

## 5. PROCESO DE CARACTERIZACIÓN DE LA CANTERA

### 5.1 PROCESO DE CARACTERIZACIÓN DE LA CANTERA

El procedimiento utilizado para lograr la caracterización de la cantera se muestra en la figura 5.1:

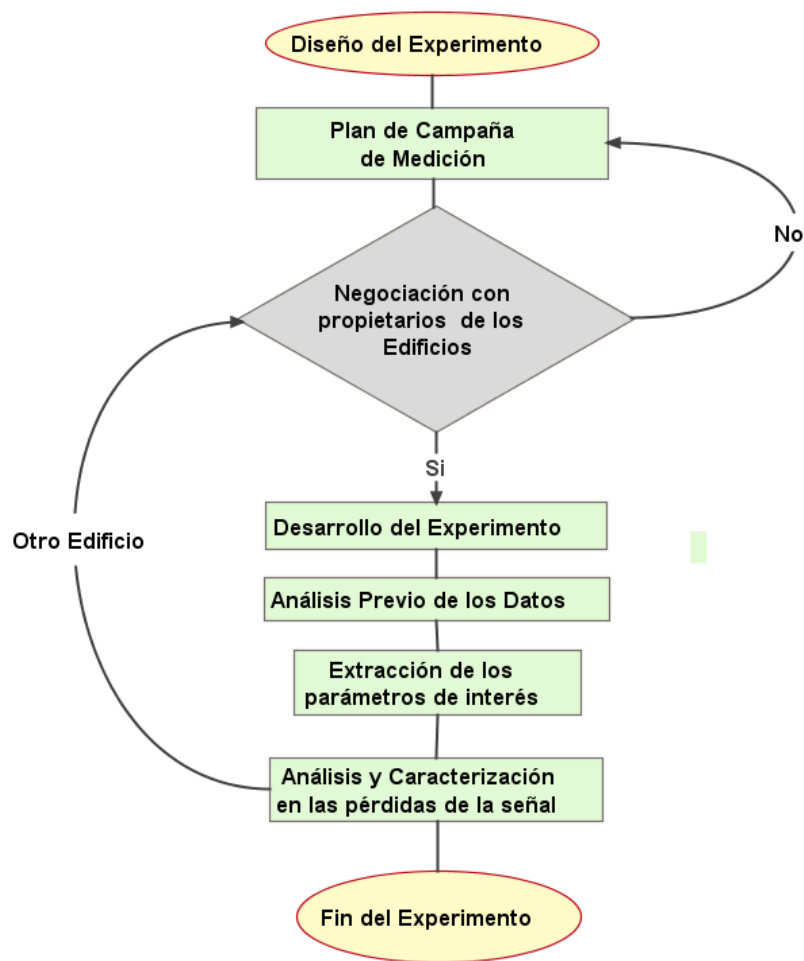


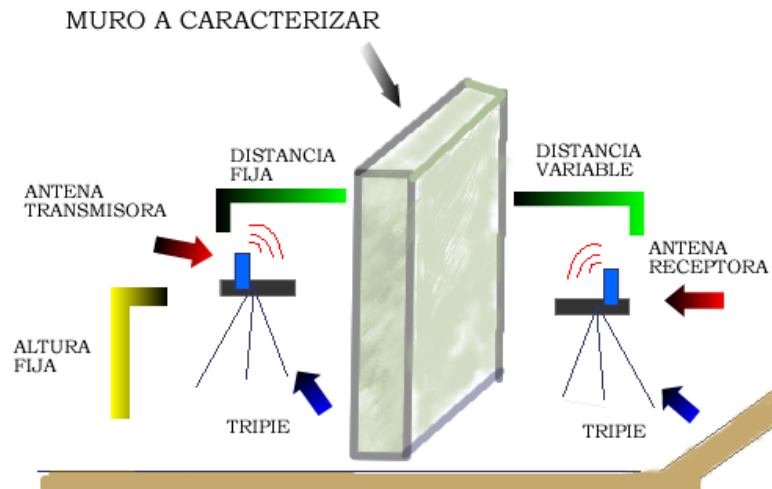
Figura 5.1 Diagrama del proceso experimental.

En este caso caracterización significa realizar mediciones para encontrar las pérdidas de señales de RF atribuidas a la cantera en dos frecuencias comerciales que son 936 MHz y 959 MHz, es decir, los canales 5 y 120 del *downlink* en GSM. Dichas frecuencias, fueron seleccionadas ya que no se encontró actividad de RF en las locaciones donde se realizaron las pruebas que pudieran generar interferencia con las mediciones. La obtención de los datos se realizó a diferentes distancias y bajo condiciones diversas como variar el espesor de la piedra y el ángulo de incidencia.

El Plan de Campaña de Medición (MCP) (ver apéndice A) fue un documento elaborado después de realizar el diseño del experimento y antes de llevar a cabo el mismo. Tiene mucha importancia en el proyecto pues su objetivo era de soporte al momento de solicitar permiso a los propietarios de los inmuebles candidatos a caracterizar. De este modo, la persona que leyera el MCP iba a tener una idea clara y precisa de los que se iba a realizar en todos los aspectos.

Además, en el MCP estaban debidamente planificados y escritos todos los detalles de la medición. En la fase de negociación, las personas encargadas de los edificios fueron contactadas para solicitar permiso para el uso de las instalaciones donde, un seguimiento con las autoridades correspondientes fue muy importante para la agilización del trámite. Tan pronto como se obtuvieron los permisos [ver apéndices B y C], el experimento se llevó a cabo.

El experimento por el cual se logró la caracterización de la cantera se describe a continuación y se ilustra en la figura 5.2.



**Figura 5.2 Montaje del experimento.**

Se instalaron dos antenas, una transmisora y una receptora separadas por el muro de cantera a caracterizar. La distancia de separación de la antena Tx con respecto a la pared era fija para cada experimento, y esta distancia cambiaba para cada construcción. En cuanto a la antena de Rx, la distancia entre ésta y la pared era variable y dependía de las características propias de cada inmueble. La distancia máxima se daba en el momento en que se alcanzaba el nivel del *noise floor* del aparato receptor.

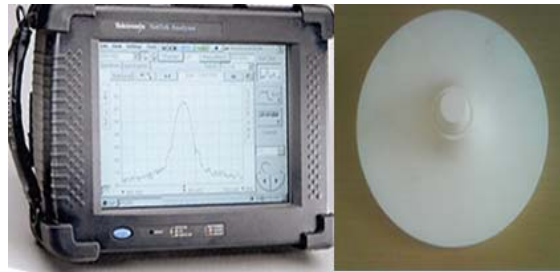
El parámetro más importante para medir era la potencia con la cual la señal llegaba al destino o receptor después de cruzar la construcción de cantera. Para obtener dicha potencia, se obtuvieron muestras con analizador de espectros móvil en puntos al azar en la zona de cobertura de la antena [29].

Un número considerable de muestras se deben obtener para caracterizar el comportamiento de pérdidas en la cantera a las frecuencias de interés.

## 5.2 TOMA DE LECTURAS DE PROPAGACIÓN DE SEÑALES

### 5.2.1 Equipo a Usar

La medición de potencia a 936 MHz y 959 MHz fueron obtenidas utilizando el analizador de espectros Tektronix [31] modelo NetTek YBT 250 y una antena omnidireccional multibanda para interior modelo 741592, con polarización vertical y 2dBi de ganancia, marca Kathrein [18] que se ilustran en la figura 5.3.



**Figura 5.3 Analizador de espectros Tektronix NetTek y antena omnidireccional Kathrein.**

Además de los equipos mencionados anteriormente, se usó un generador de señales modelo HM8134-2 de la marca Hameg [12] así como un amplificador de potencia *UHF* de RF Gain Ltd. [26] con 38 dB de ganancia, 5 watts y un rango de 20 MHz a 1 GHz. El equipo fue interconectado como se ve en la figura 5.4.



**Figura 5.4 Interconexión de equipos.**

El amplificador de potencia se utiliza para aumentar la señal procedente del generador de señales. Una fuente de poder es necesaria para alimentar los equipos, suministrando 28 volts y 2.5 amperes. La antena omnidireccional es conectada a la salida del amplificador de potencia.

### **5.2.2 Lugares de Realización del Experimento**

El experimento se llevo a cabo en las ciudades de Oaxaca y Puebla, regiones donde edificios hechos de cantera se encuentran frecuentemente en sus centros históricos. En Oaxaca las mediciones se obtuvieron en su Palacio Municipal (figura 5.5) así como en el edificio de la Logia Masónica del Estado (figura 5.6).



**Figura 5.5 Palacio Municipal de Oaxaca de Juárez.**



**Figura 5.6 Logia Masónica Benito Juárez.**

Estos dos edificios están hechos de cantera verde. La fachada del palacio municipal fue utilizada para las mediciones, la cual tiene un muro de un metro de ancho. Las muestras fueron obtenidas en la “Plaza de la Danza”, plaza que está justo al costado del Palacio Municipal. Para la Logia Masónica, dos paredes fueron experimentadas, la primera con un ancho de 80 centímetros y la segunda con un metro de espesor. Las muestras fueron recolectadas en el patio interior del edificio así como en la calle anexa a la Logia.

En Puebla, las mediciones fueron hechas en el Museo “Casa del Dean” (figura 5.7) y en el “Ex-Convento de Tecamachalco” (figura 5.8). Ambas construcciones son de cantera gris, característica del estado de Puebla.



