



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

LOCALIZACIÓN DE TOMAS NO REGISTRADAS EN LA RED DE  
DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE  
RADAR DE PENETRACIÓN DE SUELOS Y SISTEMA ACÚSTICO DE  
CORRELACIÓN

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO**

PRESENTAN:

**DANIEL ABRAHAM GONZÁLEZ ORELLANA**  
**ALEJANDRO NÚÑEZ PRIEGO**

DIRECTOR DE TESIS

**ING. RODOLFO PETERS LAMMEL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F. 2008



## **Dedicatorias y agradecimientos de Daniel Abraham**

A mis padres Amilcar e Isabel por todo su apoyo y amor que me brindan para lograr conquistar un sueño compartido.

A mis hermanos Wilhem y Loyoan por ser un ejemplo a seguir y estar siempre cerca de mis pasos.

A Margarita por su amor y compañía que continúan nutriendo mi alma para dar lo mejor de mí.

A mis familiares y amigos por transmitirme alegría y buena vibra, manteniendo un equilibrio en mi vida.

# Dedicatorias y agradecimientos de Alejandro

## Dedicatorias

A mis padres Leticia Priego y Crisanto Alejandro Núñez, quienes con su ejemplo, dedicación y educación formaron mi persona.

A mis hermanos Elías Alberto, Ana Laura y Mariana Leticia, con quienes crecí y compartí muchas de mis aventuras. A mi cuñada Karen y a mi sobrino Ian.

A mis abuelos Alberto Priego, Ernestina Orozco, Emma Medina y Elías Núñez<sup>†</sup>, quienes compartieron incondicionalmente su sabiduría y cariño.

A las familias Priego Obregón y Priego Galeano, por todos los apoyos y consejos que he recibido por su parte a lo largo de mi vida.

A mi novia Rosalba Santiago. No hay palabras para describir todas las cosas buenas que hemos compartido juntos y toda la madurez que he ganado gracias a ella.

A mis primos, sobrinos y tíos.

Cada uno se despidió de la vida del modo que le era más propio. Unos rezaron, otros bebieron desmesuradamente, otros se embriagaron con su última pasión nefanda. Pero las madres velaron para preparar con amoroso cuidado la comida para el viaje, y lavaron a los niños, e hicieron el equipaje, y al amanecer las alambradas espinosas estaban llenas de ropa interior infantil puesta a secar; y no se olvidaron de los pañales, los juguetes, las almohadas, ni de ninguna de las cien pequeñas cosas que conocen tan bien y de las que los niños tienen siempre necesidad. ¿No harías igual vosotros? Si fuesen a mataros mañana con vuestro hijo, ¿no le daríais de comer hoy?

Primo Levi

*Si esto es un hombre*

A la memoria de Primo Levi. Químico, escritor y superviviente de Auschwitz, casi nadie ha contado el infierno con tanta claridad y hondura como él: casi nadie, al menos en el sombrío siglo en el que vivió, ha resaltado como él la sagrada dignidad de la vida, el impulso de la inteligencia y piedad que incluso en medio del horror nos da la oportunidad de seguir siendo plenamente humanos.

## **Agradecimientos**

Un agradecimiento especial a nuestro director de tesis el Ing. Rodolfo Peters, quien gracias a su guía nos fue posible definir el tema y con sus comentarios y correcciones todo esto pudo ser cristalizado.

Esta tesis fue enriquecida por los comentarios, correcciones y revisiones de nuestros sinodales: M.I. Luis Arturo Haro, M.I. Roberto Tovar, M.I. Yukihiro Minami y Dr. Pedro Acevedo. Muchas gracias.

Al Dr. Alejandro Vargas con quien trabajé durante el servicio social. Sus opiniones y documentos ayudaron en el modelo de esta tesis y la experiencia me ayudo a definir el área de interés para mis estudios de posgrado.

A Daniel Abraham González por la amistad y la experiencia laboral que compartimos y a la familia González Orellana.

Al Prof. Ricardo Sánchez de la Academia Mexicana de Wu-Shu y al Prof. David Baez de Il Shim Tae Kwon Do, por la ética del trabajo bien hecho que me inculcaron y todas las clases que pacientemente me impartieron para poder ser un competente artista marcial y mejor persona.

A los excelentes profesores de la Facultad de Ingeniería con los cuales tuve la fortuna de formarme durante la licenciatura: Ing. Jaime Martínez, M.I. Humberto Soriano, Ing. Erik Castañeda, Ing. Gabriel Alejandro Jaramillo, M.I. Larry Hipólito Escobar, Ing. Gonzalo López, Ing. Alejandro Cadaval<sup>†</sup>, Dr. José Cohen, M.I. José Castillo, M.I. Roberto Macías e Ing. Alejandro Riveiro.

Al personal de Tecnoevoluciones Aplicadas S.A. de C.V. con quienes aprendí mucho y pasé un tiempo muy grato: Sra. Irma Angélica Todoberto, M.I. Carlos Alberto Flores, Ing. Natalia Vélez, Ing. Ana María Sepúlveda, Tec. Gerson Zapata y a todo el personal de la sucursal de Bogotá, Colombia.

A mis amigos presentes y pasados, gracias por el interés y todo el tiempo que compartimos: Mauricio Alejandro Valdez, Jonathan Martínez, Shanti Jackeline Franco, Mario Agustín González<sup>†</sup>, Luis Ciro Méndez, Francisco Adrián Canales, Cristina Araceli Carreón, Selene Emireth Morales, Ismael Mendoza, Rosa Medina, Arturo René Sánchez, Arturo Millán, José Eduardo Martínez, Olga María Aranda, Said Velázquez y a la comunidad del UTEI.

A Harold Bloom quien me enseñó que aunque la lectura es el placer más difícil es a la vez el más saludable desde un punto de vista espiritual, que leemos porque nos otorga la capacidad de juzgar y opinar por nosotros mismos y porque nos relaciona con la alteridad, ya sea de la propia, la de los amigos o la de quienes pueden llegar a serlo.

# Índice general

	<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>3</b>
	1.1 Motivación	3
	1.2 Planteamiento del problema	4
	1.3 Objetivos	5
	1.4 Materiales y métodos	6
	1.5 Antecedentes	7
	1.6 Aportes del trabajo	8
	1.7 Organización del trabajo	8
<b>2</b>	<b>Panorama general de la reducción de pérdidas de agua potable en redes de distribución</b>	<b>9</b>
	2.1 Introducción a los sistemas de abastecimientos de agua potable	9
	2.2 Sistemas urbanos de distribución de agua potable	11
	2.3 Pérdida física y económica	16
	2.4 Reducción integral de pérdidas de agua potable	19
	2.4.1 Diagnóstico de pérdidas	20
	2.4.2 Creación de sectores hidrométricos	21
	2.4.3 Eliminación de pérdidas	22
	2.4.3.1 Determinación de fugas por caída de presión	24
	2.4.3.2 Determinación de fugas por distritos hidrométricos	24
	2.4.3.3 Localización de fugas en la red de agua potable	27
	2.4.4 Control de pérdidas.	41
	2.5 Situación actual de la República Mexicana y contexto de las tomas no registradas en la red de agua potable	42
	2.5.1 Panorama global	42
	2.5.2 Panorama en la República Mexicana	43
	2.5.3 Utilización del agua en la República Mexicana	46
	2.5.4 Contexto de las tomas no registradas en red en la República Mexicana	50

<b>3</b>	<b>Sistema acústico de correlación para la detección de fugas de agua</b>	<b>53</b>
	3.1 Descripción general	53
	3.2 Marco teórico	56
	3.3 Principio de funcionamiento	58
	3.4 Utilización	63
	3.4.1 Selección y adquisición de equipo	64
	3.4.2 Localización de fugas de agua	70
<b>4</b>	<b>Sistema de radar de penetración de suelos</b>	<b>79</b>
	4.1 Descripción general	79
	4.2 Marco teórico	81
	4.3 Principio de funcionamiento	90
	4.4 Utilización	98
<b>5</b>	<b>Metodología para la localización de tomas no registradas en red de distribución de agua potable</b>	<b>107</b>
	5.1 Alcance	107
	5.2 Metodología propuesta	108
	5.3 Resultados experimentales	111
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>123</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>125</b>

# Índice de Figuras

2.1	Sistema de abastecimiento de agua	10
2.2	Componentes básicos de toma domiciliaria	15
2.3	División del volumen suministrado en una red de agua potable	18
2.4	Diagrama de flujo básico de la reducción integral de pérdidas de agua	19
2.5	Balance de un sistema de agua	20
2.6	Creación de sector hidrométrico en una red de agua potable	21
2.7	Esquema básico de la eliminación de pérdidas físicas.	23
2.8	Gráfica de caudal en un distrito hidrométrico contra tiempo	25
2.9	Vibración dentro de la pared de una tubería debido a la presencia de una fuga.	28
2.10	Fuga en suelo rígido	29
2.11	Fuga en suelo blando	30
2.12	Ruptura completa en tubería de agua potable	31
2.13	Localización de fugas mediante varillas en el Reino Unido durante la década de los 30.	31
2.14	Niveles típicos de sonido y niveles de ruido de fuga	31
2.15	Etapas de la localización de fugas de la red de agua potable	33
2.16	Colocación de sensor sobre vástago de válvula	33
2.17	Colocación de sensores en un tramo de red	34
2.18	Histograma de los niveles de ruido registrado (en porcentaje)	34
2.19	Asociación gráfica de los parámetros estadísticos para la probabilidad de fuga	35
2.20	Perfil característico de un ruido de fuga	36
2.21	Obtención de tramos con probabilidad de fuga utilizando pre-localizadores	37
2.22	Distintos tipos de geófonos	38
2.23	Escucha directa de fugas en red	38
2.24	Gráfica de costo contra nivel de reducción de pérdidas	41
2.25	Distribución global de agua en el mundo	42
2.26	Precipitación pluvial normal mensual histórica en México, en el periodo de 1941 a 2000	43
2.27	Porcentaje de cobertura de agua potable en el ámbito mundial	45
2.28	Grado de presión sobre los recursos hídricos en el ámbito mundial y ubicación de México	46

2.29	Distribución porcentual de los volúmenes concesionados para usos consuntivos	47
2.30	Gráfica del volumen concesionado para usos consuntivos por entidad federativa	48
2.31	Estimados del volumen no facturado del 2007 en la República Mexicana	50
3.1	Ejemplo del resultado obtenido utilizando sistema acústico de correlación o correlacionador	54
3.2	Sistema moderno de correlación, modelo ENIGMA de Primayer	55
3.3	La existencia de una fuga produce una diferencia de presión, lo cual provoca una vibración en el medio	56
3.4	El sonido producido por una fuga dentro de una tubería metálica será en gran parte reflejado y transmitido	56
3.5	Fuga de agua presente en tramo de tubería y distancias asociadas	57
3.6	Creación de la función de correlación cruzada de dos secuencias $x(n)$ e $y(n)$ con cinco diferentes retardos $\tau$	61
3.7	Función típica de correlación cruzada	62
3.8	Resultado final del estudio de correlación en un tramo de tubería	62
3.9	Metodología para la detección de fugas en redes de agua potable	63
3.10	Metodología de la utilización de los sistemas acústicos de correlación	64
3.11	Sistema acústico de correlación en tiempo real	65
3.12	Sistema acústico de correlación de post-procesamiento	66
3.13	Proceso de la creación de la señal digital por parte del sensor de los sistemas acústicos de correlación	67
3.14	Operación de cuantificación	68
3.15	Resultado de pre-localizador	70
3.16	Procedimiento de localización utilizando correlacionadores	70
3.17	Sensor de sistema correlación sujeto mediante imán a vástago de válvula	71
3.18	Sensor hidrófono junto a su válvula de inserción	71
3.19	Diagrama básico de la función del filtrado en un sistema de correlación.	73
3.20	Función de correlación cruzada en un tramo de tubería de hierro colado, con una longitud de 250 metros	76

3.21	La función de correlación cruzada máxima, asociada a un tiempo de retardo y una distancia de los sensores	77
4.1	Espectro electromagnético	80
4.2	Algunas aplicaciones de GPR	81
4.3	Onda electromagnética con sus componentes de campo eléctrico y magnético	82
4.4	Resistividad y conductividad de materiales comunes en los estudios de prospección	84
4.5	Variación de la velocidad frente a la permitividad dieléctrica relativa	89
4.6	Principio básico del funcionamiento de radar de penetración de suelo	90
4.7	Transmisión de pulsos del sistema de adquisición de datos a la antena, y generación de la señal analógica bipolar	91
4.8	Representación de la ley de Snell	92
4.9	Patrón de radiación	93
4.10	Onda adquirida y digitalizada por unidad de control	93
4.11	Creación de perfil de subsuelo combinando trazas en diferentes intervalos de distancia o tiempo	94
4.12	Traza creada con el valor de la onda reflejada en función del tiempo	95
4.13	Creación de radargrama mediante la asignación de una tabla de color al conjunto de trazas	95
4.14	Antena de radar de penetración terrestre que se encuentra a una distancia “h” de un objeto a localizar	96
4.15	Procedimiento de localización de tuberías utilizando radar de penetración terrestre	98
4.16	Representación de dos tomas domiciliarias en una red de agua potable	101
4.17	Posiciones de la antena que pasa encima de un reflector	102
4.18	Estudio de radar en formato WIGGLE,	102
4.19	Perfil hiperbólico característico en la detección de tuberías	103
4.20	Ejemplo de localización de tubería metálica a 50 cm de profundidad	105
4.21	Levantamientos paralelos de radar de penetración terrestre	105
4.22	Levantamientos de radar de penetración terrestre	106
4.23	Resultado obtenido por el estudio tridimensional del perfil de una instalación continua (tubería)	106
5.1	Primera etapa de la localización de tomas no registradas en red de agua potable	108

5.2	Segunda etapa de la localización de tomas no registradas en red de agua potable	109
5.3	Tercera etapa de la localización de tomas no registradas en red de agua potable	110
5.4	Función de correlación cruzada de resultado 1	113
5.5	Inicio de levantamiento y trayectoria de resultado 1 con radar de penetración de suelo.	114
5.6	Radargrama procesado de resultado 1	114
5.7	Función de correlación cruzada de resultado 2	117
5.8	Inicio de levantamiento y trayectoria de resultado 2 con radar de penetración de suelo.	118
5.19	Radargrama procesado de resultado 2	118
5.10	Función de correlación cruzada de resultado 3	120
5.11	Inicio de levantamiento y trayectoria de resultado 2 con radar de penetración de suelo	121
5.12	Radargrama procesado de resultado 3	121

# Índice de tablas

2.1	Factores de confianza de fuga típicos	36
2.2	Anchos de banda para filtros de distintos materiales	39
2.3	Disponibilidad natural media per cápita de México	44
2.4	Extracción total de agua en México	44
2.5	Usos consuntivos en la República Mexicana, según origen del tipo de extracción	47
2.6	Volumen concesionado para usos consuntivos por entidad federativa	49
3.1	Velocidades y selección de filtros para los materiales asbesto-cemento, hierro colado, concreto, cobre y hierro dúctil	74
3.2	Velocidades y selección de filtros para los materiales línea de concreto y hierro dúctil, hierro galvanizado, polietileno de alta densidad, plomo y polietileno de mediana densidad.	75
4.1	Rangos de conductividad para definición de materiales	83
4.2	Valores de dieléctrico para algunos materiales comunes	85
4.3	Profundidad de penetración de algunas antenas comerciales	99
4.4	Profundidad de penetración para algunos materiales	100
5.1	Condiciones y valores experimentales de resultado 1	112
5.2	Porcentaje de error para el resultado 1	115
5.3	Condiciones y valores experimentales de resultado 2	116
5.4	Porcentaje de error para el resultado 2	119
5.5	Condiciones y valores experimentales de resultado 3	119
5.6	Porcentaje de error para el resultado 3	122



## Resumen

En el presente trabajo se propone una metodología sistemática para la localización de tomas no registradas en la red de distribución de agua potable mediante la combinación de dos tecnologías: el sistema acústico de correlación y el radar de penetración de suelos. Para poder contextualizar lo anterior, se describe qué es un sistema de distribución de agua potable, el tipo de pérdidas que puede tener en su operación y se estudia el proceso denominado reducción integral de pérdidas, del cual la localización de tomas no registradas es un subproceso.

Se explica el marco teórico, principio de funcionamiento, utilización e interpretación de resultados de las tecnologías mencionadas. El sistema acústico de correlación registra el ruido producido por un consumo a través de una toma domiciliaría, sea ésta legal o no registrada, y puede estimar su posición en la tubería. El radar de penetración de suelos detecta los cambios del material en el subsuelo al emitir pulsos electromagnéticos, y crea un perfil a partir de las reflexiones producidas por la diferencia del material dieléctrico. Al realizar un levantamiento perpendicular a una tubería somera, se puede visualizar un perfil hiperbólico característico, lo que permite obtener un estimado de la profundidad del lomo de la tubería. Al combinar ambos resultados es posible encontrar la posición de tomas no registradas de una manera no destructiva e indirecta.

Para observar la aplicabilidad de la metodología, se realizan tres pruebas experimentales en sitio. Los resultados obtenidos muestran efectivamente que es una propuesta viable y se compara además la distancia entregada por el sistema acústico de correlación contra la distancia real encontrada por el radar de penetración de suelos, siendo el margen de error aceptable.

**Palabras clave:** Reducción integral, pérdidas de agua, radar de penetración de suelos, tomas clandestinas, red de agua potable



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Motivación

El agua es fuente de vida, y se está perdiendo. El cuidado de la misma es de suma importancia para el bienestar general, por lo que se requiere estar comprometido en la aplicación de un desarrollo sustentable, heredando a las futuras generaciones la seguridad de contar con los recursos suficientes para su crecimiento.

En la actualidad, desafortunadamente no se ha dado el valor que merece al recurso natural más importante para la existencia de los seres vivos. Es absurdo que existan sectores de la sociedad que prefieren pagar un precio elevado por televisión de paga, que realizar los pagos puntuales del suministro de agua, o incluso realizar conexiones ilegales para simplemente evadir el pago del servicio.

Los organismos operadores de agua aplican sistemas de control para monitorear la red de agua potable, con lo cual crean un sistema en donde evalúan las entradas y salidas físicas, obteniendo así las pérdidas generales.

Un porcentaje importante de estas pérdidas se encuentra en el proceso de distribución, y obedece a numerosas causas. La pérdida es física, debido a fugas visibles o no visibles en red, o económica, debido a consumos de agua no facturados.

Ante esta problemática en México, los organismos operadores e instituciones relacionadas están en una constante búsqueda de técnicas novedosas para solventar de manera eficiente y confiable estos problemas.

Existen documentos técnicos donde se expone la manera de localizar fugas no visibles en tomas domiciliarias y red de agua potable mediante tecnologías acústicas, sin embargo, no se ha propuesto una metodología con tecnologías de

## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

vanguardia para la localización de tomas clandestinas, que forma parte fundamental de las pérdidas económicas.

Dentro de las opciones tecnológicas existen las conocidas como no destructivas, que en esencia no requieren que se realice ninguna modificación física del circuito hidráulico. Gracias a esto, el impacto operativo y urbano se ve reducido. La propuesta de tecnologías (radar de penetración de suelos y sistema acústico de correlación) está basada en dicha característica.

El sistema acústico de correlación registra los ruidos producidos por elementos de la red y puede obtener en un tramo la posición aproximada de los mismos. El radar de penetración de suelos es una técnica que se aplica en estudios geofísicos, arqueológicos, infraestructura, entre otros, que permite detectar contrastes dieléctricos asociados a diferentes materiales (medios). Con la combinación de ambos es posible proponer una metodología para la localización de tomas no registradas en la red de distribución de agua potable con la finalidad de compensar económicamente el consumo no facturado. Esto constituye el objetivo general en el que está enmarcado este trabajo.

### **1.2 Planteamiento del problema**

Existen diversos problemas asociados con la localización de tomas no registradas en red para México. En primer lugar, las tomas no registradas son subterráneas y no cuentan con una diferencia en construcción ni operación respecto a las tomas registradas, la única variante es que omiten el uso de un micro medidor. La utilización de un solo sistema tecnológico no destructivo e indirecto no proporcionará la información suficiente y confiable para tener un grado de certeza alto. El sistema acústico de correlación puede encontrar si existe algún elemento de la red que produzca un sonido constante (válvulas castigadas, reducciones, consumos, fugas, entre otras) pero no el tipo de construcción física de ella. El radar de penetración de suelos puede obtener un perfil que permita identificar los componentes de la red a nivel físico, pero no puede identificar si existe un flujo de líquido en él.

