reflexión, de los cuales se selecciona el valor máximo para cada frecuencia y cada distancia de medición; con estos valores seleccionados se espera obtener los mejores resultados para la ASN. En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos del módulo del coeficiente de reflexión para polarización horizontal y vertical. En esta figura se podrá observar que los resultados obtenidos para polarización horizontal divergen de manera más suave que los resultados para polarización vertical. Por ejemplo si se comparan los valores obtenidos en 1 GHz, a 3 m y a 30 m, se puede apreciar entre ellos una diferencia de unas 200 ppm aproximadamente. Tomando los mismos puntos de comparación, para polarización

vertical, se puede observar una diferencia de 1000 ppm. La norma permite una desviación máxima de ± 4 dB alrededor del valor ideal de ASN esperado en ambas polarizaciones por lo que los resultados obtenidos nos indican que, la incertidumbre que puede introducir el valor de conductividad eléctrica medido en la estimación y medición de cada valor de ASN es despreciable. Sin embargo, debido a que este sitio de pruebas será empleado como una referencia nacional, se invirtió mucho esfuerzo en diseñarlo y construirlo de manera tal que su conductividad eléctrica fuera alta y su ASN lo más lo más cercano al valor ideal [5].

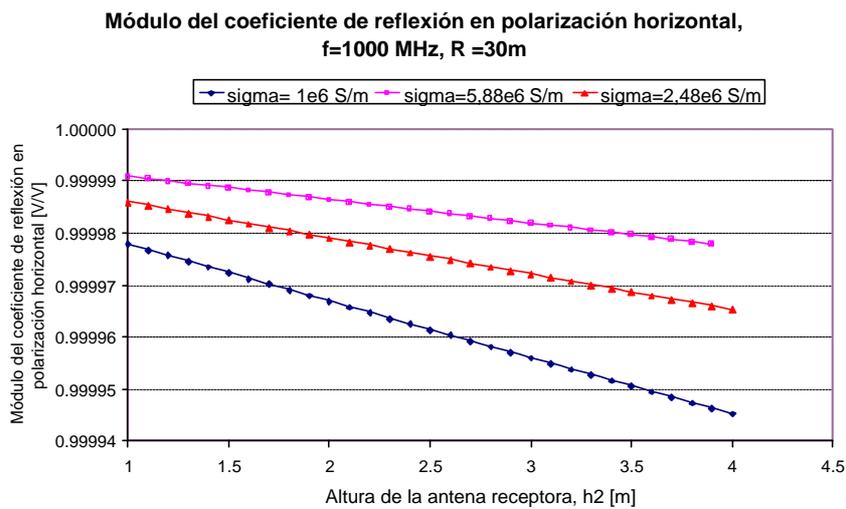
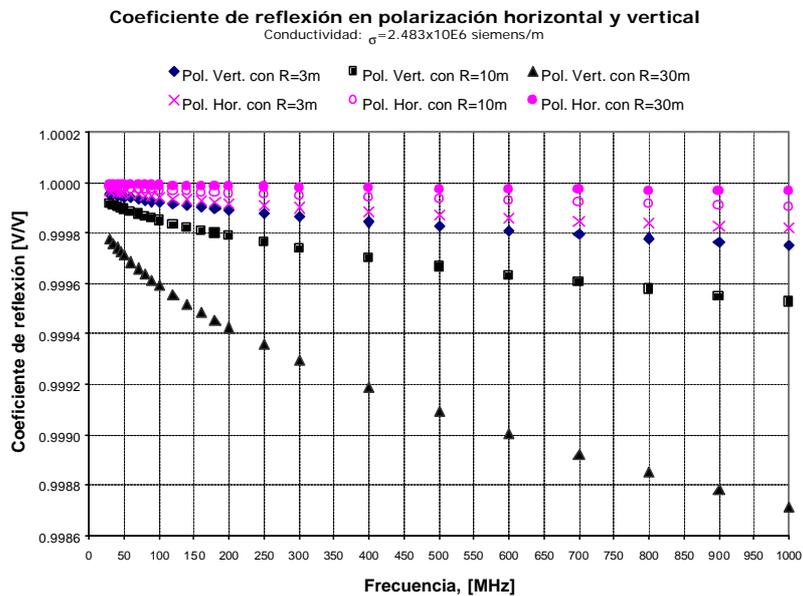
Otra forma en la que se comprobó que los resultados de conductividad eléctrica medidos fueron aceptables para el CALTS-CENAM, consistió en estimar el módulo del coeficiente de reflexión con los valores de conductividad que la literatura reporta para el acero negro y el acero inoxidable; después, los resultados obtenidos se compararon con el coeficiente de reflexión estimado empleando la conductividad de $2,48 \times 10^6 [1/\Omega m]$.

En el caso de polarización horizontal, la diferencia máxima entre el coeficiente de reflexión del acero negro y del CALTS-CENAM, es de 10 ppm aproximadamente (Figura 5). De manera análoga en polarización vertical se obtuvo una diferencia máxima de 1000 ppm aproximadamente [2]. Estas diferencias representan una fuente de incertidumbre despreciable al momento de estimar la NSA como se ha mencionado anteriormente.

7. CONCLUSIONES

La importancia del trabajo realizado radica en el hecho de que el CALTS-CENAM debe ser caracterizado con el fin de determinar su aceptación como sitio de referencia nacional. Parte de esta caracterización implica la medición de resistividad, puesto que los efectos de su construcción y las condiciones climáticas influyen en su valor de resistividad.

Los resultados obtenidos quedaron validados, se consideran aceptables y dentro de lo esperado, por lo cual se tiene confianza en el diseño y construcción del CALTS-CENAM. Se espera que en el proceso de medición de ASN se obtengan resultados de acuerdo con lo establecido en [5].



REFERENCIAS

[1] Victoria Molina L. e Israel García R., "Características de diseño y construcción del Sitio de Calibración a campo abierto del CENAM (CALTS-CENAM)", Memorias del Simposio de Metrología, CENAM. Querétaro, Qro. Octubre 2004.

[2] Victoria Molina López e Israel García Ruiz, "Informe técnico: Resistividad eléctrica del sitio de calibración de antenas del CENAM (CALTS-CENAM)". Informe interno, CENAM. Abril, 2004. Próximo a publicarse.

[3] L. J. Van Der Pauw, "A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape", Philips Research Reports, Vol. 13, No. 58, February 1958, pp. 1-9.

[4] Guía BIPM/ISO para la expresión de la incertidumbre en las mediciones, Reporte Técnico CNM-MED-PT-0002. CENAM. Querétaro, México 1994.

[5] CISPR 16-1 "Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Pat 1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus", October 2002.