**Figura 5.7 Museo "Casa del Dean".**

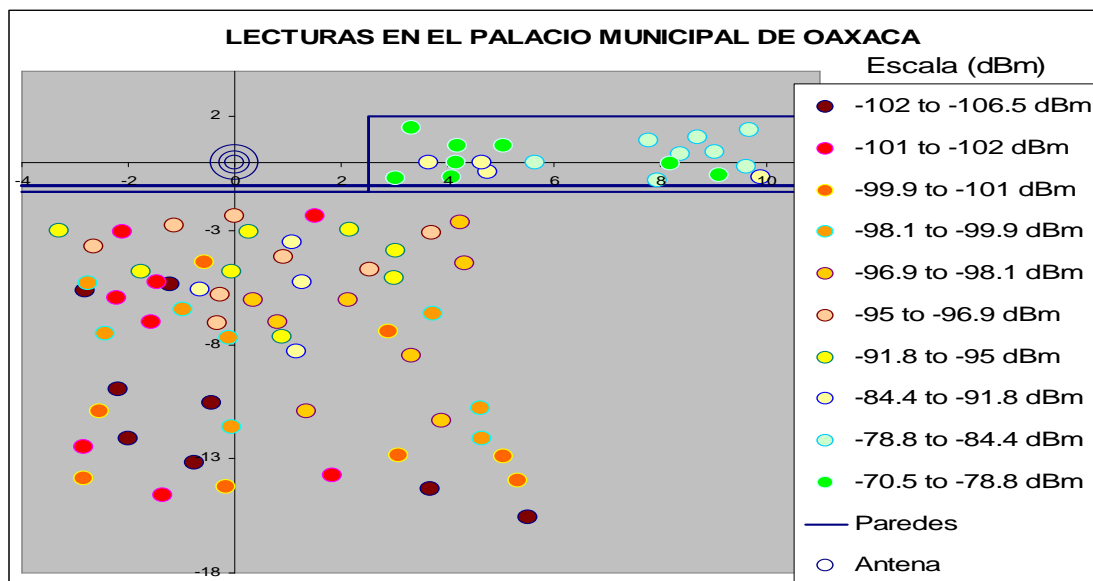


**Figura 5.8 Ex- Convento de Tecamachalco.**

En el museo “Casa del Dean” se utilizó una pared de 70 centímetros y las muestras fueron obtenidas en el interior del mismo museo. Para el “Ex Convento de Tecamachalco” la pared fue de un metro de espesor usando como lugar de las mediciones un patio con espacio abierto en el interior de la construcción.

### 5.2.3 Metodología para la Adquisición de Datos

Las muestras recolectadas en cada uno de los lugares antes mencionados fueron obtenidas con la función promedio del analizador de espectros usando un espacio de tiempo de 15 segundos para sacar lecturas más confiables en cada punto. Las figuras 5.9 a 5.14 muestran los puntos con los datos obtenidos para cada sitio. Para esas figuras, las líneas azules representan las paredes en las construcciones mientras que los círculos en azul es la posición de la antena de transmisión. Cada punto de color indica el nivel de señal recibido en dBm y va de acuerdo a la escala mostrada en cada figura.



**Figura 5.9 Mediciones en el Palacio Municipal de Oaxaca a 936 MHz.**

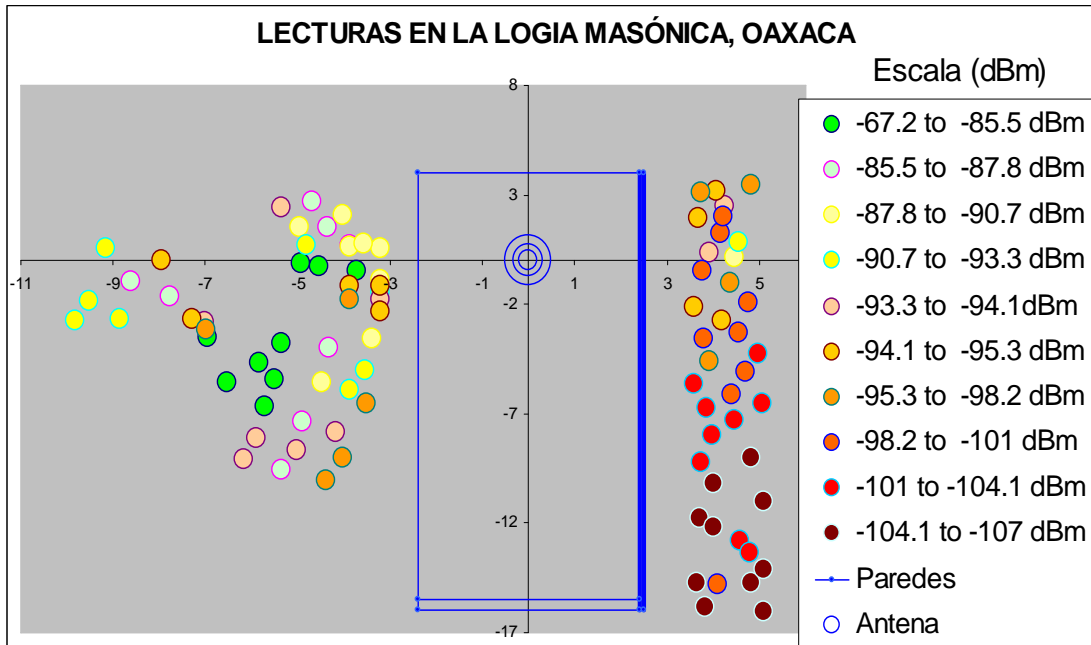


Figura 5.10 Mediciones en la Logia Masónica de Oaxaca a 936 MHz.

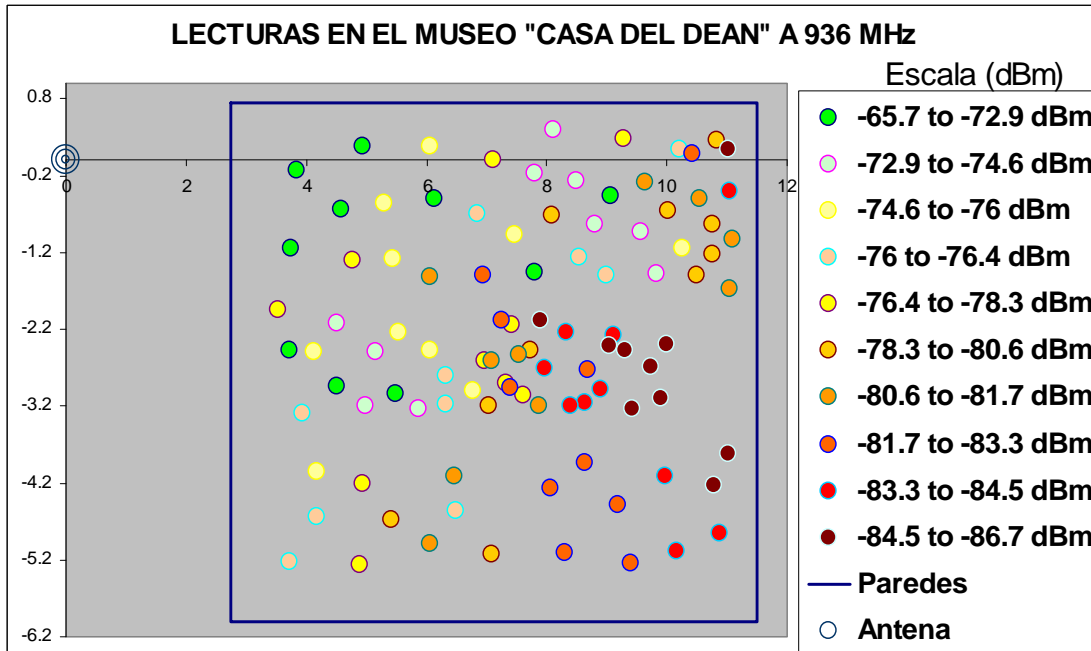


Figura 5.11 Mediciones en el Museo "Casa del Dean", Puebla a 936 MHz.



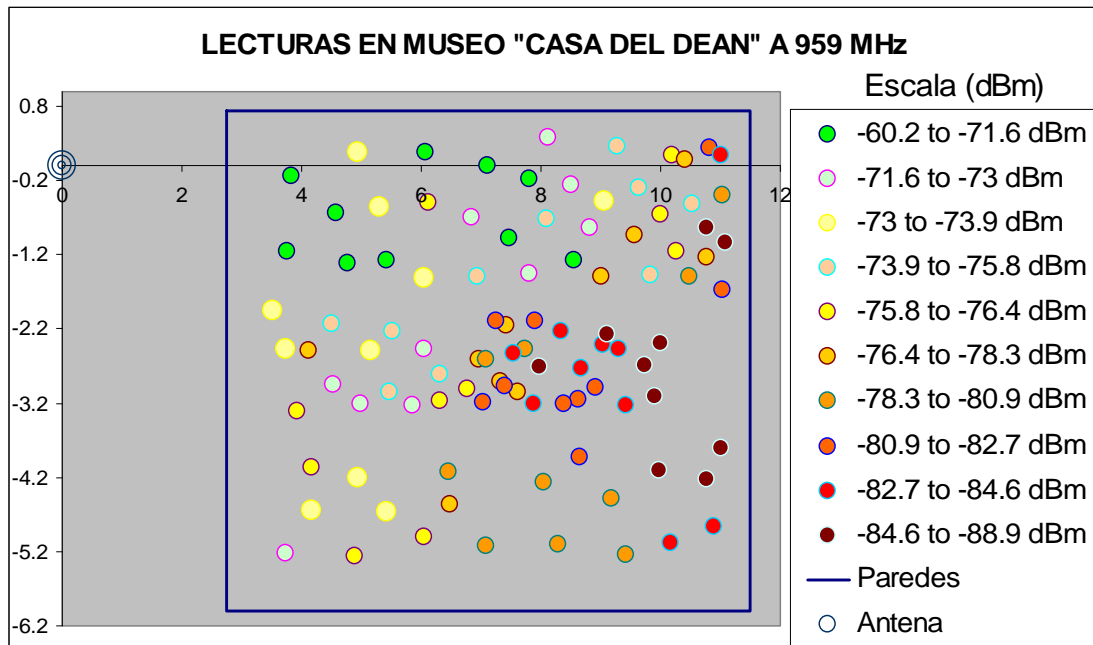


Figura 5.12 Mediciones en el museo “Casa del Dean”, Puebla a 959 MHz.