En segundo lugar, el manejo pleno y adecuado del sistema acústico de correlación y el radar de penetración de suelos requiere de habilidades y manejo de conceptos propios del perfil de los egresados de la carrera de Ingeniero Eléctrico Electrónico. En México, el operador promedio de este tipo de sistemas cuenta, en el mejor de los casos, con estudios secundarios o de bachillerato, por lo que no

## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

cuenta con el bagaje necesario para comprender resultados técnicos sin la ayuda de un instructor y/o documentos de referencia que le sirvan como apoyo para el adecuado análisis de resultados.

Las soluciones posibles para cada apartado consisten en lo siguiente, para la primera problemática se propondrá una metodología donde se combinan la utilización y los resultados entregados por cada sistema. De esta manera se puede obtener una metodología viable, no destructiva y apoyada en resultados no empíricos.

Para la segunda problemática se explicarán de una manera general y concisa el principio de funcionamiento, características y utilización de cada uno de los sistemas orientados para servir como referencia a las personas involucradas en el área. También se describirá de manera global en qué consiste el proceso de disminución de pérdidas (conocido también como recuperación de caudales) para puntualizar dónde se encuentra este trabajo.

Finalmente, se probará la metodología propuesta experimentalmente y se discutirá lo obtenido contra lo planteado.

### 1.3 Objetivos

En este trabajo no se pretende describir o investigar el mejor método para la solución del problema expuesto, dada la complejidad y los múltiples escenarios posibles para ello. Aunque existen guías y métodos expuestos para la recuperación de pérdidas físicas (fugas) realizados por los organismos encargados, la búsqueda sistemática mediante tecnologías no destructivas de tomas no registradas en red es un tema innovador. Para el propósito de este trabajo, únicamente se buscan cumplir los siguientes objetivos:

**Objetivo 1** Dar un panorama general de la recuperación de caudales.

**Objetivo 2** Explicar el principio de funcionamiento, características y utilización de los sistemas propuestos.

**Objetivo 3** Describir la metodología propuesta.

**Objetivo 4** Aplicar la metodología experimentalmente y evaluarla.

### 1.4 Materiales y métodos

Los sistemas particulares que servirán para la realización de la prueba experimental son:

- Sistema acústico de correlación modelo Enigma marca Primayer Ltd. Contiene 8 registradores/acelerómetros, estuche de programación y lectura de datos, y software de análisis de resultados.
- Radar de penetración de suelos (GPR, Ground Penetrating Radar) modelo UtilityScan400 marca Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI). Contiene un sistema de adquisición de datos modelo SIR-3000, antena mono estática con frecuencia central de 400 MHz, vehículo de transporte con codificador de posición (encoder), cable de conexión del SIR-3000 con la antena, y software de post-procesamiento RADAN.

La metodología que se pretende seguir para alcanzar los objetivos presentados es la siguiente:

- 1) Revisar la literatura referente al tema de recuperación de caudales, sistemas acústicos de correlación y radar de penetración de suelos.
- 2) Analizar y sintetizar los pasos a seguir para la recuperación de caudales, logrando así contextualizar el problema, y crear un punto de referencia en el lector.
- 3) Explicar la importancia de la localización de una toma no registrada en la red de agua potable.
- 4) Documentar las características, principio de funcionamiento e interpretación de resultados del sistema acústico de correlación.
- 5) Documentar las características, principio de funcionamiento e interpretación de resultados del radar de penetración de suelos,
- 6) Proponer mediante la combinación de ambas tecnologías, una metodología viable para la localización de tomas no registradas, detallando la implementación de la misma.
- 7) Probar experimentalmente en sitio la metodología propuesta.

### 1.5 Antecedentes

Organismos como la AWWA (American Water Works Association) han planteado métodos para la localización de tomas no registradas en red, que básicamente consisten en la realización de fotografías aéreas, para comparar las tomas registradas con el tipo y tamaño de los lotes obtenidos por las fotografías. Si existiera una incongruencia entre el consumo facturado y el tipo de lote entonces se realiza una localización de toma mediante métodos convencionales, como lo es la utilización de geófonos y/o sondeos. Aunque es factible, no tiene una viabilidad económica para la inspección de redes extensas, debido a que requiere la utilización de una gran cantidad de recursos materiales y humanos. Además, los resultados son en gran medida subjetivos, y dependen casi por completo del juicio del encargado del mismo.

En México, los organismos que realizan las guías para la recuperación de caudales como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) o el Centro Mexicano de Capacitación en Agua y Saneamiento A.C. (CEMCAS) describen en qué consisten las tomas no registradas en red, más no proponen una manera sistemática para su localización.

Los fabricantes y desarrolladores de sistemas acústicos de correlación describen la manera de interpretar los resultados para identificar posibles puntos de sonido constante, orientado a la localización de fugas no visibles en la red de agua potable. En algunos casos, menciona que existe la posibilidad de que elementos propios o externos de la red hidráulica puedan provocar una “falsa localización de fuga”.

Los fabricantes y desarrolladores de sistemas de radar de penetración de suelo describen que con el uso de antenas de alta resolución pueden identificarse instalaciones de materiales metálicos y no metálicos hasta 6 metros de profundidad. Dentro de la gama de antenas, existen modelos comerciales con frecuencias desde 2.6 GHz, hasta 15 MHz, teniendo como antenas dedicadas para la localización de tuberías e instalaciones las de frecuencias de 900 MHz, 400 MHz, y 270 MHz.

### **1.6 Aportes del trabajo**

Este trabajo contribuye al conocimiento con los siguientes aportes:

- 1) Se documentan las etapas y se explican brevemente los métodos del proceso denominado recuperación de caudales.
- 2) Se documenta el principio de funcionamiento, características más importantes, utilización e interpretación de resultados del sistema acústico de correlación, para que puedan servir como referencia a las instancias relacionadas para el uso y adquisición del equipo.
- 3) Se documenta el principio de funcionamiento, características más importantes, utilización e interpretación de resultados del radar de penetración de suelos, para que puedan servir como referencia a las instancias relacionadas para el uso y adquisición del equipo.
- 4) Se propone una metodología no destructiva mediante el sistema acústico de correlación y el radar de penetración de suelos para la localización de tomas no registradas en red.
- 5) Se comprueba experimentalmente la aplicabilidad de la metodología.

### **1.7 Organización del trabajo**

En este primer capítulo se describió el problema que se pretende resolver, se presentaron los objetivos de este trabajo y se expuso la metodología a seguir para cumplirlos. En el siguiente se documenta en qué consiste la recuperación de caudales, su importancia y en dónde está enmarcado este trabajo. En el tercer y cuarto capítulos se describen los puntos esenciales de cada uno de los sistemas, desde su principio de funcionamiento, alcances y limitantes, hasta la interpretación de resultados. El cuarto presenta una metodología que al combinar ambos sistemas, se puedan localizar tomas no registradas en red. El quinto capítulo presenta resultados experimentales en la localización real de tomas no registradas realizadas en las condiciones habituales que presentan las redes de agua potable en América latina. Finalmente, en el último capítulo se presentan las conclusiones de este trabajo.

## **Capítulo 2**

# **Panorama general de la reducción de pérdidas de agua potable en redes de distribución**

## **2.1 Introducción a los sistemas de abastecimiento de agua potable**

El agua es un elemento esencial para la vida, por lo que las antiguas civilizaciones se ubicaron a lo largo de ríos. Más tarde, los avances técnicos le permitieron al hombre transportar y almacenar el agua, así como extraerla del subsuelo, por lo cual los asentamientos humanos se han esparcido lejos de los ríos y de otras fuentes superficiales de agua.

Actualmente, su uso en las poblaciones es diverso, como lo es para consumo humano, en el aseo personal, y en actividades como la limpieza doméstica y en la cocción de los alimentos. Además, se usa para fines comerciales, públicos e industriales; también en la irrigación, la generación de energía eléctrica, la navegación y la recreación.

De la misma forma que ha evolucionado el uso del agua, lo ha hecho el término “abastecimiento de agua” que en nuestros días conlleva el proveer a las localidades urbanas y rurales de un volumen suficiente de agua, con una calidad requerida y a una presión adecuada.

Un sistema moderno de abastecimiento de agua se compone de las instalaciones para la captación, almacenamiento, conducción, bombeo, tratamiento para su consumo, distribución, desalojo y tratamiento de aguas residuales. Las obras de captación y almacenamiento permiten reunir las aguas aprovechables de ríos, manantiales y agua subterránea. Incluyen actividades como el desarrollo y cuidado de la cuenca de aportación, pozos y manantiales, así como la construcción de presas y de galerías filtrantes. La conducción engloba a los

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

canales y acueductos, así como instalaciones complementarias de bombeo para transportar el agua desde la fuente hasta el centro de distribución. El tratamiento para su consumo es la serie de procesos que le dan al agua la calidad requerida, la distribución es dotar de agua al usuario para su consumo, el desalojo consiste en transportar el agua residual a través de una red de alcantarillado y finalmente, el tratamiento de aguas residuales que tiene como objetivo eliminar sustancias contaminantes que alterarían significativamente los ecosistemas, o someterla a un tratamiento que permita reutilizarla.

En la Figura 2.1 se muestra la configuración típica de un sistema de abastecimiento de agua en localidades urbanas.

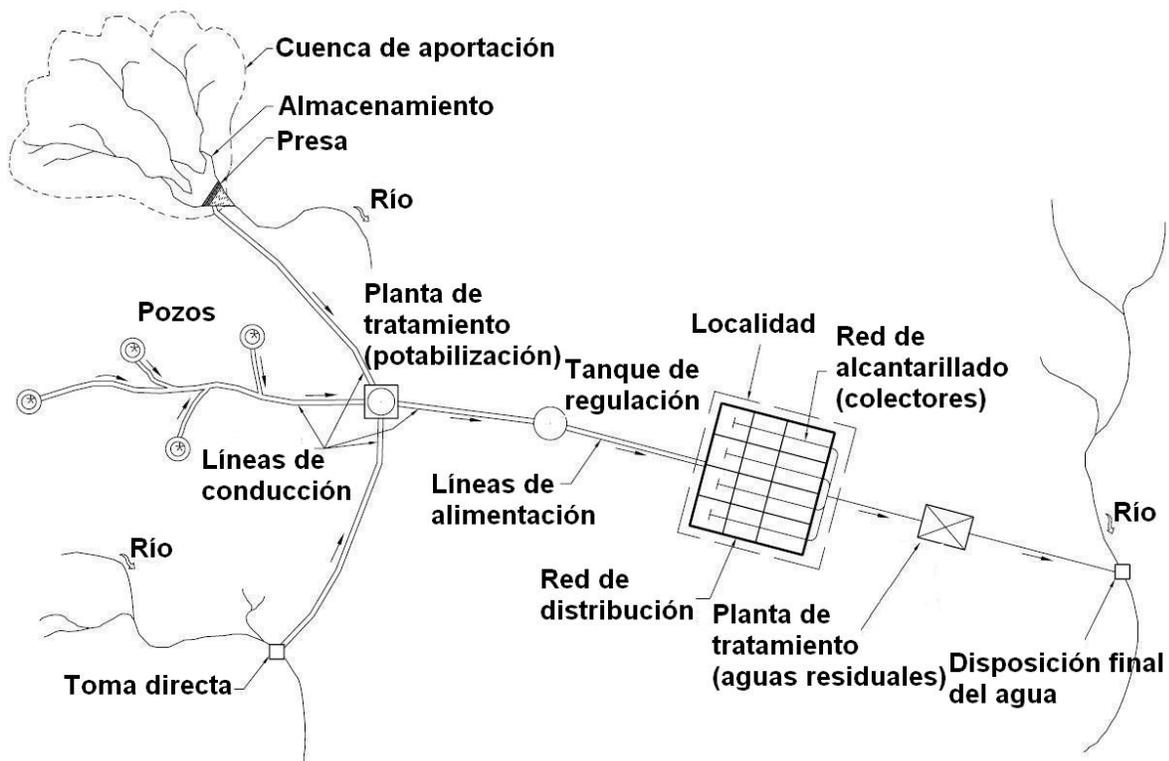


Figura 2.1 Sistema de abastecimiento de agua (CONAGUA 1996).

La historia de este tipo de sistemas se remonta a los primeros días de la ciudad de Roma, la cual recibía agua por medio de acueductos (algunos pueden ser observados incluso en esta época). Estos formaban una extensa red para traer las aguas limpias de los montes Apeninos hasta la ciudad, intercalando estanques

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

y filtros a lo largo del recorrido del agua para asegurar su claridad. La construcción de estos sistemas de suministro de agua decayó con la desintegración del Imperio Romano, y durante varios siglos, las fuentes de suministro de agua para fines domésticos e industriales fueron las fuentes y manantiales locales. No existían por supuesto plantas de tratamiento, pero los sistemas eran notables.

El invento de la bomba en Inglaterra a mediados del siglo XVI impulsó las posibilidades de desarrollo de sistemas de suministro de agua. En Londres la primera obra de bombeo de aguas se finalizó en el año 1562. Se bombeaba agua de río a un embalse a unos 37 m por encima del nivel del Támesis, y desde el embalse se distribuía a los edificios vecinos a través de tuberías, aprovechando la fuerza de la gravedad.

Aunque el drenaje ha sido siempre necesario en las ciudades, el uso de las redes de alcantarillado es relativamente reciente, siendo el estándar en Europa hasta el siglo XIX.

Gracias al avance tecnológico en el siglo XX, han sido desarrolladas técnicas avanzadas de tratamiento de agua residual, desde procesos de índole física o fisicoquímica hasta métodos biológicos. También ha aumentado el interés en la conversión de agua de mar en agua potable en regiones muy secas como en Oriente Medio. Diversos procesos como destilación, electrodiálisis, ósmosis inversa y evaporación por congelación directa se han desarrollado para este fin. A pesar de sus buenos resultados, estos procesos de tratamiento de agua de mar son mucho más costosos que el tratamiento del agua dulce.

### **2.2 Sistemas urbanos de distribución de agua potable**

Esta etapa tiene como finalidad proporcionar agua a los usuarios para su consumo doméstico, público, comercial, industrial y para condiciones extraordinarias como el extinguir incendios. Está conformada por una red de distribución (que se denominará en lo sucesivo red) que es el conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde tanques de servicio o de distribución hasta las tomas domiciliarias o hidrantes públicos. Estos componentes son

- a) Tuberías: se le llama así al conjunto formado por tubos (conductos de sección circular) y sus sistemas de unión o ensamble. Para fines de análisis se denomina tubería al conducto comprendido entre dos secciones transversales del mismo.

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

La red de distribución está formada por un conjunto de tuberías que se unen en diversos puntos denominados nodos o uniones.

De acuerdo a su función, la red de distribución puede dividirse en primaria y secundaria. A la tubería que conduce el agua desde el tanque de regulación hasta el punto donde inicia su distribución se le conoce como línea de alimentación, y se considera parte de la red primaria.

La división de la red de distribución en red primaria o secundaria dependerá del tamaño de la red y de los diámetros de las tuberías. De esta forma, la red primaria se constituye de los tubos de mayor diámetro y la red secundaria por las tuberías de menor diámetro, las cuales abarcan la mayoría de las calles de la localidad. Así, una red primaria puede ser una sola tubería de alimentación o cierto conjunto de tuberías de mayor diámetro que abarcan toda la localidad.

- b) Piezas especiales: son todos aquellos accesorios que se emplean para llevar a cabo ramificaciones, intersecciones, cambios de dirección, modificaciones de diámetro, uniones de tuberías de diferente material o diámetro, y terminales de los conductos, entre otros.

A las piezas o conjuntos de accesorios especiales con los que, conectados a la tubería, se forman deflexiones pronunciadas, cambios de diámetro, derivaciones y ramificaciones, se les llama cruceros. También permiten el control del flujo cuando se colocan válvulas.

- c) Válvulas: son accesorios que se utilizan para disminuir o evitar el flujo en las tuberías. Pueden clasificarse de acuerdo a su función en 2 categorías:
  - 1) *aislamiento o seccionamiento*, las cuales son utilizadas para separar o cortar el flujo del resto del sistema de abastecimiento en ciertos tramos de tuberías, bombas y dispositivos de control con el fin de revisarlos o repararlos; y
  - 2) *control*, usadas para regular el gasto o la presión, facilitar la entrada de aire o la salida de sedimentos o aire atrapados en el sistema.
- d) Hidrantes: se le llama de esta manera a las tomas o conexiones especiales instaladas en ciertos puntos de la red con el propósito de abastecer de agua a varias familias (hidrante público) o conectar una manguera o una bomba destinadas a proveer agua para combatir el fuego (hidrantes contra incendio).

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Los hidrantes públicos son tomas compuestas usualmente por un pedestal y una o varias llaves comunes que se ubican a cierta distancia en las calles para dar servicio a varias familias. El agua obtenida del hidrante público es llevada a las casas en contenedores tales como cubetas u otros recipientes. Se utilizan en poblaciones pequeñas en los casos donde las condiciones económicas no permiten que el servicio de agua potable se instale hasta los predios de los usuarios.

- e) Tanques de distribución: es un depósito situado generalmente entre la captación y la red de distribución que tiene por objeto almacenar el agua proveniente de la fuente. El almacenamiento permite regular la distribución o simplemente prever fallas en el suministro, aunque algunos tanques suelen realizar ambas funciones.

Se le llama tanque de regulación cuando guarda cierto volumen adicional de agua para aquellas horas del día en que la demanda en la red sobrepasa al volumen suministrado por la fuente. La mayor parte de los tanques existentes son de este tipo.

Algunos tanques disponen de un volumen de almacenamiento para emergencias, como en el caso de falla de la fuente. Este caso es usualmente previsto por el usuario, quien dispone de cisternas o tinacos, por lo que en las redes normalmente se utilizan tanques de regulación únicamente.

Una red de distribución puede ser alimentada por varios tanques correspondientes al mismo número de fuentes o tener tanques adicionales de regulación dentro de la misma zona de la red con el fin de abastecer sólo a una parte de la red.

- f) Tomas domiciliarias: es el conjunto de piezas y tubos que permiten el abastecimiento desde una tubería de la red de distribución hasta el predio del usuario, así como la instalación de un medidor. Es la parte de la red que demuestra la eficiencia y calidad del sistema de distribución pues es la que abastece de agua directamente al consumidor. Por cuestiones de interés de la presente tesis, se hará una descripción más profunda de este componente.

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Está constituida por dos elementos básicos: el ramal y el cuadro. A continuación se describen los componentes de estos elementos que se interconectan o se colocan para formar la toma domiciliaria:

1) Ramal. Es la parte de la toma domiciliaria cuya función es la conducción del agua de la tubería de la red de distribución, hacia la instalación hidráulica intra-domiciliaria. Da inicio en el acoplamiento con la tubería de la red y concluye en el codo inferior del primer tubo vertical del cuadro. Para su instalación, conexión y operación, esta parte de la toma domiciliaria está conformada por las piezas que a continuación se describen:

Abrazadera. Corresponde a la pieza que se coloca en la tubería de distribución, proporcionando el medio de sujeción adecuado para recibir al insertor (llave de inserción o adaptador). La abrazadera es la parte de la toma domiciliaria que hace hermética la perforación de la tubería de la red y mediante una salida llamada derivación, permite la interconexión con la tubería del ramal.

Insertor. Es la pieza que permite unir la abrazadera con la tubería del ramal, roscándose en ésta y con salidas adaptables para diferentes tipos de tubería flexible.

Tubería flexible. Corresponde a la parte del ramal cuya función es absorber un posible desplazamiento diferencial del terreno entre la red de distribución y la toma domiciliaria, para lo cual se realiza una deflexión a la tubería flexible, conocida como "cuello de ganso", durante su instalación.

Llave de banqueteta. Es un elemento fabricado generalmente con bronce, que permite el corte del flujo o cierre de la toma, para realizar reparaciones o limitar el servicio, sin necesidad de excavar el terreno del lugar en donde se encuentra la toma, ya que se tiene acceso desde el exterior a través de la caja de banqueteta.

2) Cuadro. Es la parte de la toma domiciliaria que permite la instalación de: el medidor, la válvula de globo y la llave de manguera. Las dimensiones promedio son: 0.60 m de altura a partir del nivel del piso, que permite tomar las lecturas del medidor y 0.50 m de largo, aproximadamente, para colocar el medidor y los accesorios que se requieran. Las piezas más importantes son:

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

**Medidor.** Dispositivo encargado de llevar un registro del consumo realizado por el usuario. Su selección depende básicamente de tres aspectos: calidad del agua, régimen de operación del sistema y del consumo por registrar.

**Válvula de globo.** Sirve para interrumpir el flujo del agua cuando se efectúa una reparación en el cuadro de la toma; se instala antes del medidor si el cuadro no cuenta con llave de banqueta; en caso contrario, se instala después del mismo.

**Llave de manguera:** es la primera llave de uso para el propietario del inmueble y además sirve para: toma de muestras de agua para verificar su calidad, probar el funcionamiento del medidor y medir la presión disponible en la toma.

Los elementos descritos anteriormente que conforman una toma domiciliaria pueden ser visualizados en la Figura 2.2:

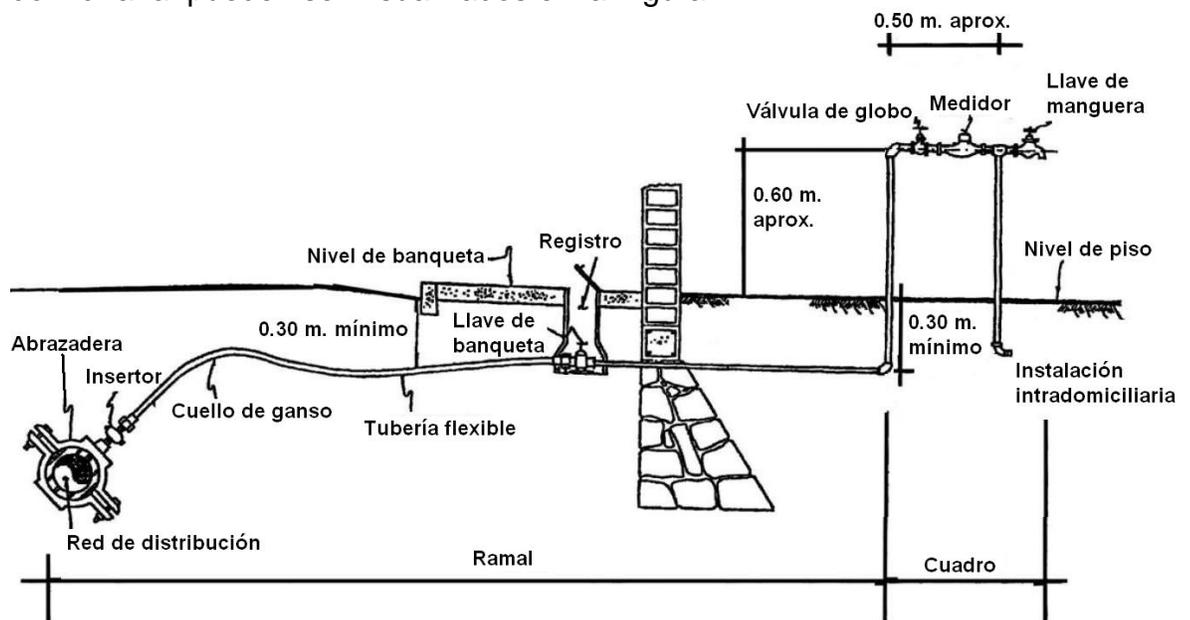


Figura 2.2 Componentes básicos de toma domiciliaria (Tzatchkov 2007)

- g) **Rebombeos:** consisten en instalaciones de bombeo que se ubican generalmente en puntos intermedios de una línea de conducción y excepcionalmente dentro de la red de distribución. Tienen el objetivo de elevar la carga hidráulica en el punto de su ubicación para mantener la

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

circulación del agua en las tuberías. Los rebombes se utilizan en la red de distribución cuando se requiere:

- interconexión entre tanques que abastecen diferentes zonas
  - transferencia de agua de una línea ubicada en partes bajas de la red al tanque de regulación de una zona de servicio de una zona alta
  - incremento de presión en una zona determinada mediante rebombeo directo a la red. Esta última opción se debe evitar, y considerar sólo si las condiciones de la red no permiten la ubicación de un tanque de regulación en la región elevada.
- h) Cajas rompedoras de presión: son depósitos con superficie libre del agua y volumen relativamente pequeño, cuya función es permitir que el flujo de la tubería se descargue en ésta, eliminando de esta forma la presión hidrostática y estableciendo un nuevo nivel estático aguas abajo.

### 2.3 Pérdida física y económica

Para un sistema de distribución de agua, la eficiencia del mismo es un indicador de las calidades del servicio e infraestructura, y está relacionada con el volumen de agua facturado (volumen consumido por el usuario final y medido adecuadamente), y el volumen de agua suministrado.

$$\text{eficiencia} = \frac{\text{volumen facturado}}{\text{volumen suministrado}} \times 100 \quad (2.1)$$

La diferencia entre los volúmenes de estas cantidades se denomina pérdidas.

$$\text{pérdidas} = \text{volumen suministrado} - \text{volumen facturado} \quad (2.2)$$

Éstas se deben a distintos motivos, y es útil la siguiente clasificación:

$$\text{pérdidas de agua} \left\{ \begin{array}{l} \text{pérdida comercial} \\ \text{pérdida física} \end{array} \right.$$

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

*Pérdida comercial.* Se refiere al agua que es utilizada o consumida en algún punto de la red de distribución de agua y que no es posible cuantificarla con exactitud en forma normal, sino que es necesario implementar acciones y estrategias encaminadas a la estimación de esta pérdida. Las causas que provocan este tipo de pérdida son:

- a) Errores administrativos y/o humanos. Principalmente se refiere a un error en la toma de la lectura en el medidor (debido a las condiciones del lugar o la experiencia, metodología y preparación del encargado); debido a un error en la facturación (por tener un mal registro de los datos obtenidos o debido a un inadecuado procedimiento de facturación), o bien, debido a errores de estimación de cuotas fijas (que se debe al establecer cuotas que no dependen del consumo)
- b) Deficiencias técnicas de los medidores. Se deben al tiempo de vida de los medidores o por fallas técnicas en su operación, lo cual puede ocasionar submediciones o sobre-mediciones.
- c) Existencia de tomas no registradas en red (usos clandestinos). Son conexiones de cualquier tipo no registradas en el padrón de usuarios y que por lo tanto no son facturadas. Por lo regular, su construcción es idéntica al de la toma como fue descrita en la sección anterior.

*Pérdida física.* Se refiere a pérdida real de agua, es decir, agua que escapa de alguno de los elementos de la red de distribución. Este escape se denomina *fuga de agua*, y puede ser descrito como el “*escape del agua por la pared de la tubería, sus dispositivos de unión y accesorios. Se considera fuga a partir de un escurrimiento.*” Éstas ocurren por fallas en los componentes del sistema de distribución o por usos operacionales no controlados. Las fallas pueden tener su origen en el diseño del sistema, en su construcción, en los materiales empleados y en deficiencias de la operación o mantenimiento. Las fallas por materiales se dan cuando éstos no cumplen con las especificaciones técnicas requeridas o cuando su selección no es adecuada para determinadas aplicaciones. Para los organismos operadores, son de especial interés las que se encuentran en:

- a) tuberías
- b) piezas especiales
- c) válvulas (cajas)
- d) tomas domiciliarias.

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Las fugas de agua que se encuentran después del medidor se denominan “intra-domiciliarias” y de manera ideal, están dentro del volumen consumido por el usuario. Las fugas de agua en la red de agua potable además provocan los siguientes efectos negativos en la operación de la red:

- Contaminación del agua al introducirse agua sucia, raíces o tierra, por la rotura de la tubería.
- Aumento del consumo de cloro, ya que se diluye a medida que el agua recorre la red de distribución y va saliendo por las fugas pendientes por recuperar.
- Aumento del consumo de energía eléctrica, porque se bombea el agua que se escapa y se necesita mayor presión para que llegue a los lugares más alejados de la red.
- Inundación de áreas que normalmente son secas.

La Figura 2.3 imagen es útil para definir los distintos tipos de pérdida (que puede ser denominado también como volumen no facturado)

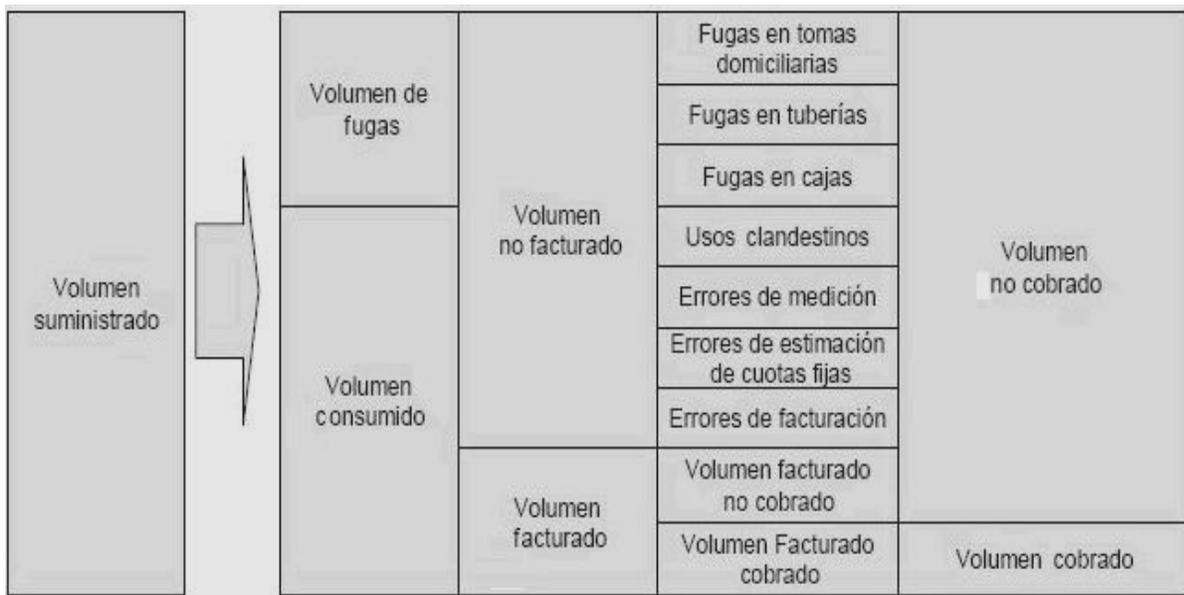


Figura 2.3 División del volumen suministrado en una red de agua potable (Tzatchkov 2007).

## 2.4 Reducción integral de pérdidas de agua potable

El implementar un programa que permita aumentar la eficiencia en la red de distribución conlleva grandes beneficios como son:

- Conservar el agua suministrada a las ciudades
- Mejorar la calidad del servicio proporcionado a la población por el organismo operador
- Reducir gastos de energía eléctrica y potabilización
- Aumentar los ingresos por la facturación a los usuarios.

A este proceso se le puede nombrar como la reducción integral de pérdidas de agua. Éste es un proceso dinámico, que inicia con un diagnóstico, el cual involucra el control y eliminación de fugas. Si es aplicado en forma precisa esta reducción de pérdidas a la operación y mantenimiento de los sistemas de agua potable, se puede alcanzar los beneficios anteriormente mencionados.

Este proceso requiere necesariamente en su ejecución una supervisión directa, con el objeto de que las acciones que se deriven de ella se fundamenten en datos reales y en un análisis preciso.

Las actividades correspondientes a una reducción integral de pérdidas se enmarcan en cuatro etapas, como se muestra en la Figura 2.4:

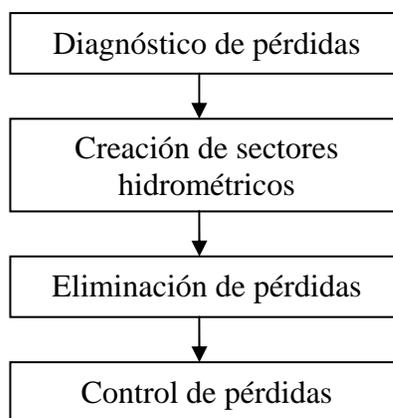


Figura 2.4 Diagrama de flujo básico de la reducción integral de pérdidas de agua

A continuación se describe brevemente cada una de las etapas.

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

**2.4.1 Diagnóstico de pérdidas.** Es la base de la reducción integral; en él se evalúan los volúmenes de agua que se pierden y sus principales patrones de ocurrencia. Se identifican las causas de las pérdidas mediante el análisis de estadísticas y muestreos de campo. Se realizan además análisis técnicos económicos de la reducción de pérdidas y la factibilidad de llevarla a cabo. Se basa en estudios de muestreo y estadísticos, sobre el estado físico que guarda la red de distribución. Se debe definir un periodo de estudio, el cual se recomienda que sea de 12 meses, para incluir las variaciones del consumo debido a la estación del año.

Posteriormente se realiza el balance mostrado en la Figura 2.5:

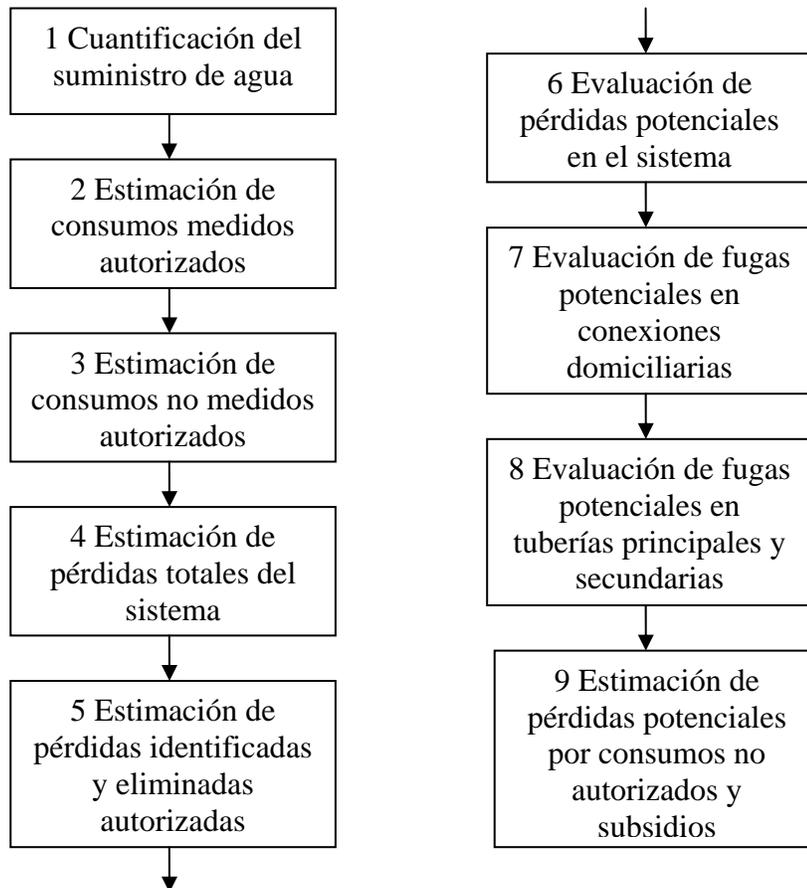


Figura 2.5 Balance de un sistema de agua.

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Los resultados de este balance son un buen indicador del tamaño de los problemas de las pérdidas, dando indicios de la magnitud del problema particular (fugas en conexiones domiciliarias, en tuberías principales y secundarias o de los volúmenes no contabilizados o subsidiados). De esta manera, podrá asignarse de mejor manera recursos económicos y humanos para cada punto específico.

**2.4.2 Creación de sectores hidrométricos.** Consiste en dividir la red en zonas más pequeñas, las cuales tienen determinadas características y cada división es conocida como distrito hidrométrico. Esto facilita la reducción, la eliminación y control de pérdidas.

Esta actividad permite una mejor operación y control de la distribución y por consecuencia de los volúmenes de agua, además proporciona los elementos para realizar balances hidráulicos dentro del sector y poder evaluar de forma global la existencia de pérdidas de agua.

Cada sector se puede aislar hidráulicamente de la red de distribución con movimiento de válvulas y que pueden utilizarse para precisar el diagnóstico, detectar fugas, facilitar la eliminación y optimizar el control de pérdidas en una localidad. Una representación de un sector puede ser observada en la Figura 2.6.

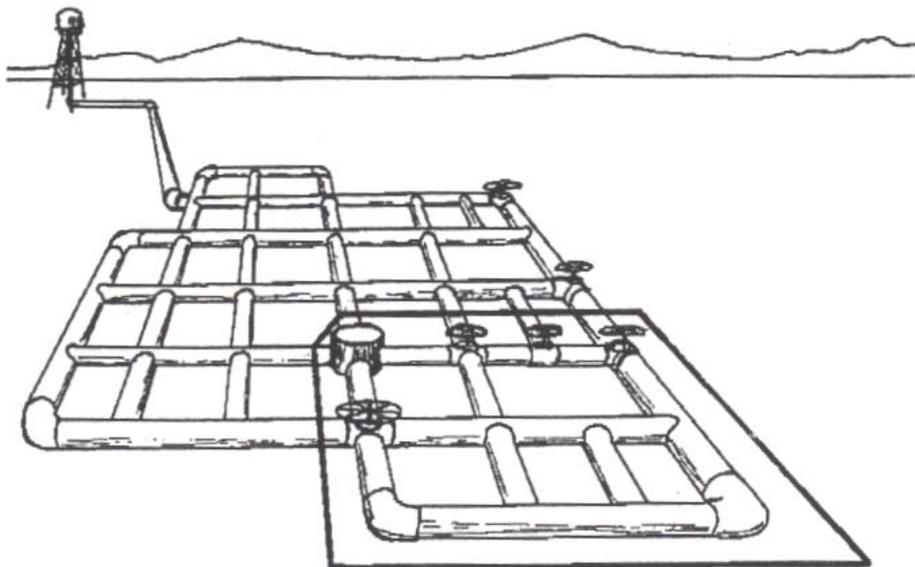


Figura 2.6 Creación de sector hidrométrico en una red de agua potable (López 2001).

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Para planear un proyecto de creación de sectores hidrométricos de una red de distribución se debe considerar de inicio el catastro de la red, lo más actualizado posible el cual permitirá obtener información confiable que ayude en la toma de decisiones y poder subdividirla en el número de sectores como se estime conveniente.

Para la creación de sectores es importante obtener cierta información acerca de la red de distribución (catastro técnico) y de la forma de operación real (datos hidráulicos de la red).

Con esta información se formará un modelo numérico de la red, la cual se calibrará. Posteriormente se procede a la creación de sectores de la red mediante distritos hidrométricos, con la cual se podrá obtener información confiable y de fácil control. Para los valores de los volúmenes que ingresan al sector se requiere contar con equipos de macro-medición (medidores de gasto en líneas principales), por lo cual es importante realizar una adecuada selección del mismo.

Los beneficios que brinda en cada una de las etapas de la reducción integral de pérdidas son los siguientes:

- En el *diagnóstico*, los distritos hidrométricos proporcionan información sobre los volúmenes de fugas que se tienen en líneas principales y secundarias, consumos unitarios de usuarios y usos no autorizados.
- En la *detección de fugas* son utilizados para definir sectores con mayor incidencia de pérdidas de agua a través de indicadores de consumo.
- Durante la *eliminación de pérdida física*, evitan que el agua de fugas reparadas en un distrito ingrese a otros sectores en donde no se han efectuado a cabo programas de reducción.
- En el *control de pérdidas* hacen más eficiente el establecimiento de los subproyectos básicos (catastro técnico de la red, macro-medición, control operacional, etcétera)

**2.4.3 Eliminación de pérdidas.** Es definir los procedimientos, diseños, equipos y modelos de decisión, que faciliten la búsqueda de pérdidas y subsanen el daño existente. Son todas aquellas acciones que se realizan directamente al sistema de agua potable, con el fin de recuperar agua tanto de manera física como de manera contable.

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Para reducir la pérdida económica:

a) Errores en la facturación y toma de lecturas:

- Se deberá capacitar adecuadamente al personal involucrado, estableciendo estrategias adecuadas para la toma de lecturas.
- Revisar cuidadosamente los contratos, padrón de usuarios, inventario de medidores, para detectar predios que no se tienen registrados o que no se miden.

b) Deficiencia técnicas de los medidores

- Realizar una adecuada selección de los medidores tomando criterios como los consumos de la zona, las condiciones generales de trabajo y la calidad de agua que va a circular por el medidor.
- Llevar un registro del periodo de vida que tiene el medidor de acuerdo al fabricante, establecer programas de mantenimiento preventivo y de ser posible contar con un taller para reducir las pérdidas por deficiencias técnicas.

c) Localización de tomas no registradas en red. La metodología será desarrollada en detalle en el capítulo 5. Se observará que es una metodología mixta, ya que implica análisis cualitativo (sobre el tipo de predio) y cuantitativo (históricos de consumo, utilización de tecnología en campo).

La reducción de pérdida física (detección de fugas de agua en la red de agua potable) se forma básicamente de dos etapas, que pueden ser observadas en la Figura 2.7.

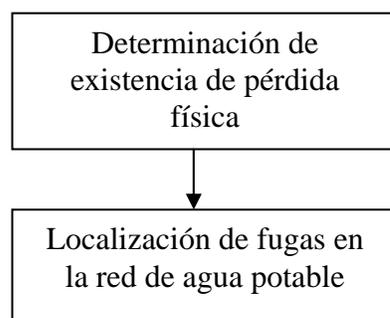


Figura 2.7 Esquema básico de la eliminación de pérdida física.