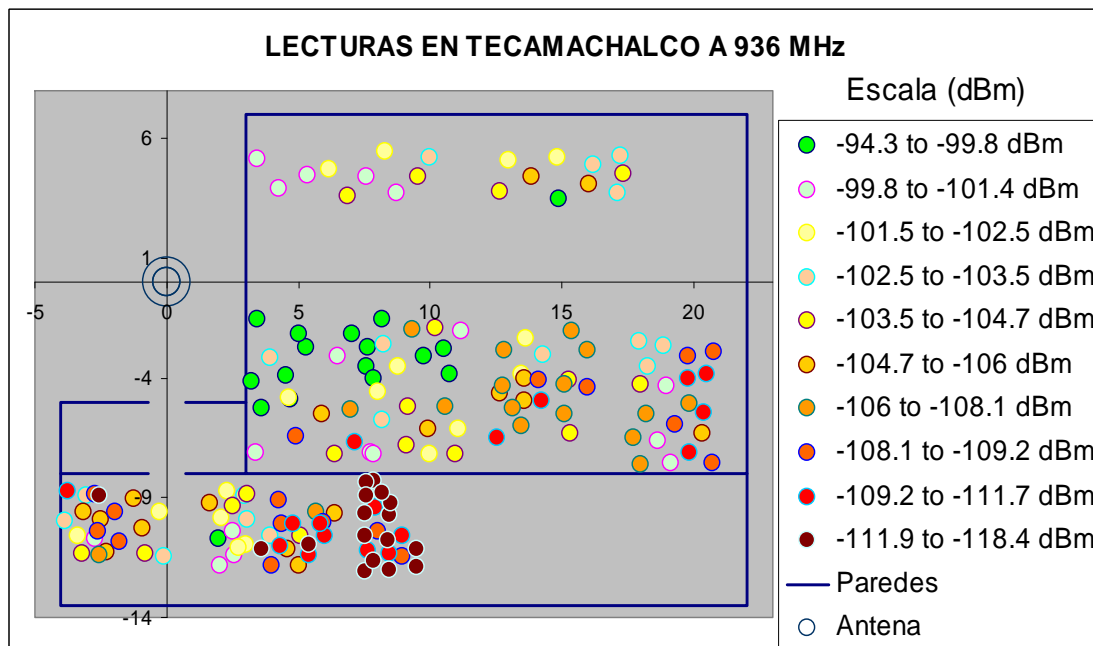
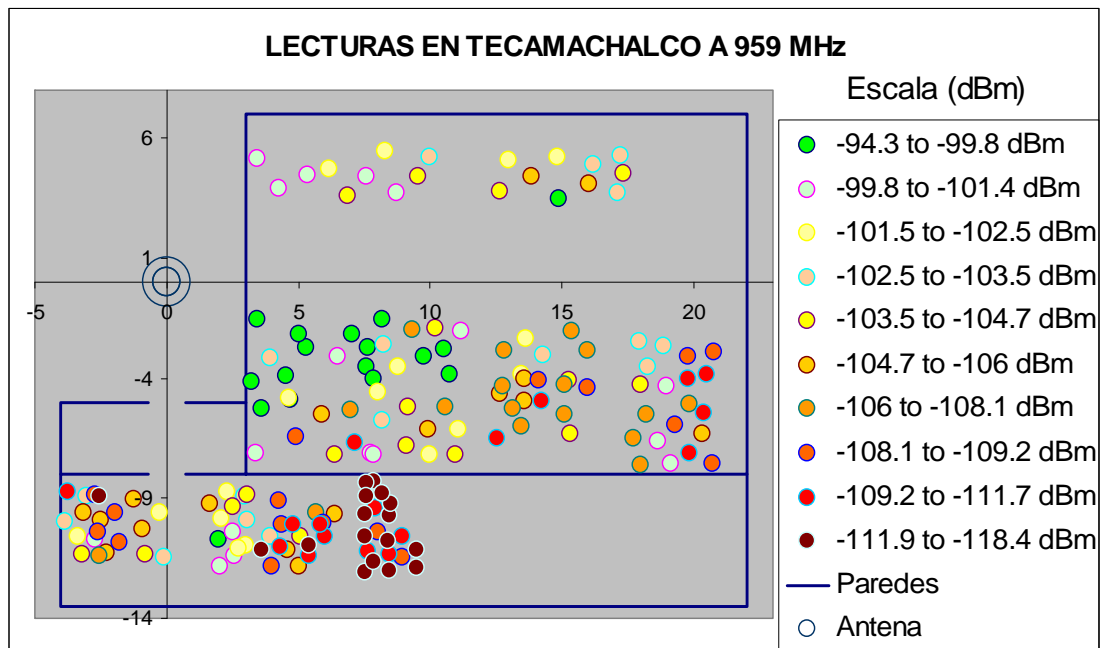


Figura 5.13 Mediciones en el Ex Convento de Tecamachalco, Puebla a 936 MHz.

Finalmente, en el “Ex Convento de Tecamachalco” además de variar la frecuencia, se obtuvieron mediciones cuando la señal atravesaba más de una pared de cantera como se observa en las figuras 5.13 y 5.14.



**Figura 5.14 Mediciones en el Ex Convento de Tecamachalco, Puebla a 959 MHz.**

Se puede observar en las figuras anteriores que la potencia recibida depende de la distancia y principalmente del grueso del muro de cantera. Los puntos rojos son las áreas donde la señal de recepción es baja en contraste de los puntos verdes donde es alta.

## 5.3 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

---

### 5.3.1 Procedimiento Matemático

Una vez que las muestras fueron recolectadas, se puede hacer el análisis de datos para encontrar las pérdidas atribuidas al muro de cantera como se muestra a continuación.

El análisis parte de la ecuación 5.1 que arroja la potencia de recepción del analizador de espectros [28].

$$\text{Ecuación 5.1} \quad P = Pt + Gt - Li + Gr$$

Donde  $P$  representa la potencia de recepción del analizador de espectros en dBm,  $Pt$  es la potencia de transmisión,  $Gt$  es la ganancia de transmisión,  $Li$  es el total de pérdida por ruta por muestra y  $Gr$  representa la ganancia del receptor.

Considerando que  $Gr=0$  ya que al estar trabajando con una antena que es omnidireccional por simplicidad en los cálculos se puede asumir que su ganancia es 0 dBi, reorganizando la ecuación 5.1 y teniendo en cuenta que la ganancia de la antena se puede obtener de su patrón de radiación proporcionado por el fabricante [18] (ver apéndice E) se obtiene:

$$\text{Ecuación 5.2} \quad Li = Pt + Gt - P$$

$$\text{Ecuación 5.3} \quad Li = Pt - Pi + Gt(\theta_i, \phi_i)$$

Conociendo las pérdidas por trayectoria para cada muestra y considerando que las pérdidas en el espacio libre están dadas por la ecuación 5.4, donde se expresa las pérdidas en decibeles, la frecuencia en MHz y la distancia en kilómetros, las pérdidas excesivas  $L_{ex}$  atribuidas al muro de cantera se pueden calcular por medio de las ecuaciones 5.5 y 5.6.

$$\text{Ecuación 5.4} \quad L_{fsi} = 32.44 + 20 \log R + 20 \log f$$

$$\text{Ecuación 5.5} \quad L_i = L_{fsi} + L_{ex}$$

$$\text{Ecuación 5.6} \quad L_{ex} = L_{fsi} - L_i$$

Donde  $L_{fsi}$  representa las pérdidas en el espacio libre por cada muestra mientras que como se había mencionado,  $L_{ex}$  son las pérdidas atribuidas al muro de cantera. En el apéndice D se muestran las hojas de cálculo con las mediciones y datos obtenidos.

### 5.3.2 Análisis Estadístico

Con la toma de lecturas presentada anteriormente y con la ayuda de Microsoft Excel y Minitab [30] se grafican los datos para observar su comportamiento y encontrar la relación que guardan.

Primeramente se comprueba que los datos presenten una distribución normal tanto para la potencia de recepción como para  $Loss\ Excess$  o pérdidas atribuidas al muro de la cantera obtenidas del análisis matemático presentado en la sección 5.3.1, ya que de ser así se podrá utilizar una regresión para encontrar una ecuación que haga la predicción de las pérdidas del muro.