La determinación de existencia de pérdida física se puede realizar de dos maneras, a continuación se describe cada una de ellas:

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

**2.4.3.1 Determinación de fugas por caída de presión.** Para utilizar este método, se requiere medir la presión en algunos puntos de contacto con la tubería que se inspecciona. Normalmente se utilizan tomas domiciliarias por facilidad, rapidez y economía, ya que se evita tener que hacer alguna conexión especial en la tubería. La presión en las tuberías se mide con un manómetro comercial, adaptado a una manguera y a una conexión del tipo que tienen las llaves de las casas.

Las fugas se pueden detectar midiendo la presión a lo largo de las tuberías de la red del sistema de abastecimiento. Cuando la presión cae de pronto en el sentido del flujo de agua, entonces se puede considerar que en ese punto hay una fuga. Es importante mencionar que una caída de presión puede deberse también a la salida de agua por otro tubo conectado a la tubería que se está inspeccionando, por ejemplo, un consumo mediante una toma domiciliaria. Por tanto, se deben identificar interconexiones de la red y asegurarse mientras se realiza la toma de presión que no existan consumos en el tramo.

Como criterio de detección, hay que considerar que en un tramo que tiene una fuga cuando existe una caída de presión de 10% o mayor entre una toma domiciliaria y otra contigua, por ejemplo, si en una toma domiciliaria se registra una presión de  $1.40 \text{ kg/cm}^2$  y en otra contigua en el sentido de flujo es de  $1.25 \text{ kg/cm}^2$ , entonces puede haber una fuga.

Una vez realizado el estudio en una sección de la red, se determinarán tramos donde se sospeche la existencia de fugas, y éstas serán localizadas con equipo especializado (que será explicado en la etapa de localización de fugas en la red de agua potable). Este procedimiento es el recomendado cuando no se cuenta con distritos hidrométricos.

**2.4.3.2 Determinación de fugas por distritos hidrométricos.** Este método determina si el sector o zona del sistema presenta un porcentaje alto de fugas de agua. Para que se aplique efectivamente este método, primeramente se debe disponer de planos de la red actualizados. Al utilizar este método, se deberá asegurar que existan válvulas funcionando en los cruceros, y tener los recursos para colocar físicamente una estación de macro-medición del caudal. Esta técnica consta de los siguientes pasos:

a) Aislar hidráulicamente un sector de la red de distribución, mediante el cierre de las válvulas de los cruceros que lo limitan por distrito hidrométrico.

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

b) Cada “x” minutos (por ejemplo, cada 15 minutos), medir el volumen abastecido a la entrada del distrito hidrométrico al menos durante 24 horas, utilizando macro-medidores de caudal. Con estas mediciones, se debe construir una gráfica de caudal suministrado contra tiempo. Un ejemplo de la misma puede ser observada en la Figura 2.8.

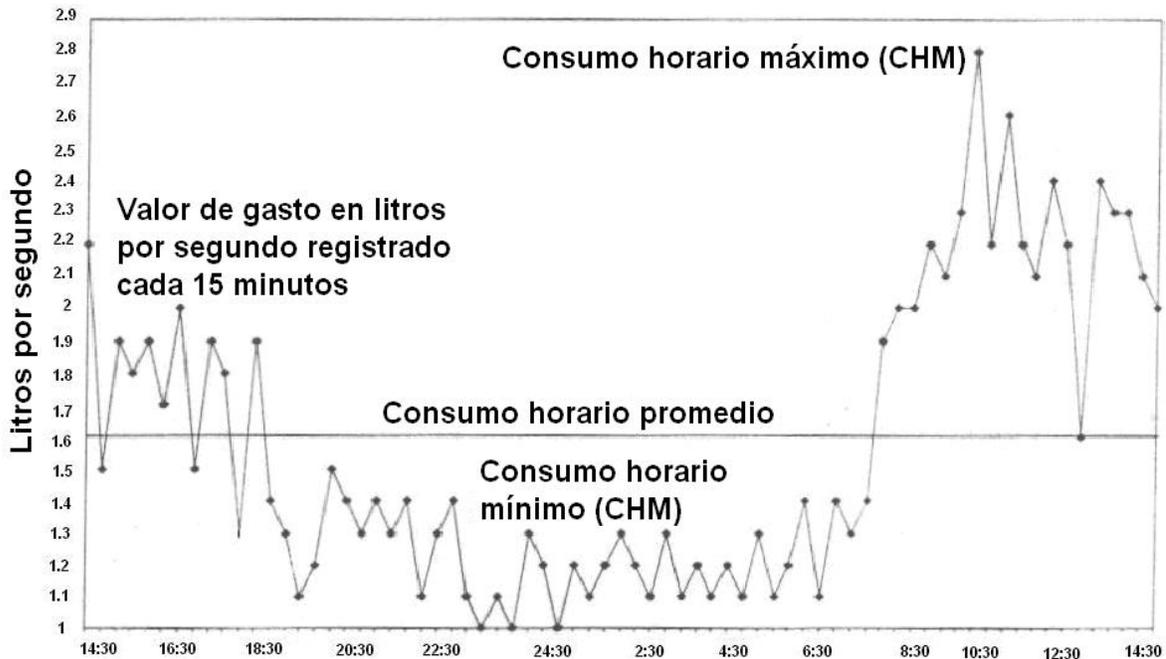


Figura 2.8 Gráfica de caudal en un distrito hidrométrico contra tiempo (López 2001).

c) Con los datos de la gráfica se calculan los indicadores siguientes:

$$CT = \text{consumo total en 24 horas, en } m^3/\text{día} \quad (2.3)$$

Este indicador corresponde al volumen total suministrado al distrito hidrométrico durante el periodo de 24 horas, se obtiene al integrar la gráfica de caudal durante el intervalo de 24 horas. La gráfica puede convertirse a  $m^3/h$  si multiplicamos los

$$L/s \text{ por un factor de } \left( \frac{m^3}{1000L} \right) \left( \frac{3600s}{h} \right) = 3.6$$

$$CHP = \text{consumo horario promedio en } m^3/h \quad (2.4)$$

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Para obtenerlo, se divide el CT entre 24:

$$CHP = \frac{CT}{24 \text{ horas}} \quad (2.5)$$

$$CHM = \text{consumo horario máximo en } m^3/h \quad (2.6)$$

De la gráfica de medición se selecciona el valor máximo de caudal de entrada al distrito hidrométrico ocurrido durante las 24 horas.

$$CMN = \text{consumo mínimo nocturno, en } m^3/h \quad (2.7)$$

De la gráfica se selecciona el menor valor de caudal suministrado al distrito hidrométrico (regularmente éste sucede en el horario comprendido entre las 0:00 y las 5:00 horas).

$$ICHM = \text{índice de consumo horario máximo} \quad (2.8)$$

Se divide el consumo horario máximo CHM entre el consumo horario promedio CHP:

$$ICHM = \frac{CHM}{CHP} \quad (2.9)$$

$$ICMN = \text{índice de consumo mínimo nocturno} \quad (2.10)$$

Se divide el consumo mínimo nocturno CMN entre el consumo horario promedio CHP:

$$ICMN = \frac{CMN}{CHP} \quad (2.11)$$

$$CEP = \text{consumo específico promedio, en } m^3/h/km \quad (2.12)$$

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Se divide el consumo horario promedio CHP entre la longitud total (en kilómetros) de tubería principal y secundaria del distrito ( $d$ ).

$$CEP = \frac{CHP}{d} \quad (2.13)$$

d) Analizar los resultados y determinar los niveles aproximados así como la posibilidad de fugas en el distrito hidrométrico. Algunas recomendaciones para el mismo:

Si el distrito hidrométrico en estudio es de uso doméstico solamente, el índice de consumo mínimo nocturno (ICMN) indica la intensidad de las fugas. Si el valor del índice es más grande que 0.2 (20%) los niveles de fuga son altos y es recomendable hacer un estudio de localización de fugas de agua en red.

Cuando existen grandes consumidores en el distrito hidrométrico, por ejemplo fábricas de hielo o refrescos, hoteles y hospitales entre otros, al consumo mínimo nocturno se deben restar los valores consumido por estos grandes usuarios entre las 0:00 y las 05.00 horas de medición, al valor del volumen total suministrado. Con este resultado se obtiene el índice de consumo nocturno doméstico:

$$ICONOD = \left[ \frac{(CMN - cmn)}{(CHP - chp)} \right] \times 100 \quad (2.14)$$

Donde  $chp$  es el consumo horario promedio de los grandes consumidores (en  $m^3/h$ ), el  $cmn$  es el consumo mínimo nocturno de los grandes consumidores (en  $m^3/h$ ) obtenido durante las 24 horas de la medición. El índice ICONOD sirve para eliminar la influencia de los grandes consumidores en el ICMN, y para considerarlo como un índice de fugas más fidedigno. Si el valor del ICONOD es mayor que 20, entonces es necesario hacer un estudio más detallado de búsqueda de fugas.

**2.4.3.3 Localización de fugas en la red de agua potable.** A continuación se describe la metodología de detección de fugas de agua mediante la utilización de tecnología especializada. Estos aparatos se basan en detectar el sonido o vibración provocada por la existencia de una fuga, que puede encontrarse en la red primaria, secundaria (tuberías o accesorios) o en la toma domiciliaria.

Las fugas en la red se presentan a consecuencia de la corrosión interna o externa, defectos de fabricación del material, exceso de cargas, defectos constructivos, o

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

combinaciones de todas estas circunstancias. El caudal aproximado de pérdida se encuentra entre 0.25 L/s hasta 10 L/s, y en ocasiones más. Las fugas en las acometidas se presentan como rajaduras, perforaciones, corte y en piezas flojas. El caudal aproximado de pérdida se encuentra entre 0.02 L/s a 0.25 L/s. (Según datos del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA )

Al existir una fuga en un conducto cerrado (tubería), se genera una vibración que se produce por la fricción del fluido escapando a través de la ruptura. La energía generada por la fuga es transmitida a través del agua y también a través de la pared de la tubería. Este fenómeno puede ser observado en la Figura 2.9.

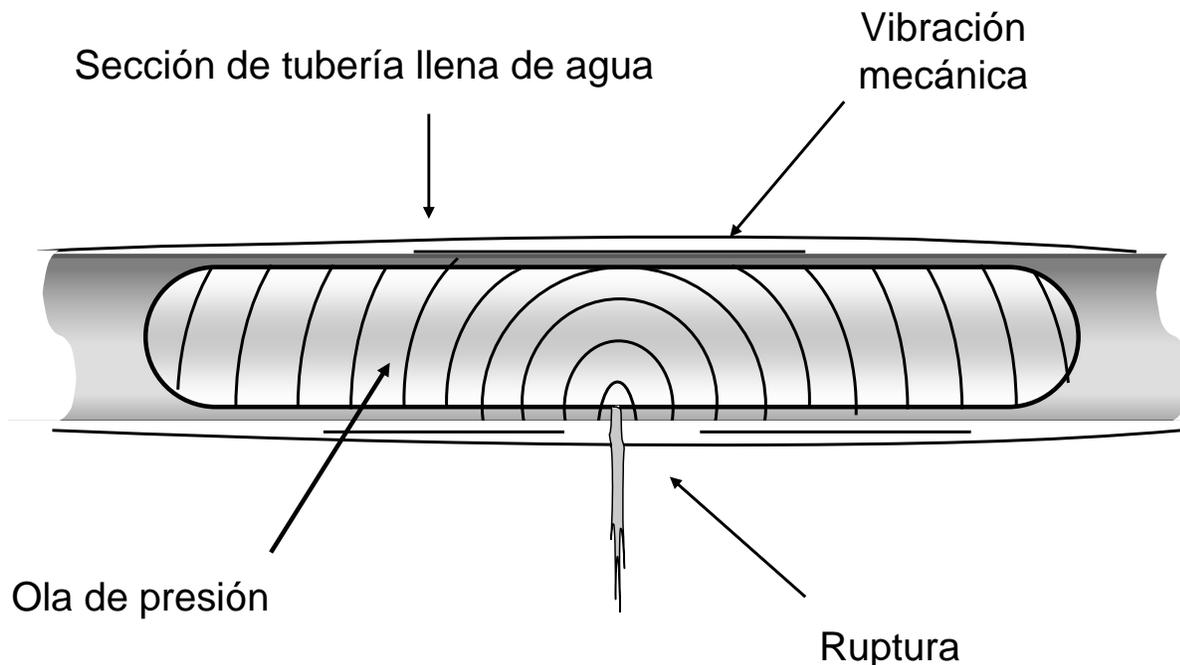


Figura 2.9 Vibración dentro de la pared de una tubería debido a la presencia de una fuga (Chyuan 2007).

El fenómeno se caracteriza porque la vibración es captada en forma de "ruido", mismo que será directamente proporcional a la presión interna del tubo: a mayor presión, mayor ruido y viceversa.

El ruido de la fuga, además de estar en función de la presión interna, dependerá del medio en el cual se propaga, esto es, en una tubería de mayor rigidez (por ejemplo acero, asbesto), la vibración será más intensa, mientras que en una

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

tubería de poca rigidez (por ejemplo PVC, polietileno), la vibración será de baja intensidad. Por lo anterior, será más complicada la detección de este ruido en una tubería de baja rigidez.

De manera similar, cuando el terreno que rodea a la fuga sea rígido, existirá una vibración/ruido notable en el terreno asociada a la fricción del agua contra el suelo, lo que facilitará su detección, como puede ser observado en la Figura 2.10. En cambio, en un terreno blando, el agua generará rápidamente una cavidad que se llenará de agua, esto amortiguará la vibración y hará más difícil la detección del ruido de la fuga, como se observa en la Figura 2.11.

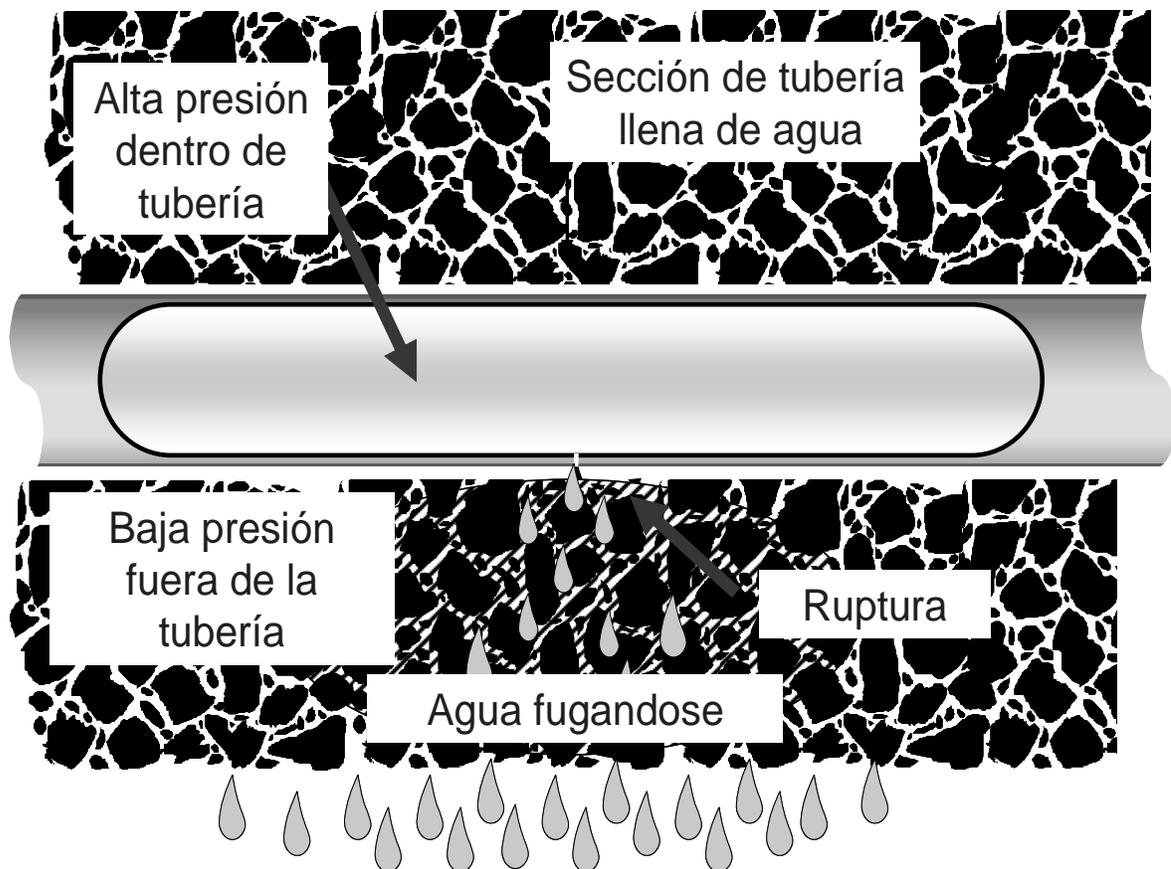


Figura 2.10 Fuga en suelo rígido (Chyuan 2007).

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

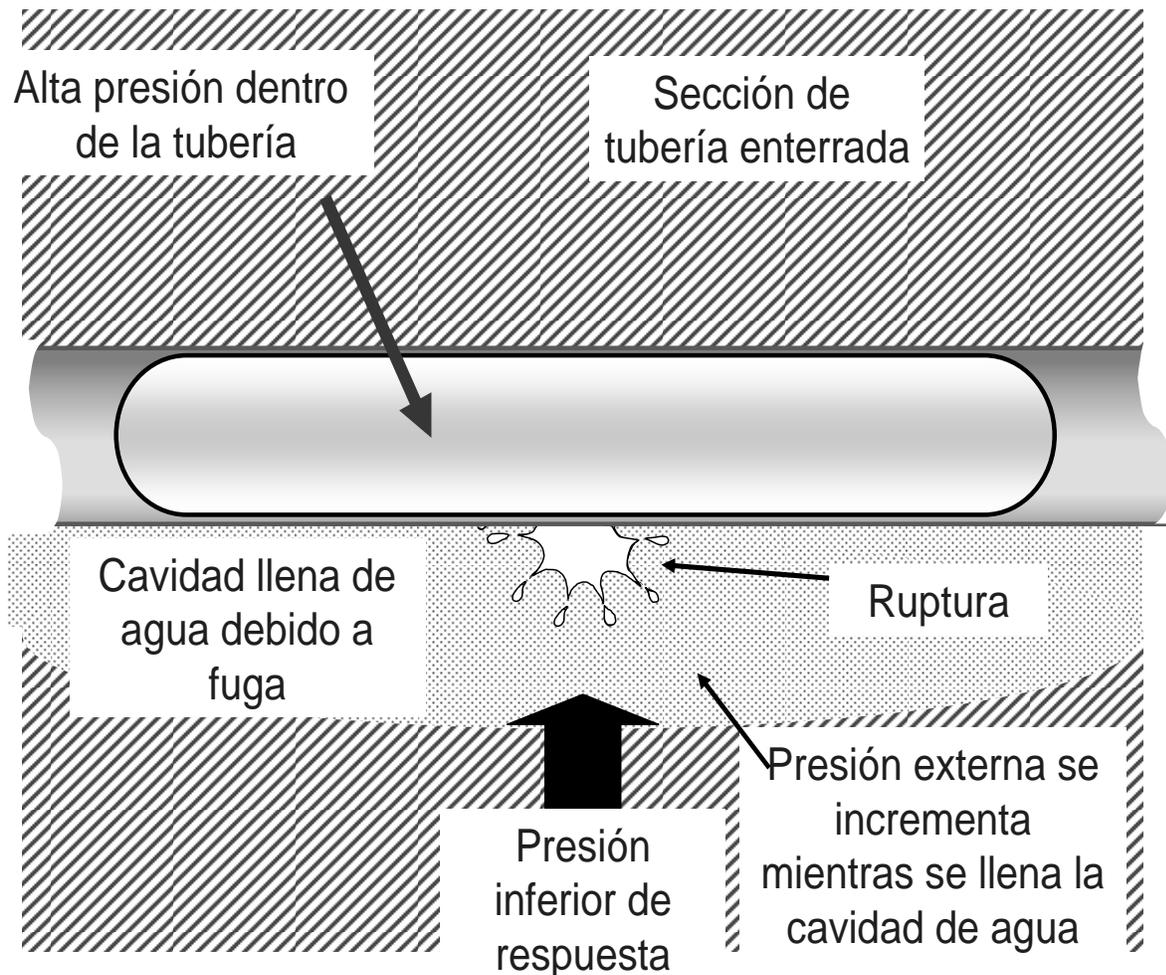


Figura 2.11 Fuga en suelo blando (Chyuan 2007).

Otro factor a considerar es el tamaño de la ruptura. Si ésta es pequeña, la aceleración del flujo se incrementará considerablemente, provocando una gran fricción contra la pared del tubo y por lo tanto, una mayor vibración/ruido. Si en cambio, se presenta una ruptura completa de la sección, la fricción disminuirá considerablemente al haber una baja oposición de las paredes y por ello, la vibración/ruido será baja, haciendo difícil su detección, como puede ser visualizado en la Figura 2.12.

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

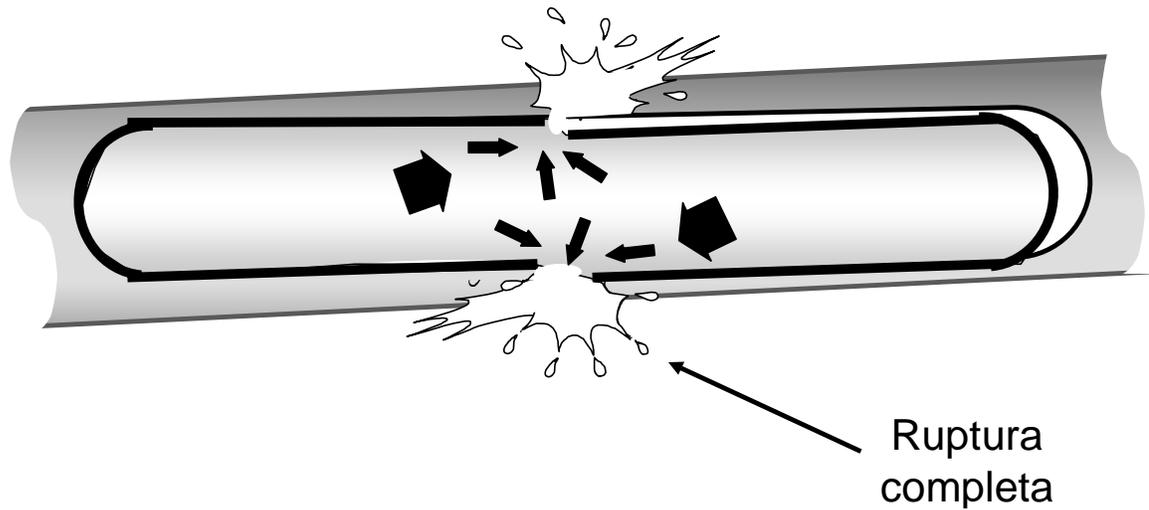


Figura 2.12 Ruptura completa en tubería de agua potable (Chyuan 2007).

La localización acústica – instrumentada de fugas, funciona debido a que las fugas causan vibraciones que viajan a través de la pared del tubo de conducción y el subsuelo cercano a la misma, las cuales disminuyen conforme se alejan del punto de fuga. Debido a ese “ruido”, el primer método para la detección de fugas consistió en colocar una barra metálica contra el piso, y guiar la vibración/ruido a través de ella para escucharla con mayor nitidez. En el punto donde el operador detectaba mayor ruido era donde se consideraba la existencia de una fuga.



Figura 2.13 Localización de fugas mediante varillas en el Reino Unido durante la década de los 30. Éste método se sigue utilizando en ciertas regiones del mundo y en la República Mexicana (Chyuan 2007).

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

El ruido producido por la fuga se mide de igual manera que para medir los niveles de audio, es decir, mediante el nivel de presión del sonido en decibeles

$$dB_s = 20 \log_{10} \frac{P}{0.0002 \mu bar} \quad (2.15)$$

Esto se debe a que el oído humano responde de forma logarítmica a cambios de los niveles de la potencia de audio. Esta base se seleccionó con un nivel de referencia de 0.0002 microbar ( $\mu bar$ ), donde 1  $\mu bar$  es igual a la presión de sonido de 1 dina por centímetro cuadrado, o aproximadamente 1 millonésimo de la presión atmosférica normal a nivel de mar. El nivel de 0,0002  $\mu bar$  es el nivel de umbral de audición.  $P$  es la presión del sonido en  $\mu bar$ .

El estudio de los niveles de ruido de una fuga fue de importancia relevante, ya que determinó que, bajo ciertas condiciones, era poco probable encontrar fugas con un nivel menor a los 40 dB, por lo que podían no ser detectadas mediante varillas (escucha directa). La Figura 2.14 muestra los niveles de sonido típicos y el rango de las fugas de agua.



Figura 2.14 Niveles típicos de sonido y niveles de ruido de fuga.

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

La localización de fugas en la red es la localización de las fugas en las tuberías o accesorios de la misma y cuenta con las siguientes etapas, como se muestra en la Figura 2.15. Cada etapa tiene asociado un equipo específico y un procedimiento:

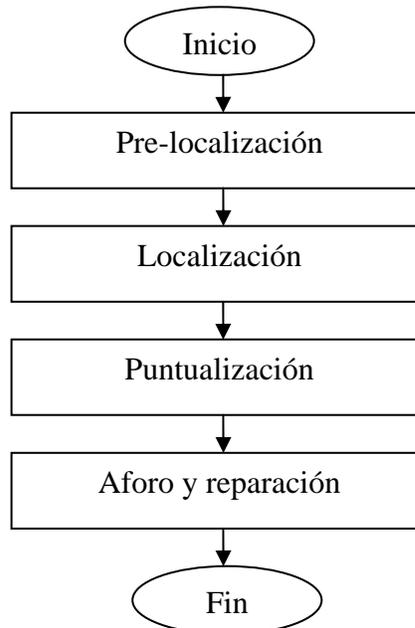


Figura 2.15 Etapas de la localización de fugas de la red de agua potable.

**Pre-localización:** Basados en un algoritmo estadístico, los pre-localizadores están diseñados para identificar la probabilidad de presencia o ausencia de ruidos de fuga en una zona determinada. Su uso permite hacer una detección “gruesa” en grandes distancias de la red, y con base en sus resultados, definir los sitios (tramos de red) donde se amerite realizar una detección puntual de la fuga. Estos registradores se colocan a lo largo de la red hidráulica. Los lugares recurrentes de instalación son: sobre válvula, o la brida, e incluso acometidas, como puede ser observado en la Figura 2.6. Estos sensores se colocan a cierta distancia dependiendo el diámetro y material de tuberías.



Figura 2.16 Colocación de sensor sobre vástago de válvula.

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Supóngase la siguiente configuración de red como se muestra en la Figura 2.17, y son instalados cuatro registradores de pre-localización en cuatro puntos.

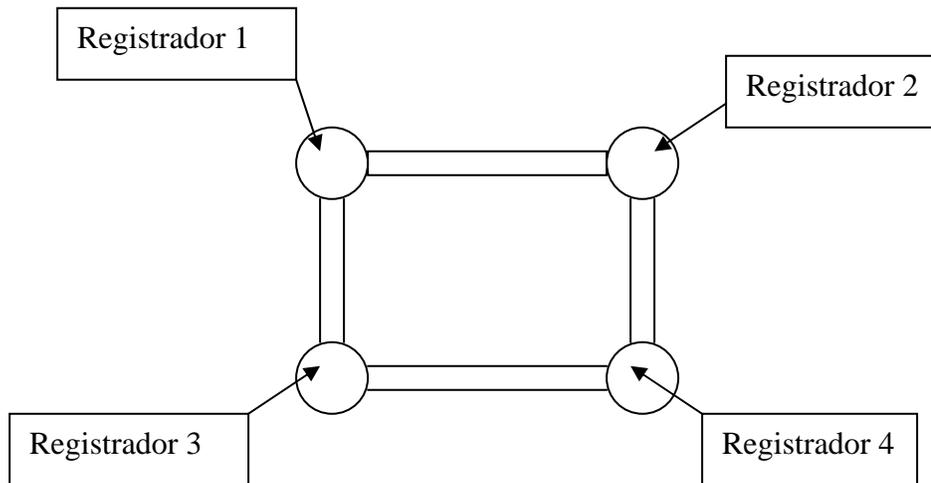


Figura 2.17 Colocación de sensores en un tramo de red.

Cada sensor muestreará el nivel de sonido durante un intervalo de tiempo (regularmente, cada segundo durante dos horas) y construirá un histograma de la ocurrencia de los distintos niveles de ruido registrados por el sensor, como se muestra en la Figura 2.18.

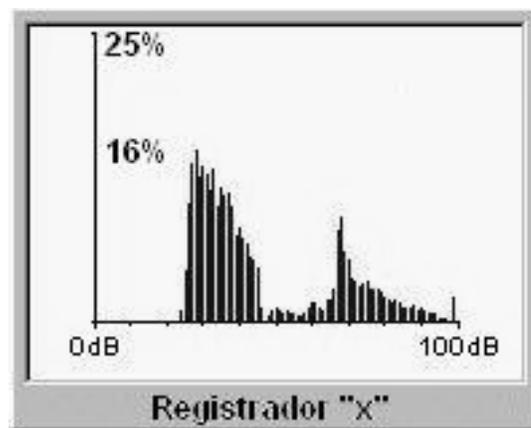


Figura 2.18 Histograma de los niveles de ruido registrado (en porcentaje). El eje  $x$  tiene a los distintos niveles de ruido (de 0 a 100  $dB$ ) y el eje  $y$  tiene su porcentaje de ocurrencia. (PRIMAYER 2005).

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Con este histograma, se obtienen cuatro parámetros que definen la probabilidad de existencia de fuga cercana a ese registrador:

- a) Valor crítico: es el valor de ruido más bajo (en  $dB$ ) donde se encuentra el 99% de los registros.
- b) Pico: es el valor de ruido (en  $dB$ ) que se registró el mayor número de veces.
- c) Espaciamento: es el rango de valores donde se encontraron el 99% de los valores, es decir, la diferencia entre el valor mayor registrado y el valor crítico. Sus unidades son también en  $dB$ .
- d) Porcentaje de pico: es el porcentaje de ocurrencia del valor de pico, es decir, el número de muestras donde se registró el valor de pico entre el número de muestras totales.

Los parámetros anteriores pueden ser observados visualmente en la Figura 2.19.

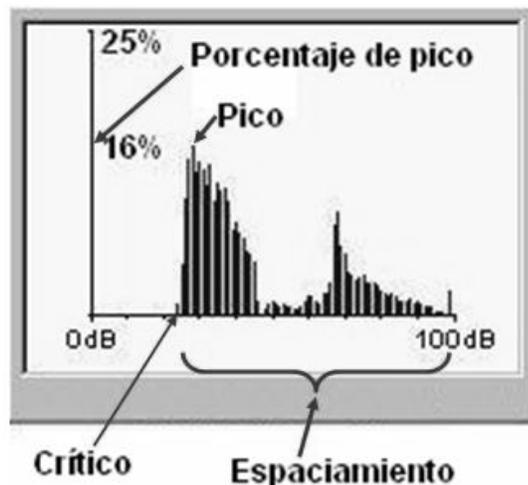


Figura 2.19 Asociación gráfica de los parámetros estadísticos para la probabilidad de fuga (PRIMAYER 2005).

Por lo general, las fugas de agua producen un ruido de frecuencias medias y bajas (es decir, sus niveles de ruido son relativamente constantes), por tanto, la diferencia entre el crítico y el pico es pequeña (menor a 3  $dB$ ), el espaciamento también tiene un valor pequeño (menor a 10  $dB$ ) y el porcentaje de picos es

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

mayor al 50%. En la Figura 2.20 se puede observar un histograma característico de la presencia de fuga.

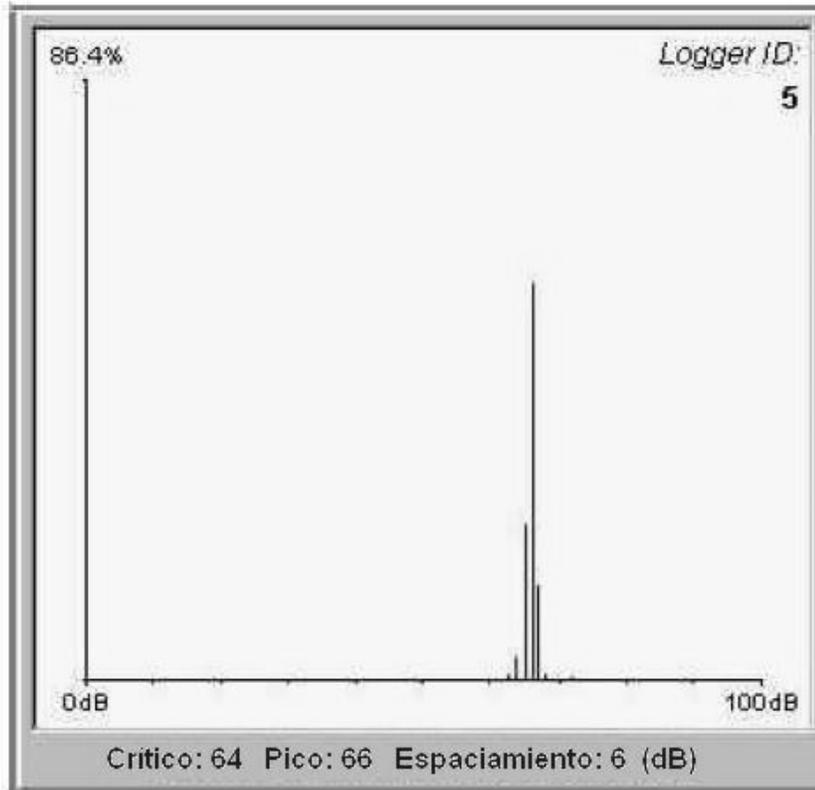


Figura 2.20 Perfil característico de un ruido de fuga (PRIMAYER 2005).

Finalmente, los sistemas de pre-localización asocian al histograma un factor de confianza de fuga, y cada uno está asociado a una probabilidad de fuga. Por ejemplo, un factor característico de estos equipos es una escala que va del 1 al 4, y puede verse en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Factores de confianza de fuga típicos (PRIMAYER 2005).

Factor de confianza de fuga	Descripción
4	Probabilidad muy alta de ruido de fuga
3	Probabilidad media de ruido de fuga
2	Probabilidad baja de ruido de fuga
1	No se detectó ruido de fuga

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

De tal manera y siguiendo el ejemplo de la colocación de cuatro registradores en una sección de la red, cada registrador tendrá asociado un factor de confianza de fuga. Al asociar las probabilidades de los puntos que forman tramos, podemos determinar si existe una probabilidad alta de presencia de fuga como se muestra en la Figura 2.21.

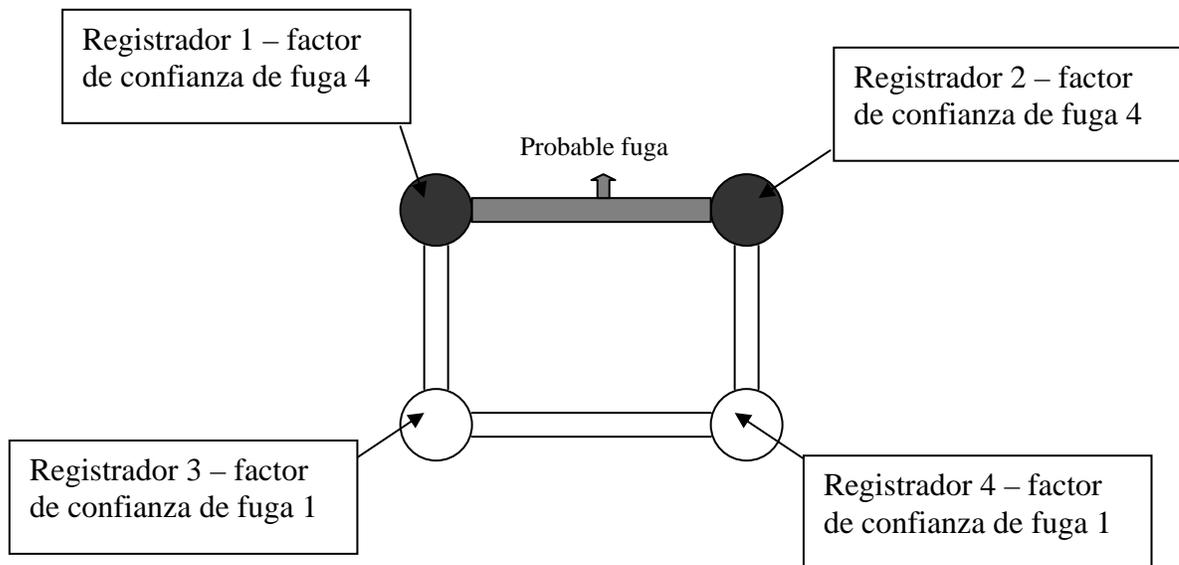


Figura 2.21 Obtención de tramos con probabilidad de fuga utilizando pre-localizadores.

La colocación de sensores tiene por regla general, que la distancia máxima entre sensores sea de 200 metros para tuberías de materiales metálicos, y no mayor de 50 metros para tuberías plásticas. Se recomienda que este estudio sea durante las horas con menor consumo y ruidos ambientales (de 2.00 a 4:00 horas) y la presión de la red sea cuando menos de  $1 \text{ kg/cm}^2$ .

Con este equipo, se ha logrado reducir el área de inspección, para aplicar técnicas de localización en tramos donde exista una probabilidad alta de la presencia de fugas.

Localización: consiste en encontrar en un tramo puntos donde exista una posibilidad alta de fuga. Esto se hace con equipos denominados correlacionadores. Este procedimiento será explicado en detalle en el capítulo 3.

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Puntualización: una vez obtenidos puntos en un tramo donde existe una probabilidad alta de presencia de fuga, se realiza el estudio mediante equipos de escucha directa, cuyo principio es similar al de la “barra de metal”, pero que incorporan en su diseño el filtrado y amplificación de señales, para una mejor escucha del ruido. Este tipo de sistemas son conocidos como geófonos. Cuentan con un micrófono de piso y unidad de control. Algunos ejemplos pueden ser observados en la Figura 2.22.



Figura 2.22 Distintos tipos de geófonos (Lahlou 2006).

El procedimiento consiste en poner el micrófono de piso exactamente sobre el punto donde se sospecha que existe la fuga, ir buscando el sonido característico de fuga y en donde el nivel de sonido es mayor. Ese punto (donde el sonido es más fuerte y nítido) será el punto donde se realizará la posterior rehabilitación. Lo anterior puede ser visualizado en la Figura 2.23.

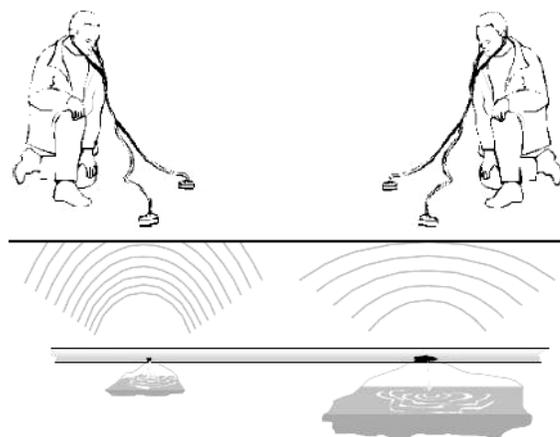


Figura 2.23 Escucha directa de fugas en red (Lahlou 2006).

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Es importante mencionar que no todos los puntos que fueron entregados por el correlacionador son fugas, ya que pueden deberse a fuentes de sonido distintos a una fuga (un consumo a través de una toma domiciliaría), algún elemento de red (interconexiones) o elementos distintos del material de tubería (como sedimentos). Por tanto, es importante que el operador sea entrenado para reconocer los sonidos característicos de fuga en distintas situaciones, para evitar realizar rehabilitaciones en áreas donde se encontraba otro elemento que produce sonido.

Las recomendaciones para su utilización son similares a las otras tecnologías, realizarlo en un horario donde el consumo sea mínimo y también los ruidos ambientales (en el horario comprendido entre las 0:00 y las 5:00 horas) y que la presión de la red sea por lo menos de  $1 \text{ kg/cm}^2$ .

Respecto a los filtros que se deben utilizar, en la Tabla 2.2 unos de los fabricantes más importantes de estos equipos propone los siguientes valores de frecuencia para distintos materiales de tubería.

Tabla 2.2 Anchos de banda para filtros de distintos materiales (PRIMAYER 2005).

Material de tuberías	Banda de filtros recomendados [Hz]
Tuberías plásticas	20 – 625
Concreto o asbesto	150 – 1800
Tuberías metálicas	340 – 1800

La localización de fugas en tomas domiciliarias cuenta con un procedimiento similar, que involucra la utilización de micrófonos de varilla (que tienen un funcionamiento similar al geófono, con la diferencia que el micrófono está conectado a una varilla para poder hacer un contacto firme con el elemento exterior de la tubería de la toma domiciliaría). Los pasos a seguir son efectuados directamente en el cuadro de la toma domiciliaria:

- a) Verificar que la presión de la toma sea igual o superior a  $1 \text{ kg/cm}^2$  (esto se realiza mediante la utilización de un manómetro que es conectado a la llave de manguera)
- b) Colocar la varilla de escucha directamente en la tubería que forma el cuadro, antes del medidor.