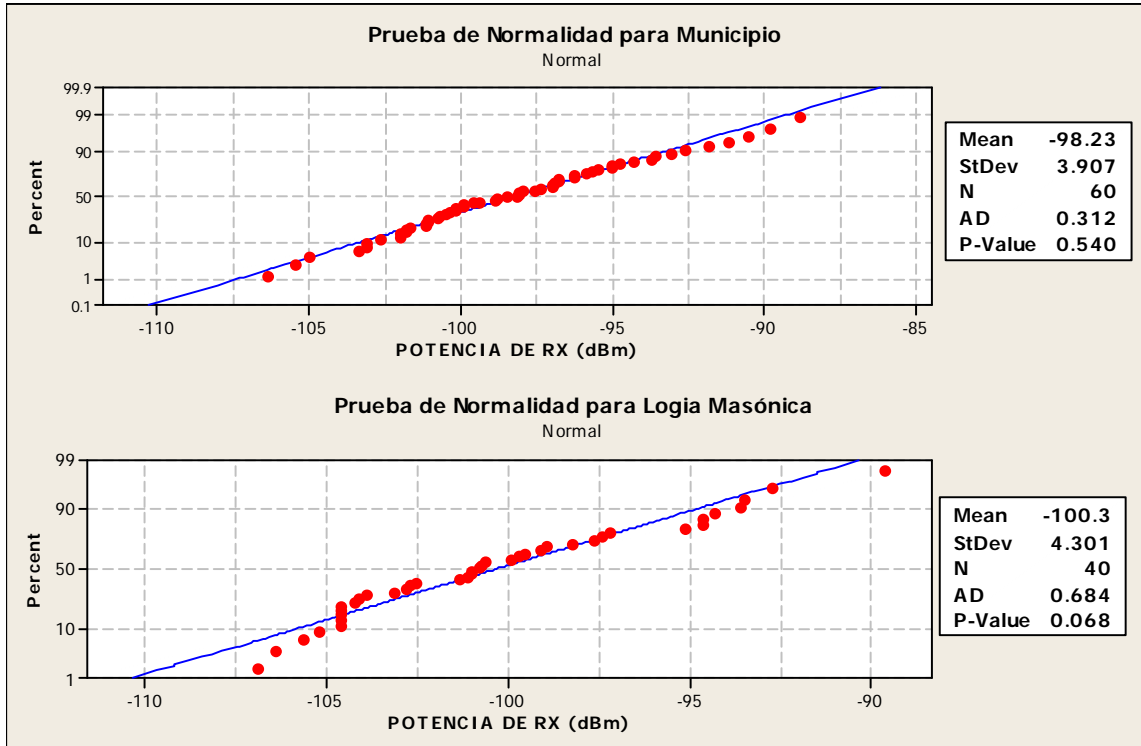


Figura 5.15 Prueba de normalidad para datos obtenidos en Oaxaca.

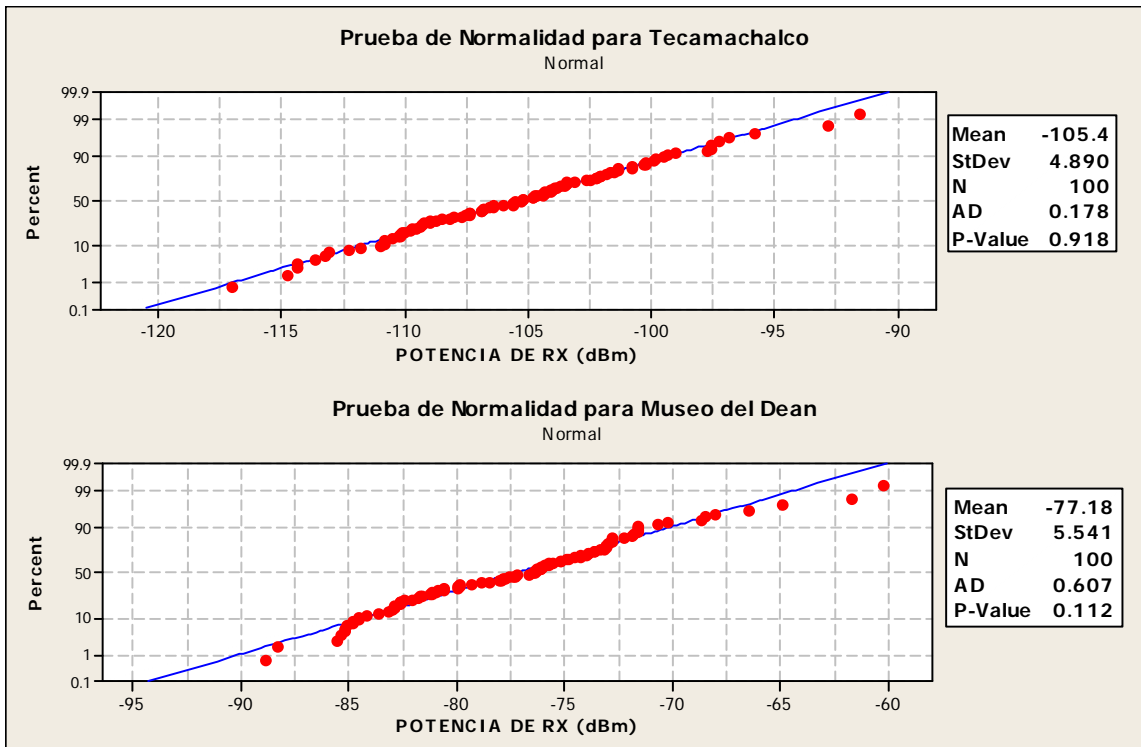


Figura 5.16 Prueba de normalidad para datos obtenidos en Puebla.

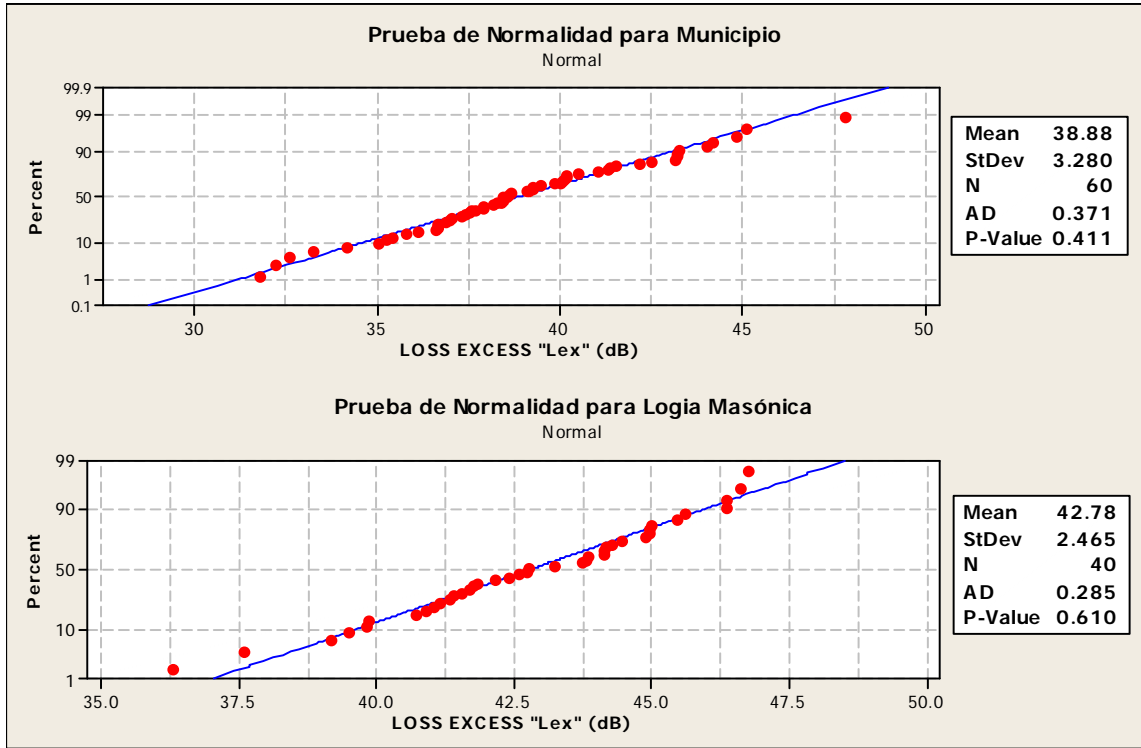


Figura 5.17 Prueba de normalidad para *Loss Excess* en Oaxaca.

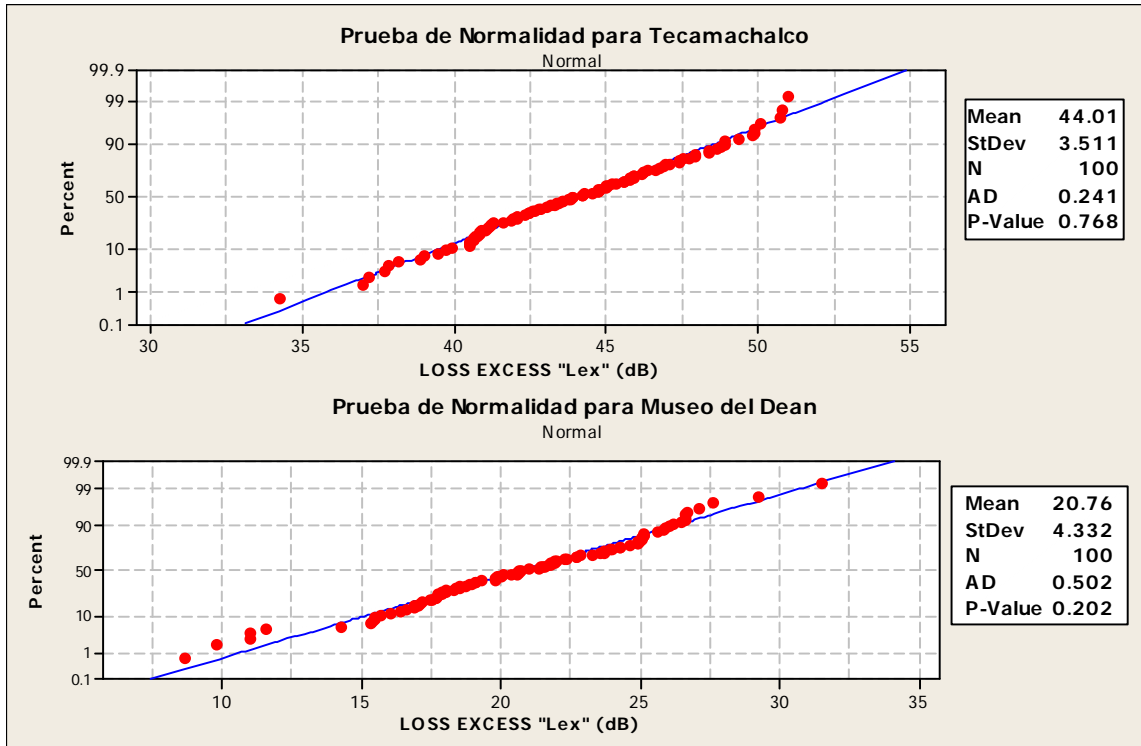


Figura 5.18 Prueba de normalidad para *Loss Excess* en Puebla.

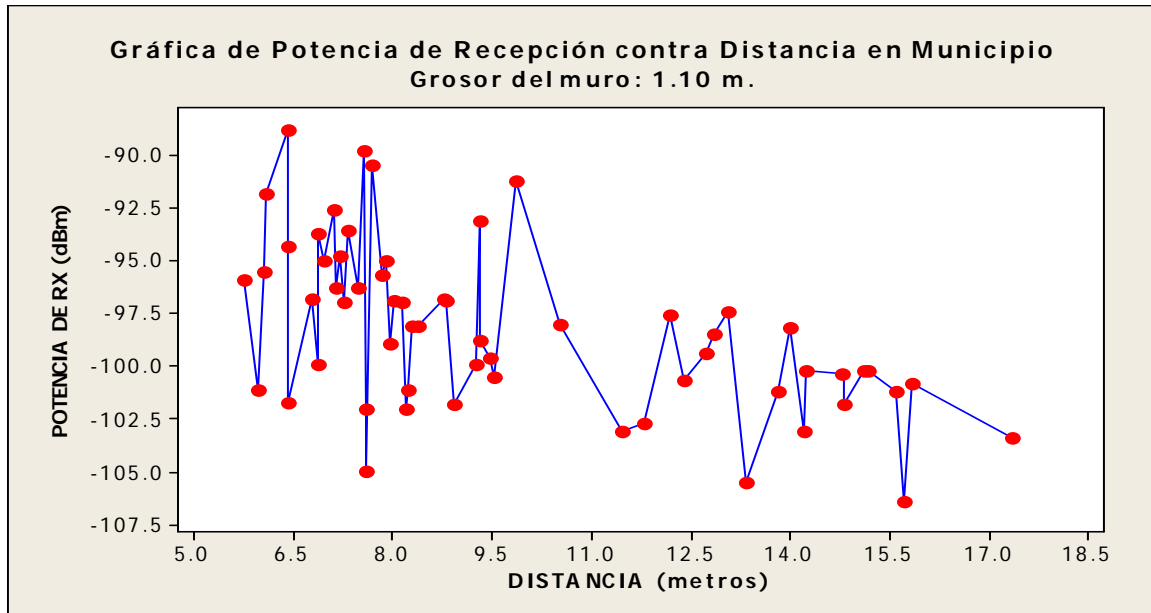
Las pruebas de normalidad fueron hechas con el método Anderson-Darling de Minitab. En cada una de las gráficas se puede observar un cuadro con los datos de las mismas donde el parámetro que nos indica si sigue una distribución normal o no es el valor “ $p$ ” o  $P$ -Value también llamado probabilidad de significancia, que es la probabilidad de obtener un resultado de muestra por lo menos tan extremo como el que se observa realmente si “ $H_0$ ” es verdadera [13].

“ $H_0$ ” es la hipótesis nula dice que la distribución sigue una distribución normal mientras que  $H_1$  dice que la información no sigue una distribución normal y se usa en el momento en que se descarta “ $H_0$ ”. Para saber cual de las hipótesis es la correcta se compara el valor “ $p$ ” el cual debe ser mayor a  $\alpha$  obtenido del intervalo numérico de la probabilidad de que se encuentre un parámetro, para este caso el intervalo es de 95% por lo que se tiene un  $\alpha=.05$ . La tabla 5.1 muestra los valores “ $p$ ” para cada una de las gráficas.

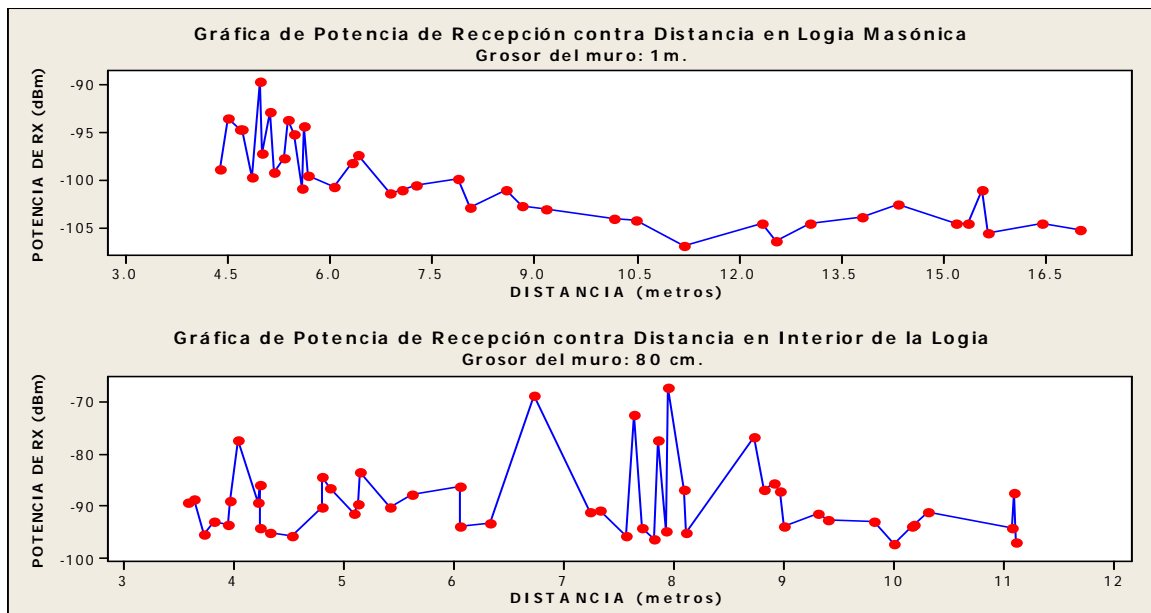
**Tabla 5.1 Resultado de gráficas de normalidad de datos.**

VARIABLE	LUGAR	VALOR “P”	RESULTADO
Potencia de Rx	Municipio de Oaxaca	0.540	Distribución Normal
	Logia Masónica, Oaxaca	0.068	Distribución Normal
	Casa del Dean, Puebla	0.918	Distribución Normal
	Tecamachalco, Puebla	0.112	Distribución Normal
Loss Excess	Municipio de Oaxaca	0.768	Distribución Normal
	Logia Masónica, Oaxaca	0.202	Distribución Normal
	Casa del Dean, Puebla	0.411	Distribución Normal
	Tecamachalco Puebla	0.610	Distribución Normal

Antes de mostrar los resultados de la regresión después de comprobar la normalidad de los datos, unas gráficas de potencias de recepción contra distancia son útiles para ver la tendencia que siguieron los datos.