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

- c) Se podrá detectar o no sonido propio del flujo a través de la tubería (que se debe a un consumo normal de agua).
- d) Cerrar la llave de paso. El sonido que se presentaba deberá cesar.
- e) Si sigue existiendo sonido, entonces es probable que exista una fuga en alguno de los elementos que conforman la toma domiciliaría, o incluso en la red de distribución.
- f) Se procede como se describió en la puntualización, es decir, utilizar un geófono para puntualizar la ubicación de la fuga.

Aforo y reparación: una vez detectadas las fugas, es importante medir la cantidad de agua que se perdía por la existencia de la fuga.

Una vez realizado un sondeo para acceder físicamente a la fuga, el aforo consiste en medir la cantidad de líquido que era expulsado por la abertura por unidad de tiempo. Una manera sencilla de obtener este dato es tomando el tiempo que tarda en llenarse un depósito graduado, de esa manera, al dividir la capacidad del mismo en el tiempo que tardó en llenarse será la cantidad de agua recuperada (sus unidades son  $L/s$ ).

Existen básicamente dos opciones una vez que se han detectado diversas fugas en un tramo, y básicamente son

- a) Reemplazo del tramo
- b) Reparación del punto donde se encontraba la fuga.

No es objetivo de esta tesis describir los criterios y las opciones para la realización de las acciones citadas, sin embargo, existen excelentes guías orientadas para la República Mexicana que pueden ser consultadas para una descripción detallada de lo anterior. Estas son y puede consultarse la información completa en la sección de Bibliografía:

*“Eficiencias electromecánicas y recuperación de caudales” editado por el Centro Mexicano de Capacitación en Agua y Saneamiento A.C. (CEMCAS)*

*“Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento” editado por la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA)*

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

**2.4.4 Control de pérdidas.** Es un programa de control que permite mantener el nivel de agua facturada alcanzado durante la eliminación de pérdidas. En él se diseñan e implementan los elementos necesarios, mediante una serie de acciones a corto y largo plazo, enmarcados en varios subproyectos que comprende entre otros el actualizar y mantener el catastro de la red de distribución, llevar un registro de la macro medición, un registro actualizado del padrón de usuarios, control de suministros, etcétera.

Por otro lado es conveniente recordar que la reducción de pérdidas tiene las siguientes características:

- Es un proceso que brinda resultados en un tiempo determinado, no es inmediato.
- Inicialmente puede ser fácil recuperar altos porcentajes de pérdidas a un costo relativamente bajo, pero a partir de cierto punto, la relación de costo aumenta considerablemente debido a que resulta más difícil localizar las pérdidas o detectar las fallas en su control. Esto puede ser observado en la Figura 2.24.
- Existe siempre un nivel mínimo aceptable que físicamente se puede alcanzar.

La gráfica mostrada en la Figura 2.24 ejemplifica lo anterior, y permite plantear un nivel de reducción de pérdidas aceptable en función del costo para obtenerlo.

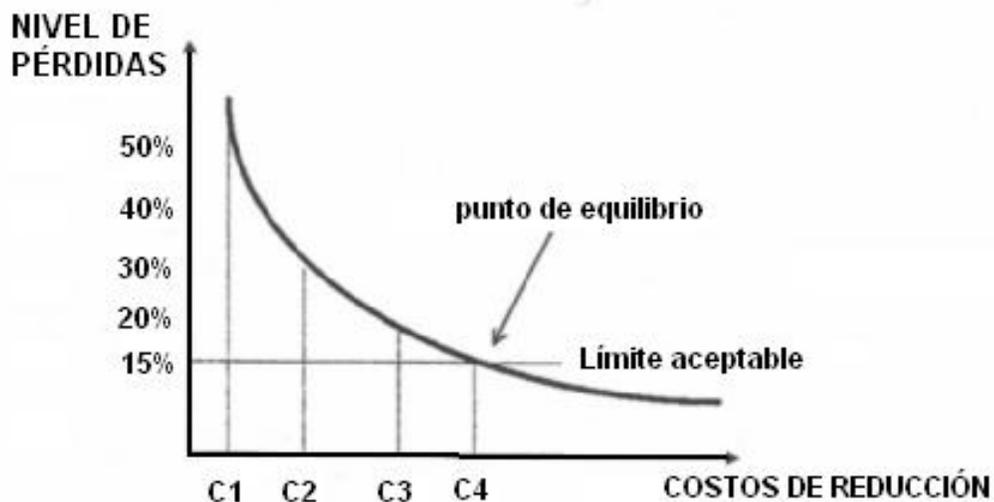


Figura 2.24 Gráfica de costo contra nivel de reducción de pérdidas (Ochoa 1998).

## 2.5 Situación actual en la República Mexicana y contexto de las tomas no registradas en la red de agua potable

**2.5.1 Panorama global.** La disponibilidad de agua dulce en el mundo depende de los recursos hídricos de cada país, siendo delimitados por cuencas hidrográficas. La unidad básica para el manejo del agua es la cuenca hidrológica, en la cual se considera la forma en la que escurre el agua en la superficie (cuencas hidrográficas) y en el subsuelo (acuíferos).

El 70% de la superficie de la Tierra está cubierta por agua. De la cual el 97.5% de agua es salada, siendo solamente un 2.5% agua dulce. De este 2.5%, solamente el 30% lo constituyen aguas subterráneas, solo el 0.4% el agua dulce de ríos y lagos; el resto lo componen glaciares, nieve y hielos. Estos porcentajes pueden ser observados en la Figura 2.25.

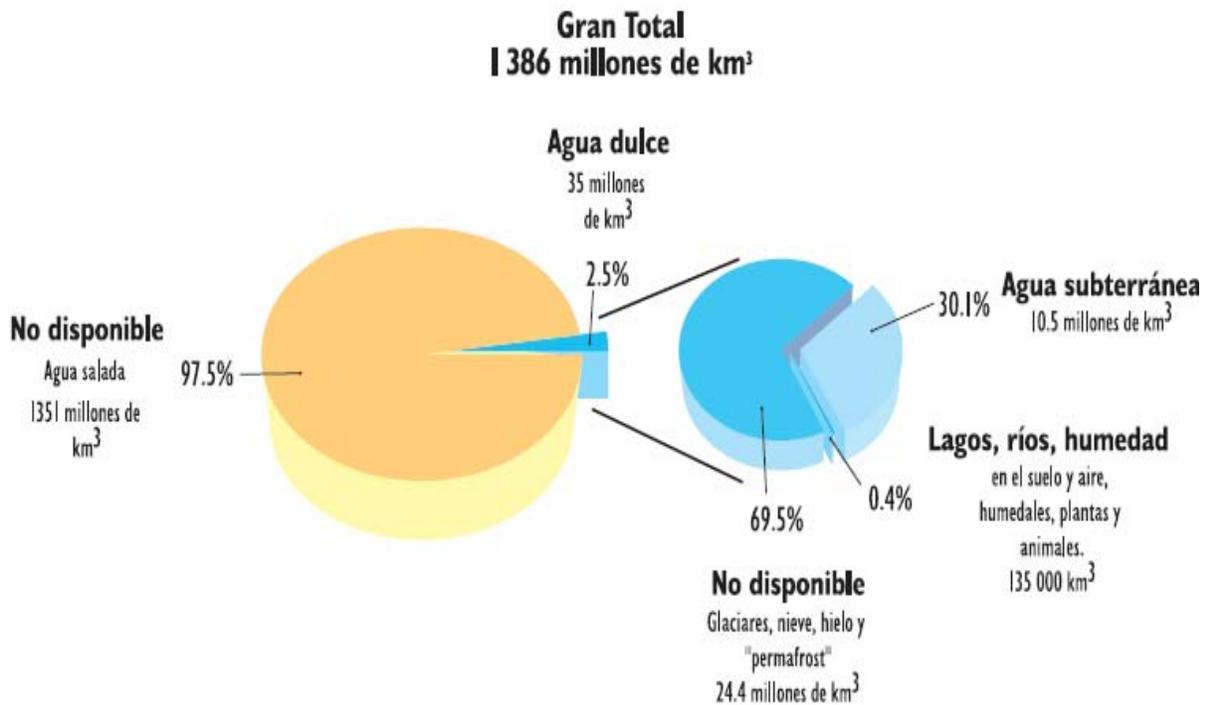


Figura 2.25 Distribución global de agua en el mundo (CONAGUA 2007)

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

La precipitación constituye una parte importante del ciclo hidrológico, ya que produce el agua renovable del planeta. Sin embargo, la precipitación varía de país en país y de región en región, dependiendo del clima y la situación geográfica. En la mayor parte de México, la precipitación es torrencial y se presenta principalmente en el verano.

**2.5.2 Panorama en la República Mexicana.** En la mayor parte de las entidades federativas, la precipitación ocurre predominantemente entre junio y septiembre, con excepción de Baja California y Baja California Sur, donde ésta se presenta principalmente en el invierno. La precipitación histórica mensual de la República Mexicana puede ser observada en la Figura 2.26.

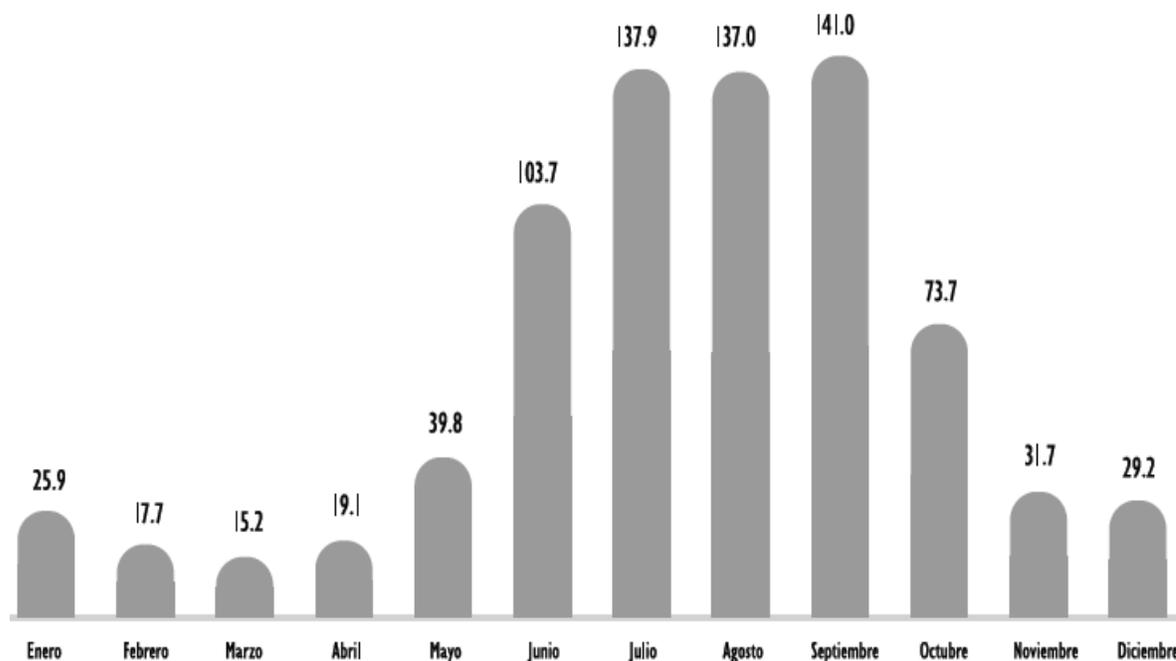


Figura 2.26 Precipitación pluvial normal mensual histórica en México, en el periodo de 1941 a 2006 (milímetros) (CONAGUA 2007)

La disponibilidad natural media per cápita de un país resulta de dividir sus recursos renovables entre el número de habitantes. Según este criterio, México se encuentra en el lugar número 90 mundial sobre 177 países de los cuales contamos con datos, en términos de disponibilidad media per cápita. Cabe aclarar que en el caso de México, la disponibilidad nacional esconde una fuerte variación regional. Si México se dividiera en dos zonas, la del centro y noroeste se

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

encontraría en el lugar 131 mundial, mientras que la del sur y sureste estaría en el lugar 51. La información de la disponibilidad natural media per cápita puede ser observada en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Disponibilidad natural media per cápita de México. (CONAGUA 2007)  
 NOTA:  $1 \text{ km}^3 = 1\,000 \text{ hm}^3 = \text{mil millones de m}^3$ .

No.	País	Precipitación media (mm)	Disponibilidad ( $\text{km}^3$ )	Disponibilidad natural media per cápita ( $\text{m}^3/\text{hab}/\text{año}$ )
90	México	772	465	4416

En el siglo XX, la población mundial se triplicó, mientras que las extracciones de agua se sextuplicaron. Esta situación ha contribuido al aumento del grado de presión sobre los recursos hídricos del mundo. La Tabla 2.4 muestra la extracción total de agua en la República Mexicana.

Tabla 2.4 Extracción total de agua en México (CONAGUA 2007).

No.	País	Extracción total ( $\text{km}^3/\text{año}$ )	Extracción per capita ( $\text{m}^3/\text{hab}/\text{año}$ )	Agrícola (%)	Abastecimiento público (%)	Industrial (%)
36	México	77.3	767	76.8	13.9	9.2

En términos de cobertura de agua potable en el país, nos encontramos en el número 90 del mundo con un 89% de cobertura de agua potable (CONAGUA 2007). Para poder tener una referencia en el ámbito mundial, en la Figura 2.27 se muestran los niveles de cobertura de agua potable en el ámbito mundial.

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

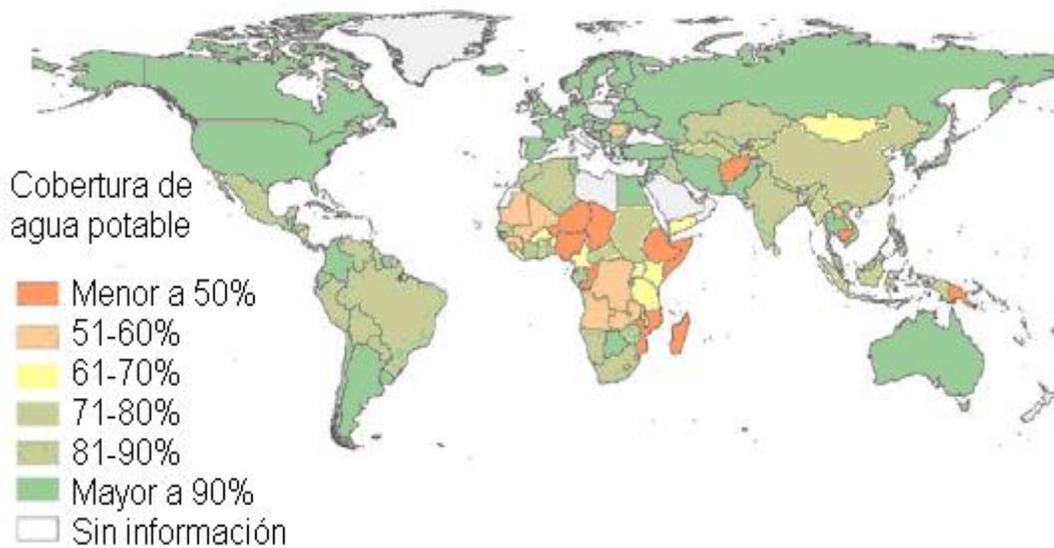


Figura 2.27 Porcentaje de cobertura de agua potable en el ámbito mundial (CONAGUA 2007)

El porcentaje que representa el agua utilizada para usos consuntivos respecto a la disponibilidad total es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico en un país, cuenca o región. Se considera que si el porcentaje es mayor al 40%, se ejerce una fuerte presión sobre el recurso.

El grado de presión sobre los recursos hídricos resulta de dividir la extracción entre la disponibilidad. México se encuentra en el lugar 55 sobre 155 evaluados según este indicador, ya que cuenta con una disponibilidad de  $465.14 \text{ km}^3$  y una extracción total de  $77.30 \text{ km}^3$ , por lo que su grado de presión sobre los recursos hídricos es del 17% (CONAGUA 2007). Por otra parte, la zona norte, centro y noroeste del país experimenta un grado de presión del 47%, lo cual lo colocaría en el lugar 26 mundial, con una presión sobre el recurso hídrico que se considera como fuerte. Por otra parte, la zona sur y sureste, tiene un grado de presión de 3%, un grado relativamente bajo, lo cual lo colocaría en el lugar 94 a nivel mundial.

Como referencia, en la Figura 2.28 se muestran los grados de presión en el ámbito mundial, donde se puede observar que los países donde se localiza el desierto de Sahara y prácticamente todo medio oriente tiene un nivel de presión fuerte (mayor al 40%).

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

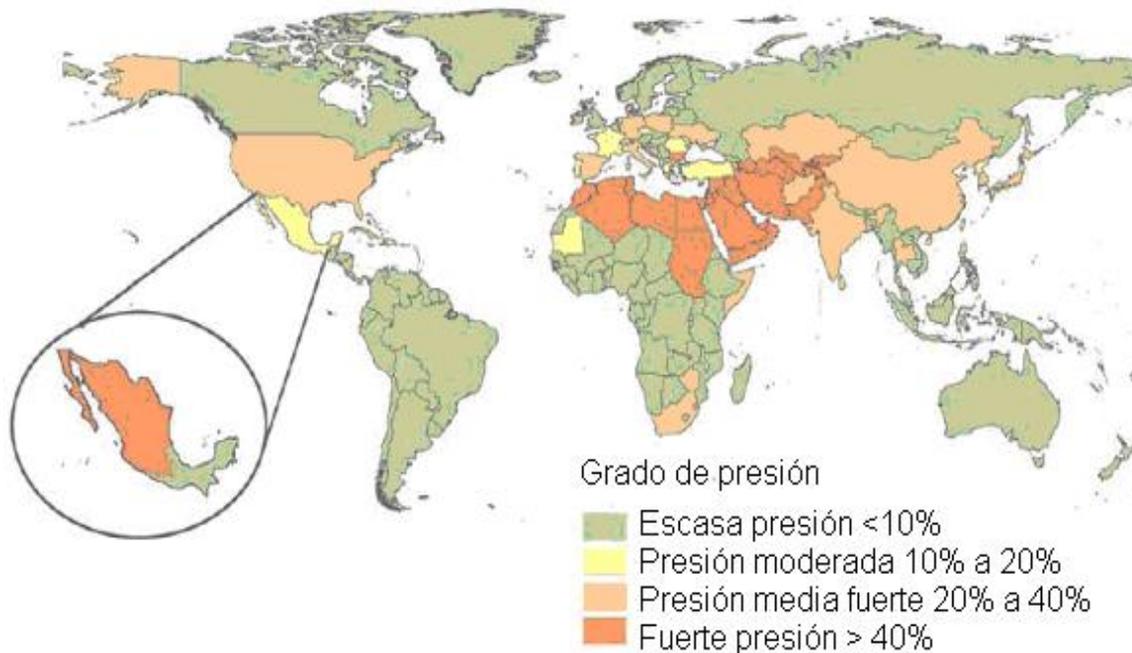


Figura 2.28 Grado de presión sobre los recursos hídricos en el ámbito mundial y regionales de la República Mexicana (CONAGUA 2007)

**2.5.3 Utilización del agua en la República Mexicana.** En el Registro Público de Derechos de Agua (REDPA), se cuenta con los volúmenes concesionados (o asignados) a los usuarios de aguas nacionales. En dicho registro se tienen clasificados los usos del agua en doce rubros, mismos que por claridad se han agrupado en cinco grandes grupos; cuatro que corresponden a usos consuntivos, el agrícola, el abastecimiento público, la industria autoabastecida y las termoeléctricas, y el hidroeléctrico, que se contabiliza aparte por corresponder a un uso no-consuntivo.

Como se observa en la Figura 2.29, el mayor volumen concesionado para usos consuntivos del agua es el que corresponde a las actividades agrícolas, debido a que México es uno de los países con mayor infraestructura de riego en el mundo.

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

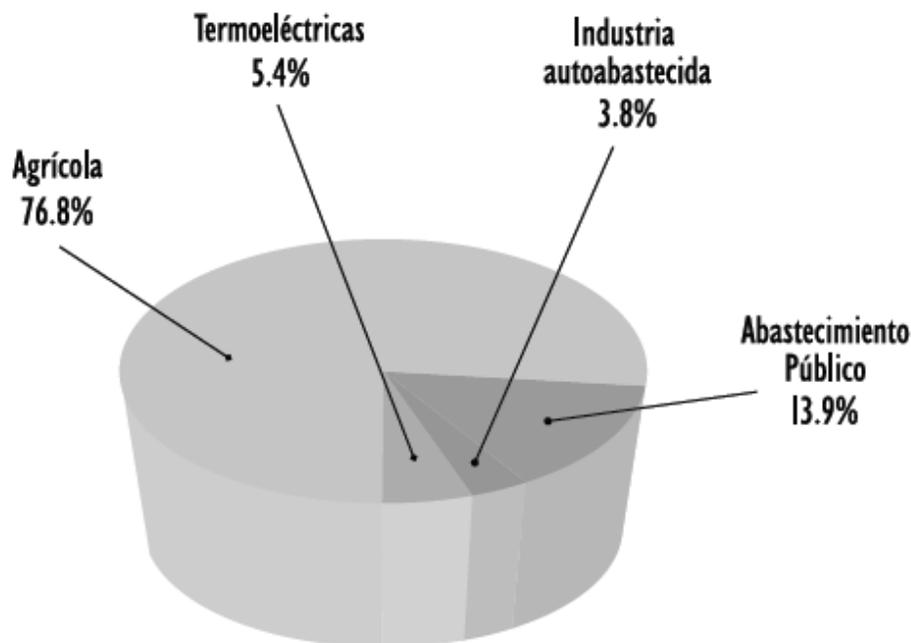


Figura 2.29 Distribución porcentual de los volúmenes concesionados para usos consuntivos (CONAGUA 2007)

La Tabla 2.5 muestra el origen del tipo de extracción para cada uno de los rubros.