**Figura 5.19** Potencia de recepción contra distancia en el municipio de Oaxaca.

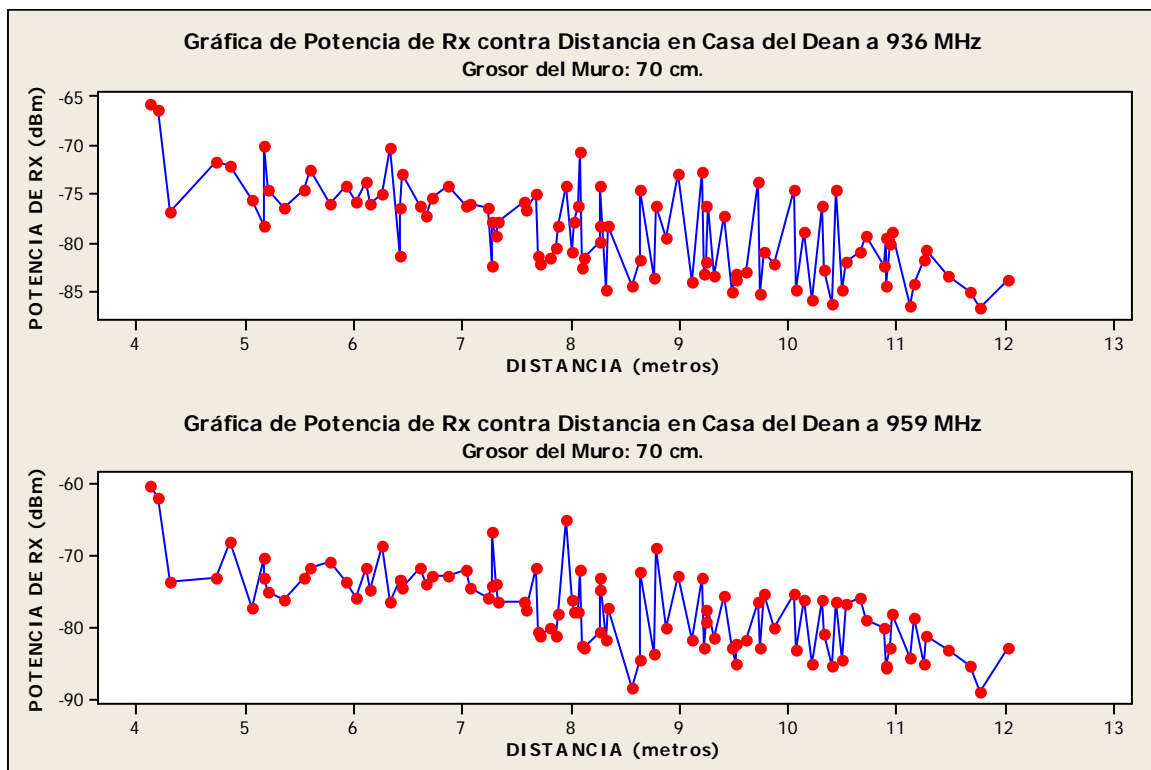


**Figura 5.20** Potencia de recepción contra distancia en la Logia Masónica.

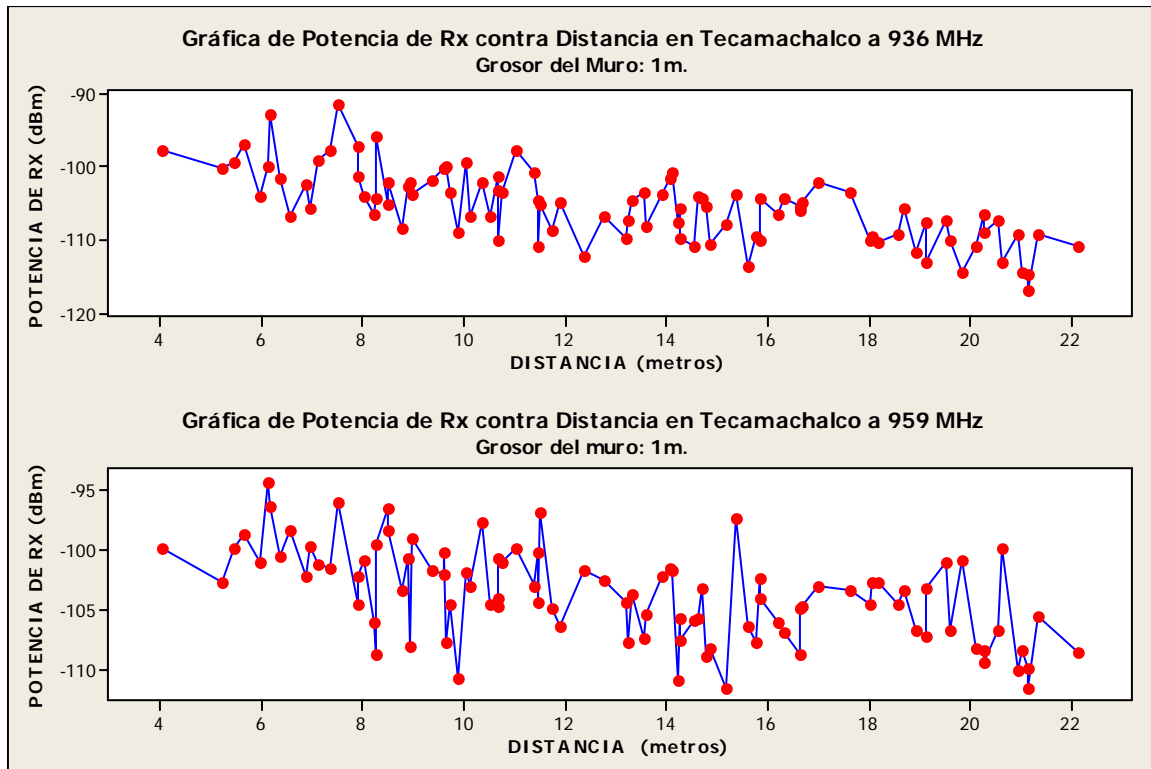


En las figuras 5.19 y 5.20 correspondientes a las mediciones en la Ciudad de Oaxaca, se observa una tendencia a disminuir la potencia de Rx conforme se va incrementando la distancia de separación del muro de cantera. Es claro notar como el grosor del muro influye directamente en el valor de la potencia de Rx pues mientras mayor sea éste, la potencia de recepción es más baja.

Cabe resaltar, que en los datos obtenidos en el interior de la Logia Masónica de Oaxaca, gráfica inferior de la figura 5.20, existe un incremento de recepción de señal entre los 6 y 9 metros de separación del muro, esto debido a que existía un hueco en la pared por donde la señal llegaba casi en línea de vista de la antena transmisora al punto de medición.



**Figura 5.21 Potencia de recepción contra distancia en Casa del Dean.**



**Figura 5.22 Potencia de recepción contra distancia en Tecamachalco.**

En las gráficas de potencia de Rx contra distancia para las muestras obtenidas en Puebla, figuras 5.21 y 5.22, se vuelve a presentar la tendencia de obtener menor recepción conforme la distancia de separación al muro aumenta así como también vuelve a influir el grosor del muro, similar a lo acontecido en la ciudad de Oaxaca con la cantera verde.

Las gráficas de las figuras 5.23 y 5.24 muestran en conjunto la potencia de Rx y las pérdidas de señal tanto para 936 MHz como 959 MHz. Se ve claramente como el grosor del muro es fundamental para la recepción de señal pues en la Casa del Dean se obtienen mayor recepción ya que el muro era de menor grosor, 70 cm., a diferencia de Tecamachalco, Logia Masónica (Reforma) y Municipio de Oaxaca donde el grosor del muro alcanzaba 1m y 1.10 m. respectivamente.

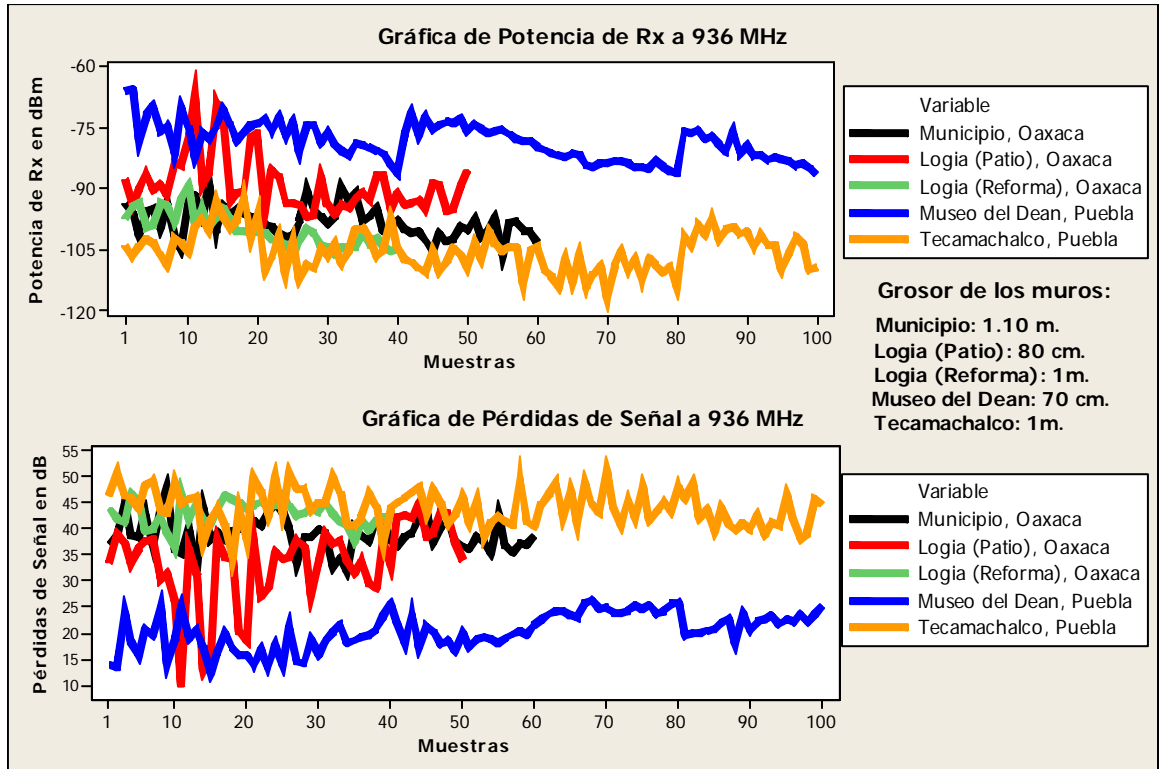


Figura 5.23 Gráfica de potencia de recepción y pérdidas de señal a 936 MHz.