Tabla 2.5 Usos consuntivos, según origen del tipo de extracción en la República Mexicana – Miles de millones de metros cúbicos - (CONAGUA 2007)

Usos	Origen		Volumen total
	Superficial	Subterráneo	
Agrícola	39.7	19.7	59.4
Abastecimiento público	3.9	6.8	10.7
Industria autoabastecidas (sin termoeléctricas)	1.6	1.4	3.0
Termoeléctricas	3.8	0.5	4.2
Total	49.0	28.3	77.3

En la Figura 2.30 y la Tabla 2.6, se muestra la información sobre los volúmenes concesionados de agua por entidad federativa, entre los cuales destacan Sinaloa y Sonora, donde existen grandes superficies bajo riego.

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

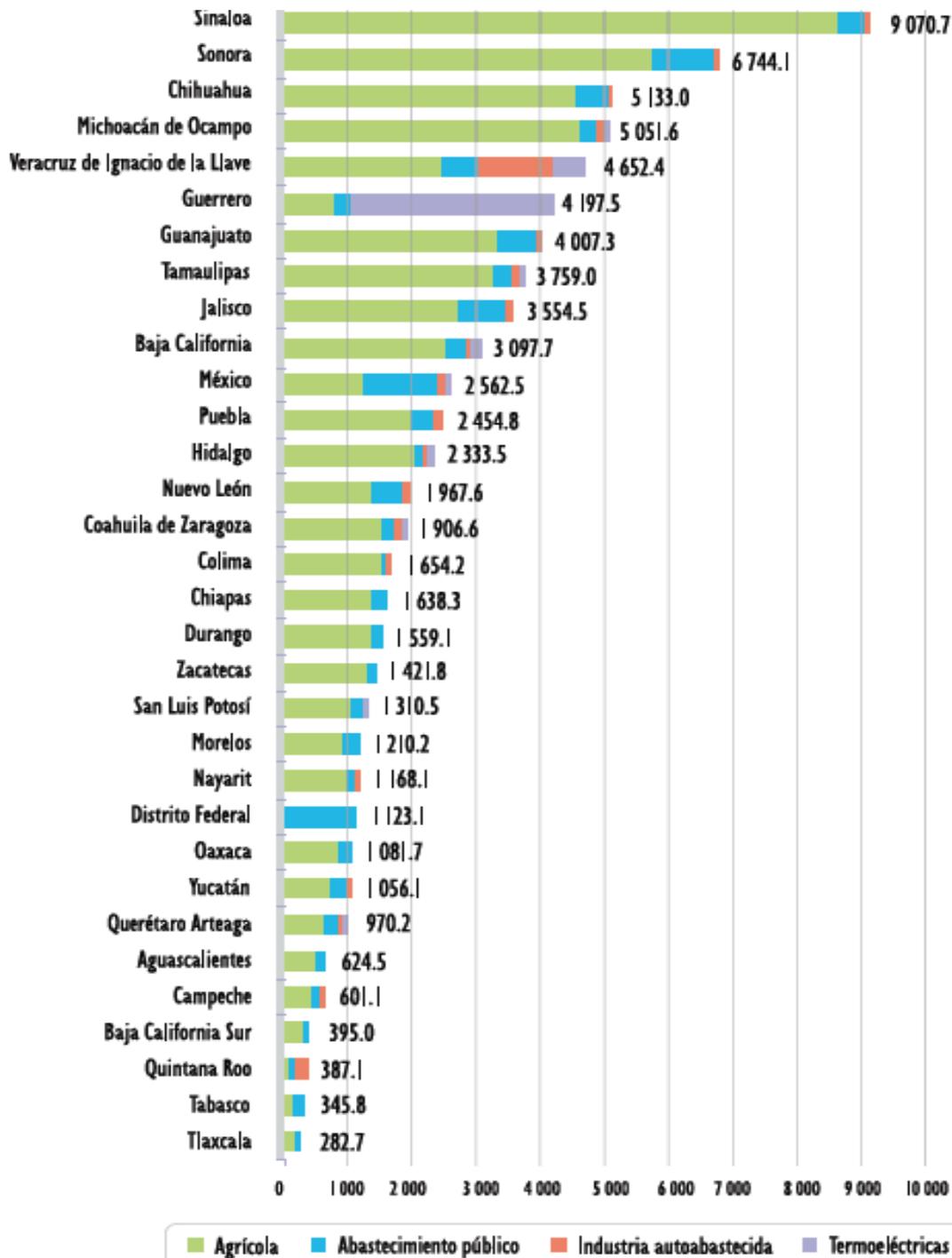


Figura 2.30 Gráfica del volumen concesionado para usos consuntivos por entidad federativa – Millones de metros cúbicos (CONAGUA 2007)

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Tabla 2.6 Volumen concesionado para usos consuntivos por entidad federativa – Millones de metros cúbicos (CONAGUA 2007)

ENTIDAD FEDERATIVA	VOLUMEN TOTAL CONCESIONADO	AGRÍCOLA <sup>a</sup>	ABASTECIMIENTO PÚBLICO <sup>b</sup>	INDUSTRIA AUTOABASTECIDA SIN TERMOELÉCTRICAS <sup>c</sup>	TERMOELÉCTRICAS <sup>d</sup>
1 Aguascalientes	624.5	494.0	118.9	11.5	0.0
2 Baja California	3 097.7	2 558.4	266.7	77.4	195.2
3 Baja California Sur	395.0	321.8	61.5	7.9	3.9
4 Campeche	601.1	459.6	125.2	16.4	0.0
5 Coahuila de Zaragoza	1 906.6	1 574.8	183.7	73.2	74.9
6 Colima	1 654.2	1 561.2	61.5	27.7	3.8
7 Chiapas	1 638.3	1 351.4	258.3	28.6	0.0
8 Chihuahua	5 133.0	4 578.7	474.9	51.7	27.6
9 Distrito Federal	1 123.1	1.3	1 089.8	32.1	0.0
10 Durango	1 559.1	1 374.6	153.4	22.2	8.8
11 Guanajuato	4 007.3	3 347.8	584.7	54.3	20.5
12 Guerrero	4 197.5	832.2	234.8	8.5	3 122.1
13 Hidalgo	2 333.5	2 018.1	166.9	65.9	82.6
14 Jalisco	3 554.5	2 717.1	712.4	124.8	0.1
15 México	2 562.5	1 245.1	1 158.3	152.2	6.9
16 Michoacán de Ocampo	5 051.6	4 592.1	270.0	142.7	46.8
17 Morelos	1 210.2	911.6	253.2	45.4	0.0
18 Nayarit	1 168.1	1 016.1	102.5	49.4	0.0
19 Nuevo León	1 967.6	1 373.0	511.8	78.4	4.4
20 Oaxaca	1 081.7	847.3	196.6	37.8	0.0
21 Puebla	2 454.8	1 959.4	378.0	110.9	6.5
22 Querétaro Arteaga	970.2	658.4	244.5	61.6	5.7
23 Quintana Roo	387.1	91.4	91.3	204.4	0.0
24 San Luis Potosí	1 310.5	1 060.4	168.6	40.5	41.0
25 Sinaloa	9 070.7	8 605.1	419.6	46.0	0.0
26 Sonora	6 744.1	5 737.7	946.2	60.3	0.0
27 Tabasco	345.8	147.5	184.8	13.5	0.0
28 Tamaulipas	3 759.0	3 285.9	314.1	105.0	54.0
29 Tlaxcala	282.7	178.2	85.5	19.0	0.0
30 Veracruz Ignacio de la Llave	4 652.4	2 440.5	567.2	1 149.6	495.1
31 Yucatán	1 056.1	769.8	244.4	32.6	9.4
32 Zacatecas	1 421.8	1 289.9	112.3	19.6	0.0
Total	77 322.2	59 400.2	10 741.4	2 971.3	4 209.4

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

El uso para abastecimiento público incluye la totalidad del agua entregada a través de las redes de agua potable, las cuales abastecen a los usuarios domésticos (domicilios), así como a las diversas industrias y servicios conectados a dichas redes. De acuerdo con los Censos de Captación, Tratamiento y Suministro de Agua realizados por el INEGI a los organismos operadores del país, se determinó que en el 2003 el 82% del agua suministrada por las redes de agua potable fue para uso doméstico y el 18% restante para industrias y servicios. Por otro lado, comparando los datos de 1998 con los de 2003 de los Censos, se observa que en estos cinco años el volumen de agua empleada por los organismos operadores se incrementó en 22%.

### 2.5.4 Contexto de las tomas no registradas en red en la República Mexicana.

En el año 2007 el porcentaje de volumen de agua facturado respecto al total de agua empleada por los organismos operadores fue del 49%, lo que indica que el restante 51% del volumen no facturado se perdió tanto en pérdida física (fugas de agua) como pérdida económica (debido a deficiencias de facturación o por la existencia de tomas no registradas en red – también conocido como clandestinaje). Esto puede ser observado en la Figura 2.31.



Figura 2.31 Estimados del volumen no facturado del 2007 en la República Mexicana. Del volumen no facturado (pérdidas) se estima que alrededor del 10% es debido a la existencia de tomas no registradas en la red (clandestinaje). Las fugas del agua corresponden a un porcentaje de alrededor del 70% (CONAGUA 2007)

## CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Aunque el porcentaje del volumen proporcionado perdido debido a las tomas no registradas en red (alrededor del 5.1%) es menos significativo que la pérdida físicas – fugas de agua (que corresponden alrededor del 35% del total) existen diversos motivos por los cuales el plantear una metodología tienen gran interés para los organismos operadores de agua potable:

- Usualmente la toma no registrada por parte del usuario se realiza de una manera intencional y dolosa, y no por una incapacidad del pago del servicio.
- A diferencia de las metodologías sistemáticas y ampliamente estudiadas para la localización puntual de fugas de agua, no existe por parte de organismos encargados en México una metodología similar para la localización de tomas no registradas en la red.
- Aunque cada Estado en la República Mexicana tiene diferentes multas en sus códigos financieros en el caso de detectarse una toma clandestina, estas multas regularmente conllevan un pago de varios años de retroactividad (es decir, el pago de un estimado de varios años del consumo no facturado). Esto puede producir un ingreso que puede llegar a ser igual a lo invertido en tecnologías de punta planteadas.

Finalmente y haciendo un breve descripción del marco de nuestro problema a resolver, las tomas no registradas en red producen una pérdida económica a la red de distribución de agua potable, y su localización está contenida en la etapa de eliminación de pérdidas, en el proceso dinámico conocido como la recuperación integral de pérdidas de agua potable.

CAPÍTULO 2 PANORAMA GENERAL DE LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

## Capítulo 3

# Sistema acústico de correlación para la detección de fugas de agua

### 3.1 Descripción general

Una alternativa viable y automática a los métodos tradicionales de puntualización de fugas es la utilización de sistemas acústicos de correlación, los cuales han sido adoptados exitosamente y de manera amplia en los últimos años. De manera general, estos sistemas son más eficientes y más exactos que los sistemas de escucha directa. Son el “estado del arte” en la localización puntual y automática de las fugas de agua, pero no están basados en escuchar el ruido transmitido a través del suelo hacia la superficie, como sí lo es para los geófonos. Su operación se basa en medir la vibración o el sonido en dos puntos que forman un tramo de red a inspeccionar mediante la utilización de acelerómetros o hidrófonos. Las señales de vibración o sonido son almacenadas en registradores y posteriormente se realiza la correlación cruzada de la misma en un programa especializado.

En la mayoría de casos, la fuga se encuentra asimétricamente entre los dos puntos de medición y consecuentemente existe un retardo de tiempo entre la medición de la señal de fuga. El sistema de correlación establece retardos de tiempo entre las señales, y va calculando la función de correlación cruzada. La localización de la fuga está basada en las relaciones algebraicas del tiempo de retardo, la distancia entre sensores, la velocidad de propagación en la tubería y las bandas de filtros utilizados para eliminar señales de ruidos no producidos por fugas.

La distancia entre los sensores usualmente es medida en sitio u obtenida mediante planos o sistemas de información geográfica. La velocidad de propagación para diversas tuberías de diferentes diámetros o materiales es almacenada en el programa especializado, o con la utilización de tres sensores, puede ser medida en sitio. Los filtros utilizados dependen también del tipo de tubería a inspeccionar.

## CAPÍTULO 3 SISTEMA ACÚSTICO DE CORRELACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA

El resultado del estudio de correlación es la gráfica de correlación cruzada relacionada con la distancia entre sensores y donde se localicen los puntos de máximo valor de correlación se deberá sospechar como un punto donde se encuentre una fuga. Un ejemplo de lo anterior puede ser observado en la Figura 3.1. Se recomienda que la confirmación de la fuga sea realizada con sistemas de escucha directa y compararlo también con la información de la red.

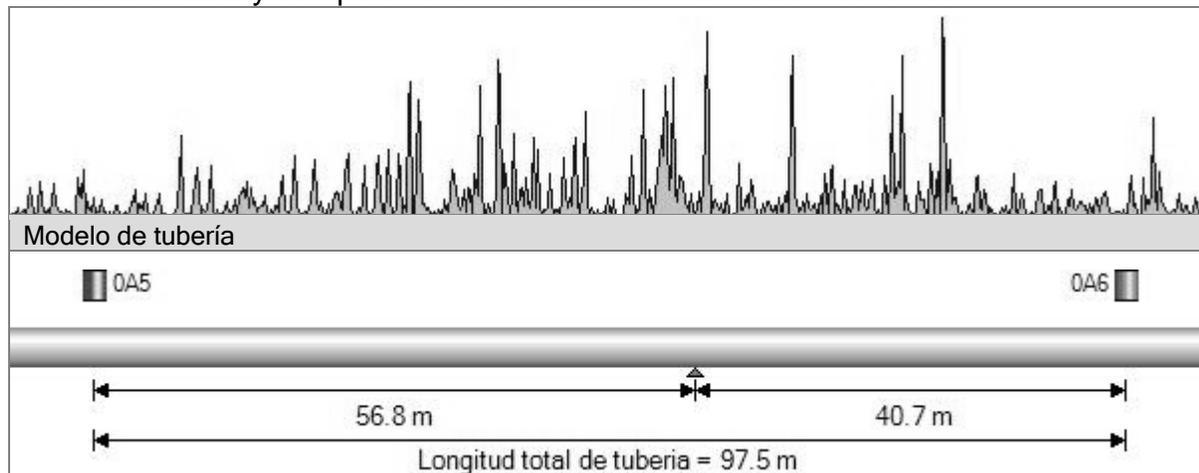


Figura 3.1 Ejemplo del resultado obtenido utilizando sistema acústico de correlación o correlacionador (PRIMAYER 2005).

Aunque su finalidad primordial es la localización de fugas, los correlacionadores son sensibles a cualquier fuente de vibración o sonido presentes en la red, característica que será aprovechada para la localización de tomas no registradas.

El diseño de los sistemas de correlación tiene su origen en el Reino Unido. En el año de 1973, los diversos organismos de agua potable se conjuntaron y crearon además el WRC (Water Research Center), una organización similar al AWWA (American Water Works Association) norteamericana. Uno de sus primeros objetivos fue desarrollar un detector eficiente de fugas. En esa época, la localización requería realizar los estudios durante la noche con una gran cantidad de personal, utilizando “varillas de escucha”. Este método era peligroso (por su hora de realización), ineficiente y costoso.

El primer intento fue “LINDA”, el cual era un vehículo con varios grabadores de casete que estaban acoplados cada uno a un geófono, en intervalos de 1 metro. Después que la grabación era hecha, el sistema se desplazaba una pequeña distancia y repetía el proceso. Este método resultó ser ineficiente y costoso, así que fueron planteados otros métodos.

### CAPÍTULO 3 SISTEMA ACÚSTICO DE CORRELACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA

En 1975, el WRC diseñó el primer sistema acústico de correlación. En 1978, Plessey Limited fue contratada para manufacturar este diseño y fue conocido como el nombre de MARK 1. Aunque fueron producidas 200 unidades, Plessey determinó que no había viabilidad económica en este producto y vendió sus derechos en 1979. La compañía que siguió con la fabricación y desarrollo fue llamada Palmer. Es interesante notar que el sistema MARK 1 era extremadamente grande y requería una gran cantidad de energía eléctrica, mientras un modelo moderno es portátil y cuenta con una alimentación independiente de varios años, como por ejemplo el modelo mostrado en la Figura 3.2.

Actualmente existen varias compañías que diseñan y comercializan estos sistemas. Entre los más importantes se encuentran Palmer Environmental, Metrotech, Primayer, Seba KMT, Hermann Sewerin y Guttenberg.



Figura 3.2 Sistema moderno de correlación, modelo ENIGMA de Primayer. (PRIMAYER 2005).

### 3.2 Marco teórico

En una tubería presurizada, la existencia de defectos en la tubería que provocan que una cantidad de líquido sea expulsado de la misma (fuga) produce un sonido. Como la presión dentro de la tubería es mayor que la atmosférica, son generados ruidos turbulentos y mucha fricción los cuales puede detectar el correlacionador. Esto puede ser visualizado en la Figura 3.3.

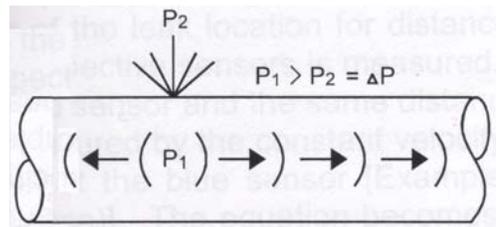


Figura 3.3 La existencia de una fuga produce una diferencia de presión, que provoca una vibración en el medio. (PRIMAYER 2005).

Al tratarse de un medio casi uniforme, es posible obtener un estimado de la velocidad de propagación del sonido producido por la fuga. Ésta es función del material, del diámetro de la tubería y el fluido presente. La vibración del sonido (frecuencia) viaja a través de la tubería y puede ser reflejado o absorbido (atenuado) por las paredes de la tubería. Las tuberías de materiales suaves (como el plástico) absorben rápidamente el sonido. De igual forma, tuberías de diámetros mayores absorberán el sonido más rápido que tuberías del mismo material pero de diámetros menores. La propagación en distintos materiales puede observarse en la figura 3.4.

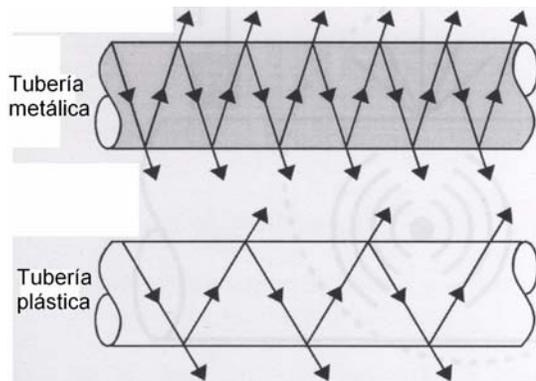


Figura 3.4 El sonido producido por una fuga dentro de una tubería metálica será en gran parte reflejado y transmitido. En tuberías plásticas, el sonido es rápidamente absorbido. (PRIMAYER 2005).

### CAPÍTULO 3 SISTEMA ACÚSTICO DE CORRELACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA

Con los métodos tradicionales (dispositivos de escucha directa) uno va inspeccionando todo el tramo siguiendo la trayectoria de la tubería cada cierta cantidad de metros. De forma ideal, en donde se encuentre la fuga, el valor de la vibración de la misma será máxima (expresada en decibeles) ya que no ha sido aún atenuada por las paredes de la tubería. Los correlacionadores en vez de sólo depender del nivel del ruido de fuga, están en función de la velocidad del sonido provocado por la fuga que se propaga en la tubería. Al colocar dos sensores a una distancia entre ellos e ir muestreando el valor de la vibración (registrando el valor del ruido de fuga en dos puntos de la tubería), se puede crear la señal del ruido de fuga respecto a un tiempo. El tiempo que tarda la señal en ser adquirida depende de la posición respecto a los sensores. El ruido producido que viaja a cada uno de los lados es idealmente idéntico, pero el tiempo que tarda cada uno de los sensores en registrarlo será diferente (a menos que la fuga se encuentre exactamente a la misma distancia de cada sensor).