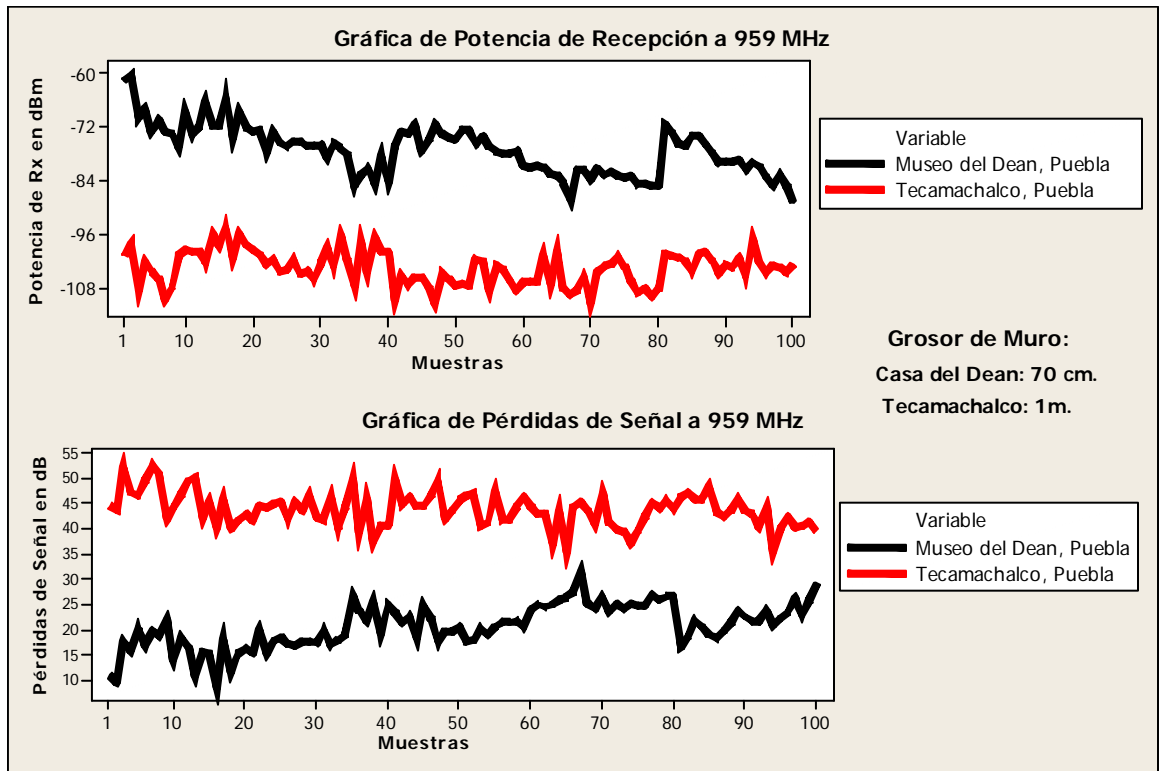
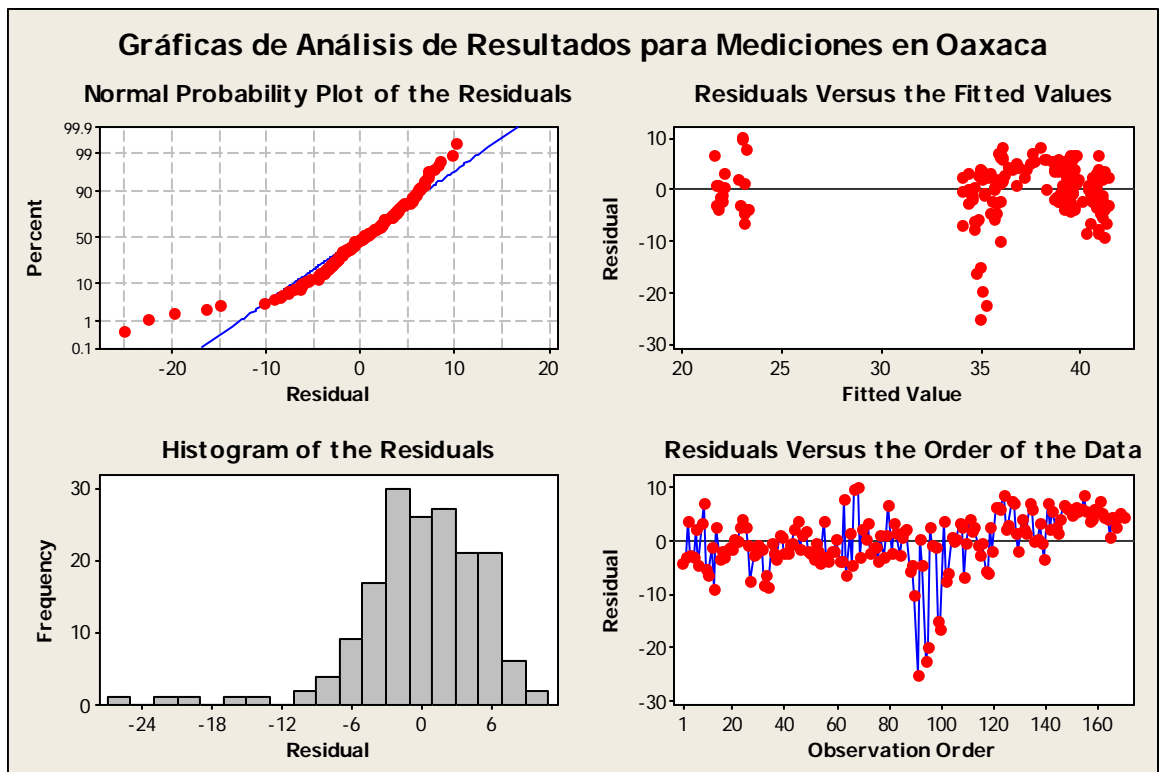


Figura 5.24 Gráfica de potencia de recepción y pérdidas de señal a 959 MHz.

Finalmente, una vez comprobada la normalidad de los datos, se hace la gráfica de regresión de las pérdidas atribuidas a la cantera contra la frecuencia de transmisión, grosor de muro y distancia al muro para encontrar una ecuación que relacione dichos parámetros.

Para comprobar la validez del sistema, se tienen 4 gráficas de residuales que son de probabilidad normal, histograma de residuales, residuales contra valores ajustados y residuales contra orden de los datos para cada una de las regresiones así como los valores estadísticos mostrados en la tabla 5.2.



**Figura 5.25 Gráfica de residuales para las mediciones en Oaxaca.**

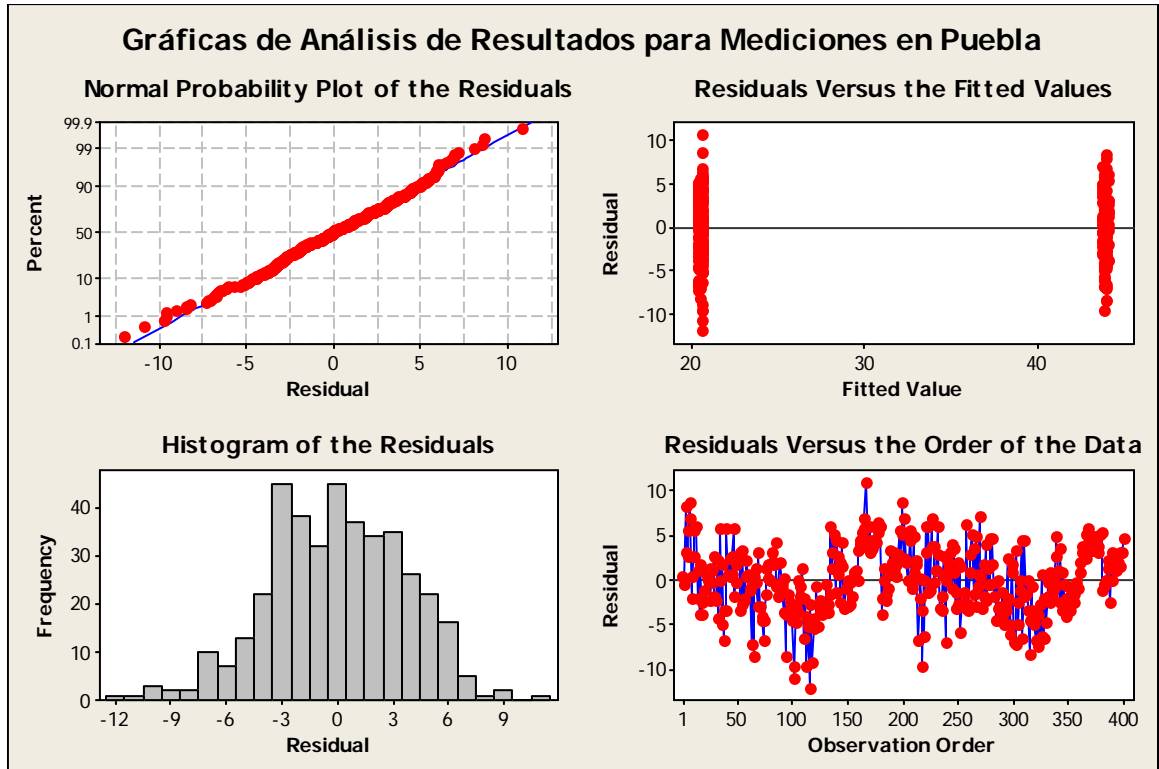


Figura 5.26 Gráfica de residuales para las mediciones en Puebla.

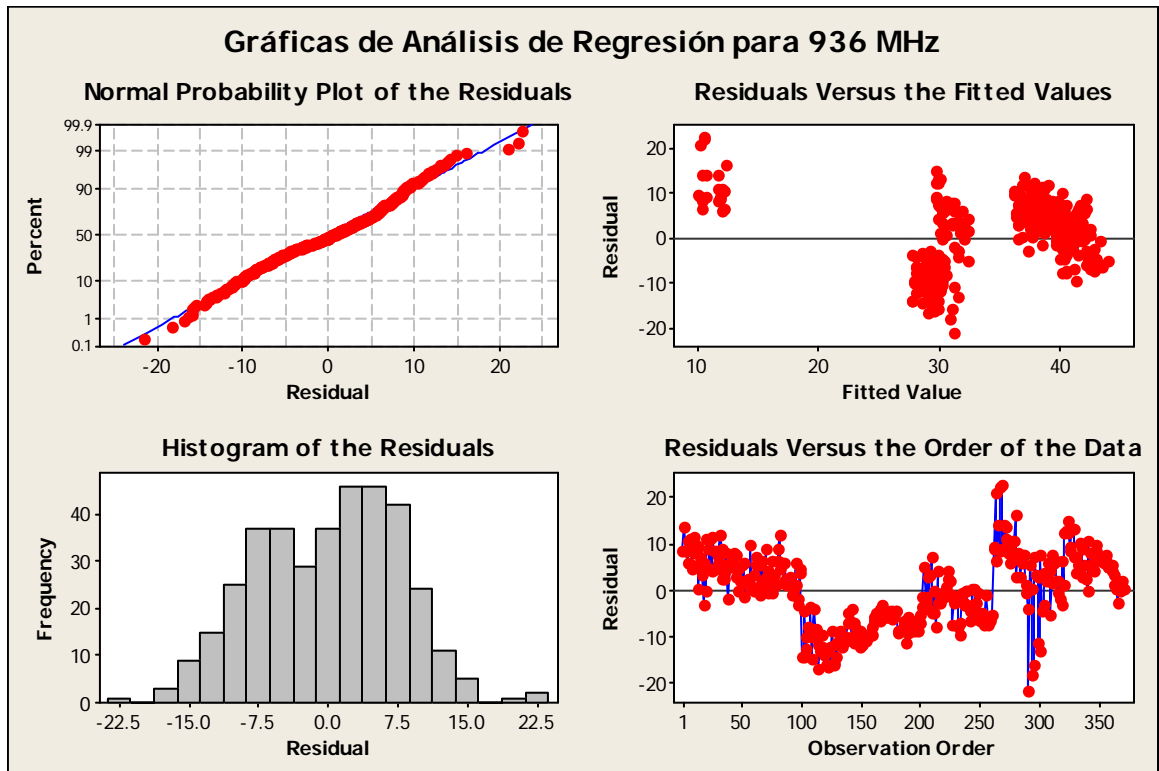


Figura 5.27 Gráfica de residuales para las mediciones a 936 MHz.

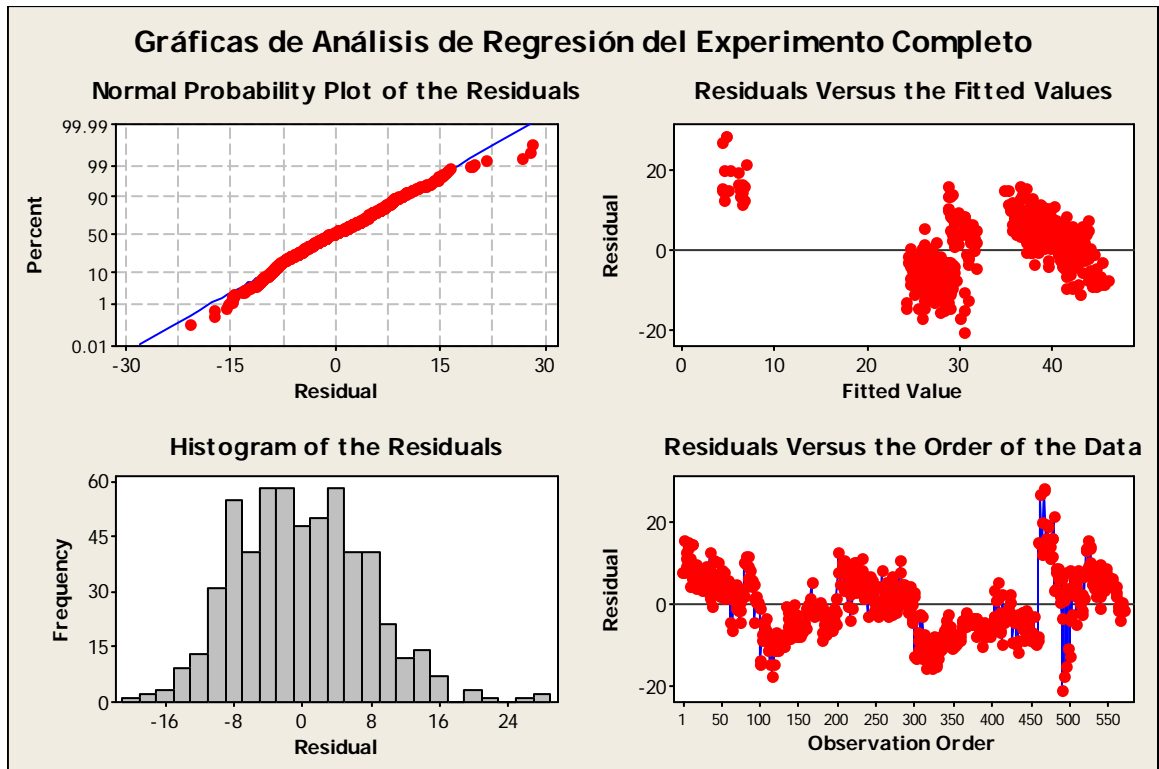


Figura 5.28 Gráfica de residuales del experimento completo.

Tabla 5.2 Resultados estadísticos de las regresiones.

MEDICIONES EN	VARIABLE	COEF.	VALOR "P"	R-sq (aj)	VALOR "P" DE PRUEBA F	ECUACIÓN DE REGRESIÓN
Oaxaca	Constante	21.444	0.000	50.50%	0.000	$Lex(dB)=21.444+19.593Gm-0.2707Dm$
	Distancia al muro	-0.2707	0.037			
	Frecuencia de Tx	*	*			
	Grosor del muro	19.593	0.000			
Puebla	Constante	-49.03	0.001	91%	0.000	$Lex(dB)=-49.03+86.78Gm-0.0074Dm+0.006F$
	Distancia al muro	-0.0074	0.885			
	Frecuencia de Tx	0.00664	0.681			
	Grosor del muro	86.78	0.000			
Oaxaca y Puebla a 936 MHz	Constante	3.439	0.046	47.90%	0.000	$Lex(dB)=3.439+31.279Gm+0.3515Dm$
	Distancia al muro	0.3515	0.001			
	Frecuencia de Tx	*	*			
	Grosor del muro	31.279	0.000			
Experimento Completo	Constante	75.92	0.006	55%	0.000	$Lex(dB)=75.92+38.95Gm+0.415Dm-0.085F$
	Distancia al muro	0.41528	0.000			
	Frecuencia de Tx	-0.0852	0.004			
	Grosor del muro	38.957	0.000			

\* El valor es constante por lo que es removido del análisis.

**5.4 RESUMEN**

En este capítulo se mostró todo el procedimiento para la caracterización de la cantera, desde la etapa de negociación incluyendo el Plan de Campaña de Medición, los equipos y conexión entre ellos; la obtención de muestras en el lugar de experimento, gráficas de los resultados obtenidos y finalmente, el análisis matemático y estadístico del experimento mostrando en la tabla 5.2 los resultados obtenidos con los parámetros estadísticos y las ecuaciones de regresión para cada caso. En cada ecuación la frecuencia ( $F$ ) está dada en MHz, mientras que el grosor del muro ( $Gm$ ) y la distancia al muro ( $Dm$ ) se da en metros.

En la tabla 5.3 se resumen las pérdidas atribuidas a la cantera para cada uno de los lugares de medición mostrando el promedio de las pérdidas reales, de las obtenidas con la ecuación de regresión del estado así como también con la ecuación de regresión del sistema completo.

**Tabla 5.3 Valores de pérdidas promedio atribuida al muro de cantera.**

LUGAR DE MEDICIÓN	PROMEDIO REAL	ECUACIÓN DE REGRESIÓN DEL ESTADO	ECUACIÓN DE REGRESIÓN DEL SISTEMA
Municipio de Oaxaca	38.884 dB	40.325 dB	54.415 dB
Logia Masónica	42.780 dB	38.666 dB	42.467 dB
Interior de la Logia	33.456 dB	35.245 dB	33.265 dB
“Casa del Dean” (936 MHz)	20.318 dB	20.435 dB	28.065 dB
“Casa del Dean” (959 MHz)	20.765 dB	20.587 dB	26.106 dB
Tecamachalco (936 MHz)	44.008 dB	43.831 dB	40.562 dB
Tecamachalco (959 MHz)	43.866 dB	43.983 dB	38.602 dB