La Figura 3.5 siguiente ilustra lo anterior.

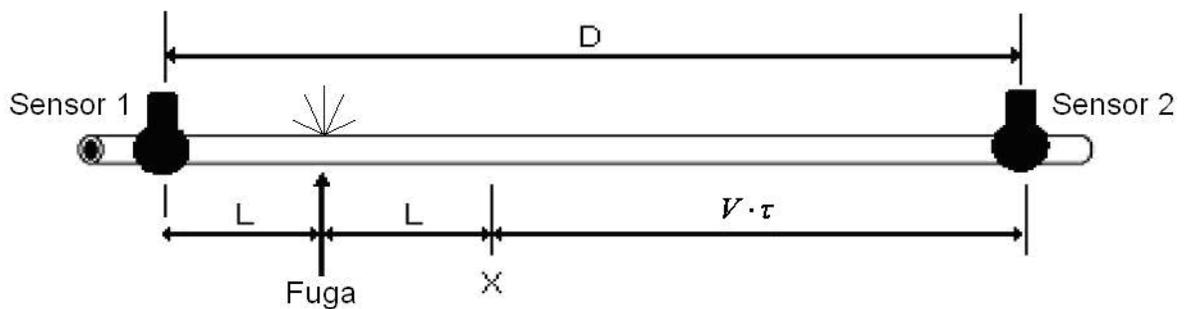


Figura 3.5 Fuga de agua presente en tramo de tubería y distancias asociadas (PRIMAYER 2005).

Existe una distancia  $D$  entre los sensores, y la fuga se encuentra más cerca del sensor 1. En el momento que la señal de ruido de fuga ha viajado hasta el sensor 1, la misma señal ha viajado sólo hasta el punto  $X$ . La distancia entre  $X$  y el sensor 2 causa un retraso  $\tau$  antes que el ruido llegue al sensor 2. Si la velocidad del sonido es  $V$  y la distancia entre los sensores es  $D$ , entonces como la distancia de  $X$  al sensor 2 es igual a  $V \cdot \tau$ , entonces  $D = (2 \cdot L) + (V \cdot \tau)$ . Esta ecuación se puede cambiar para dar " $L$ ", la distancia del sensor 1 al lugar de la fuga:

$$L = \frac{D - (V \cdot \tau)}{2} \quad (3.1)$$

La distancia  $D$  dependerá de la posición a que hayan sido colocados los sensores. La velocidad  $V$  es la velocidad del sonido en la tubería inspeccionada, que se mencionó que depende del material, del diámetro, así como del fluido presente.

Si existiera un punto de ruido producido por una fuga en el tramo, se sabe que la señal adquirida por el sensor 1 y por el sensor 2 será idéntica, pero existirá un retraso del tiempo  $\tau$ . Se requiere entonces una operación matemática que para exactamente el valor de retardo  $\tau$ , la función obtenida tenga una característica que la diferencie de secciones dentro de la tubería que no presenten fuga. Aquí es útil la función de correlación cruzada, ya que es una función que calcula el parecido de señales con diferentes retados de tiempo. Es evidente que se debe calcular esta función para todos los puntos intermedios entre los sensores 1 y 2, por lo cuales existirán diversos tiempos de retardo asociados a cada punto de la tubería.

### 3.3 Principio de funcionamiento

La correlación discreta es una operación entre dos secuencias finitas discretas de longitud  $N$ . El objetivo de la misma es medir el parecido que existe entre dos señales y así extraer información que dependerá de la aplicación concreta considerada. Si las secuencias son diferentes, esta operación es denominada correlación cruzada.

Suponiendo que se tengan dos secuencias que fueron muestreadas por cada uno de los sensores  $x(n)$  e  $y(n)$ , ambas de energía finita, la correlación cruzada de las secuencias  $x(n)$  e  $y(n)$  es la secuencia  $r_{xy}(\tau)$  que se define como

$$r_{xy}(\tau) = \sum_{n=1}^N x(n)y(n-\tau) \quad \tau = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.2)$$

o, equivalentemente como

$$r_{xy}(\tau) = \sum_{n=1}^N x(n+\tau)y(n) \quad \tau = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.3)$$

### CAPÍTULO 3 SISTEMA ACÚSTICO DE CORRELACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA

El índice  $\tau$  es el parámetro de desplazamiento o retardo en el tiempo y los subíndices  $xy$  de la secuencia de auto-correlación  $r_{xy}(\tau)$  indican las señales que han sido correlacionadas. El orden de los subíndices, con  $x$  precediendo a  $y$  indica la dirección en que una secuencia es desplazada con respecto a la otra. Es decir, la secuencia  $x(n)$  no se desplaza y la secuencia  $y(n)$  se desplaza  $\tau$  muestras hacia la izquierda si  $\tau$  es positivo y  $\tau$  hacia la derecha si  $\tau$  es negativo. Desplazar  $x(n)$   $\tau$  muestras hacia la derecha con relación a  $y(n)$  es equivalente a desplazar  $y(n)$   $\tau$  muestras hacia la derecha con relación a  $x(n)$ . De aquí, que (3.2) y (3.3) produzcan idénticas secuencias de correlación cruzada.

Si se invierten los papeles de  $x(n)$  e  $y(n)$  en (3.2) y (3.3) y, por tanto, invertimos también el orden de los subíndices  $xy$ , obtenemos la secuencia de correlación cruzada

$$r_{yx}(\tau) = \sum_{n=1}^N y(n)x(n-\tau) \quad (3.4)$$

$$r_{yx}(\tau) = \sum_{n=1}^N y(n+\tau)x(n) \quad (3.5)$$

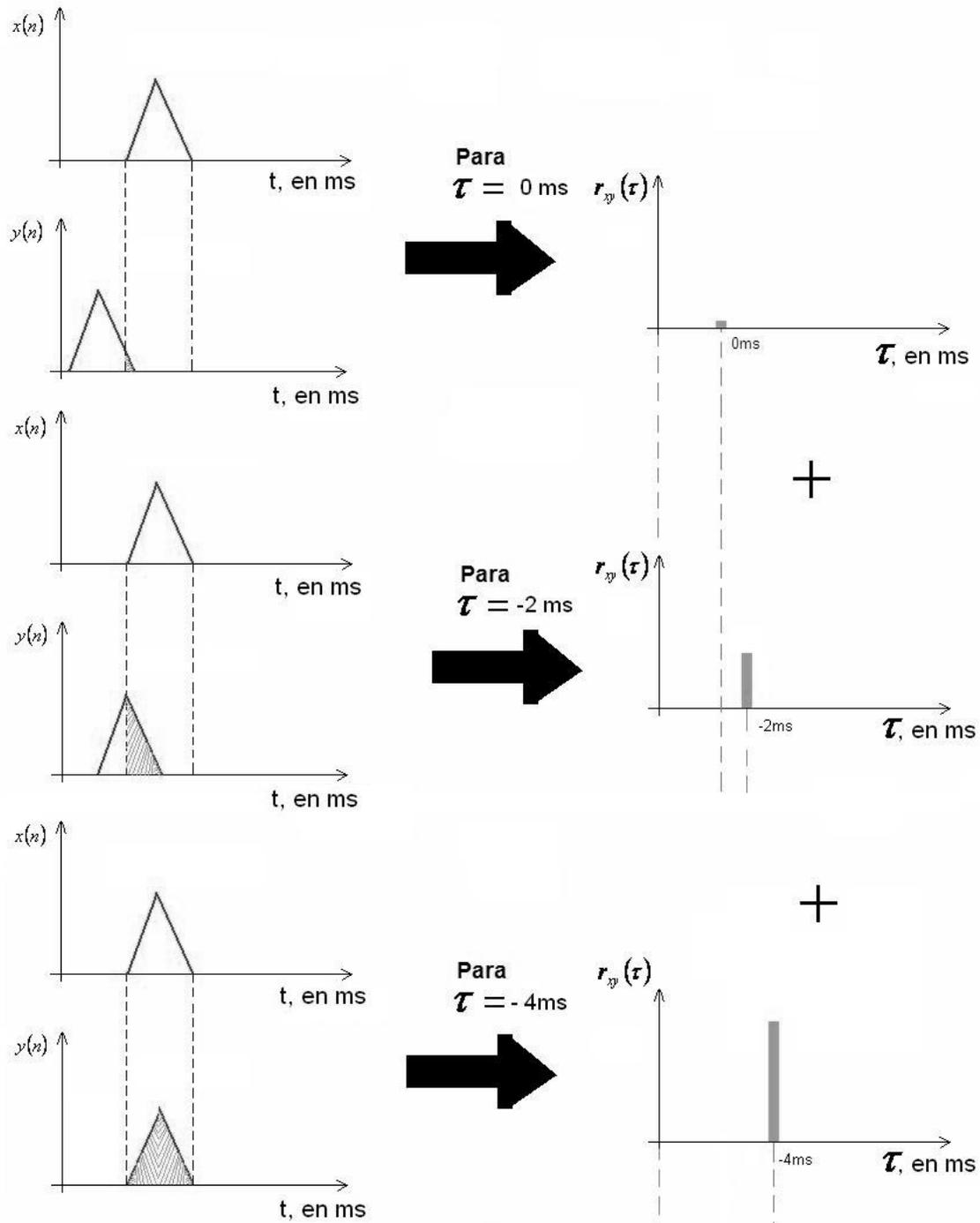
Comparando (3.22) con (3.4) o (3.3) con (3.5), se concluye que

$$r_{xy}(\tau) = r_{yx}(-\tau) \quad (3.6)$$

Por tanto  $r_{yx}(\tau)$  es simplemente la versión reflejada de  $r_{xy}(\tau)$ , donde la reflexión se hace con respecto a  $\tau = 0$ . De aquí, que  $r_{yx}(\tau)$  proporcione exactamente la misma información que  $r_{xy}(\tau)$ , con respecto a la similitud entre  $x(n)$  e  $y(n)$ .

Lo anterior puede ser perfectamente ejemplificado mediante la Figura 3.6, con dos secuencias que tienen igual forma pero para la aplicación fueron adquiridas en distintos tiempos. Al ir realizando retardos, el valor de la función de correlación cruzada es máximo cuando el área común de ambas señales también lo es. Como  $\tau$  toma valores discretos, la gráfica resultante también es discreta.

CAPÍTULO 3 SISTEMA ACÚSTICO DE CORRELACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA





Una función típica completa puede ser observada en la Figura 3.7.

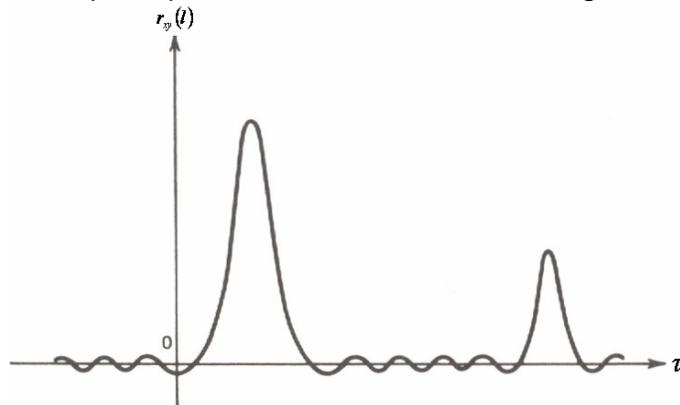


Figura 3.7 Función típica de correlación cruzada (Proakis 2005).

Finalmente, la función típica de correlación cruzada puede ser asociada fácilmente al tramo de tubería inspeccionado, ya que cada  $\tau$  está relacionada a una  $L$  (distancia al sensor 1) y a una  $V \cdot \tau$  (distancia al sensor 2) y corresponden a puntos de la tubería entre los sensores 1 y 2, que es el resultado final de los programas especializados, tal como se observa en la figura 3.8.

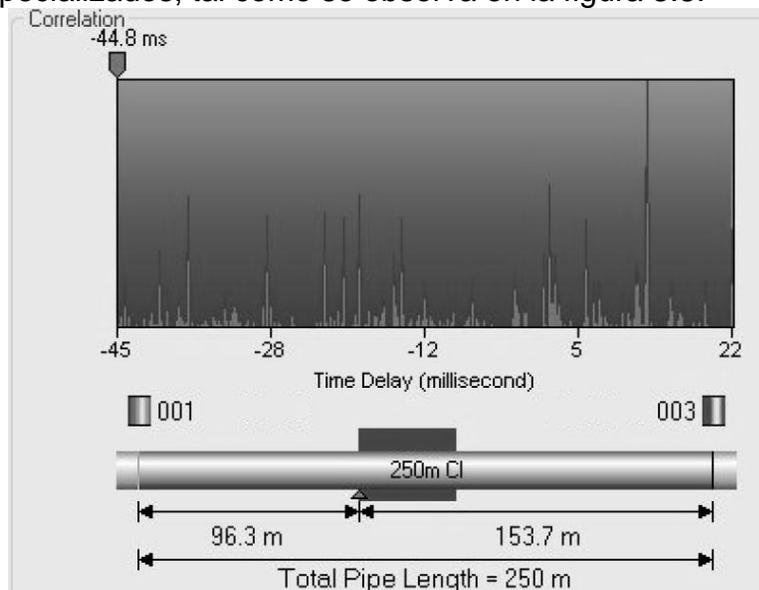


Figura 3.8 Resultado final del estudio de correlación en un tramo de tubería. *Correlation*, *Time Delay* y *Total Pipe Length* se traducen como correlación, tiempo de retardo y longitud total de tubería respectivamente (PRIMAYER 2005).

### 3.4 Utilización

A continuación se describe una metodología para la detección eficiente y sistemática de fugas de agua en redes de agua potable utilizando correlacionadores, así como las consideraciones más importantes en la operación y elección del sistema acústico de correlación. El objetivo de la misma es localizar con la mayor exactitud posible la posición de fugas de agua en tramos de tubería.

El diagrama de flujo de la propuesta sistemática de localización de fugas de agua en red de agua potable en un sector se muestra en la Figura 3.9.

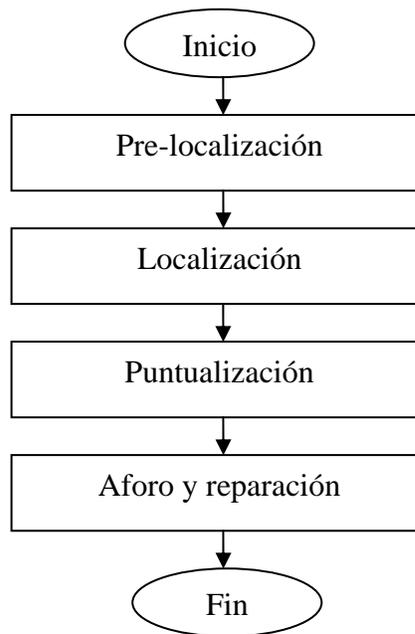


Figura 3.9 Metodología para la detección de fugas en redes de agua potable.

Los sistemas acústicos de correlación intervienen en la etapa de localización. Mientras la pre-localización define tramos donde existe una probabilidad alta de existencia de fugas, la localización define puntos en esos tramos donde existe una probabilidad alta de la existencia de fugas. El diagrama general de flujo de esta etapa se muestra en la Figura 3.10.

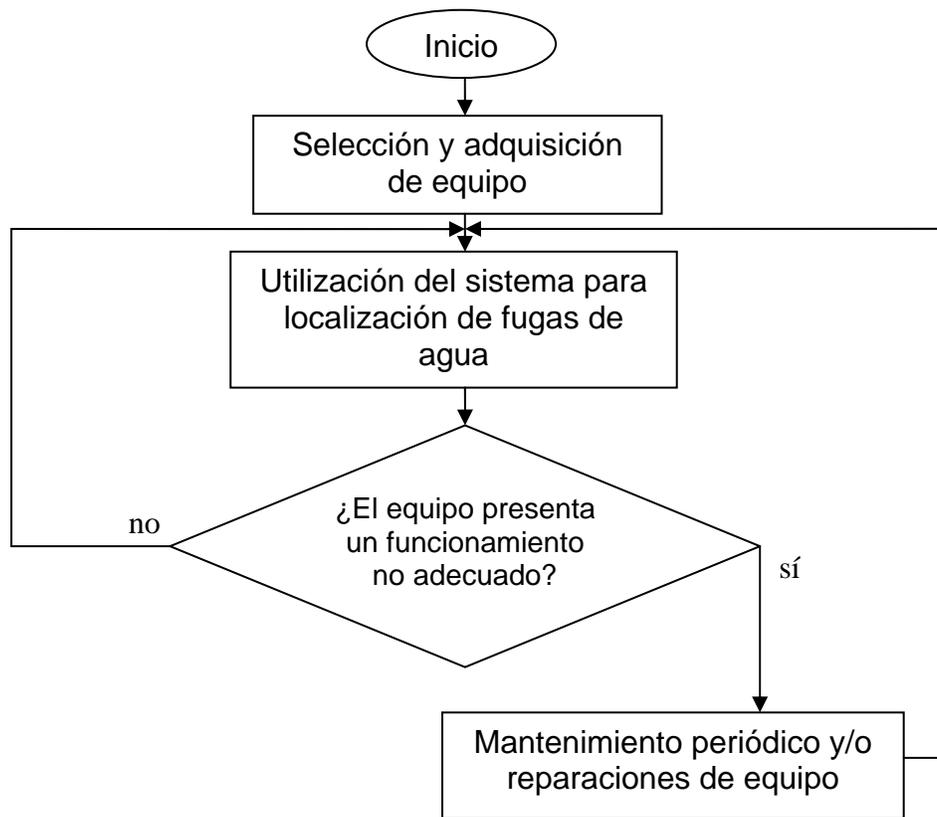


Figura 3.10 Metodología de la utilización de los sistemas acústicos de correlación.

Aunque la selección de equipo y el mantenimiento no forman parte del funcionamiento básico, son de interés primordial para los organismos operadores de las redes de agua potable, ya que una adquisición basada en lo anterior evitará tener rendimientos no eficientes para la inspección sistemática de una red extensa o tener que suspender la ejecución de los servicios debido a un largo proceso de mantenimiento o reparación. A continuación se desarrolla cada una de las sub-etapas.

**3.4.1 Selección y adquisición de equipo.** Consiste en seleccionar el equipo más adecuado a las necesidades de los sectores a estudiar, que dependerá de la extensión de los mismos y del recurso destinado a este rubro. Se describirán los sistemas dependiendo del área que puedan estudiar y sus características principales, para que con base en ello se pueda elegir el mejor.

### CAPÍTULO 3 SISTEMA ACÚSTICO DE CORRELACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA

Existen diversos fabricantes de sistemas acústicos de correlación (hasta el 2008, ninguno de procedencia mexicana) y cada uno de ellos ofrece algunas especificaciones exclusivas de su producto, sin embargo, las características esenciales de todos ellos son las mismas.

En principio, existen dos divisiones de sistemas acústicos de correlación:

a) Correlacionadores en tiempo real. Son sistemas compuestos por una unidad central de correlación, que se comunica con los sensores de manera inalámbrica (mediante radios), y el resultado de la correlación cruzada se ve en sitio. Cuenta por lo regular con dos sensores. Un modelo moderno puede ser visto en la Figura 3.11.



Figura 3.11 Sistema acústico de correlación en tiempo real. Se pueden observar la unidad de correlación y los radios (PRIMAYER 2005).

b) Correlacionadores de post-procesamiento. Son sistemas compuestos por  $n$  sensores que son programados para realizar un registro a una hora determinada. Una vez terminado el registro, se descarga la información a una computadora y se procesa la información para obtener el resultado de la correlación cruzada. Un modelo moderno puede ser observado en la Figura 3.12.

## CAPÍTULO 3 SISTEMA ACÚSTICO DE CORRELACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA



Figura 3.12 Sistema acústico de correlación de post-procesamiento. Se pueden observar los registradores y el maletín que sirve para programarlos y descargar la información a una computadora (PRIMAYER 2005).

Dependiendo del tipo de sensor

a) Acelerómetros. Sensores que utilizan el principio piezo-eléctrico (son sensibles a la vibración). Cuando hay vibración presente, los sensores crean una señal eléctrica con la forma de la intensidad de ruido presente. Se colocan en algún accesorio de la red mediante una base magnética. Algunas de sus características son las siguientes.

- Fáciles de colocar (no requieren modificaciones a la red).
- Excelentes en frecuencias medias y altas de ruido de fuga (tuberías metálicas o de diámetro pequeño, de hasta 12 pulgadas ).
- Sensitivos a ruido ambiental.

b) Hidrófonos. Utilizan un transductor de presión oceanográfico, por lo que estos sensores deben estar colocados dentro de la tubería para detectar las vibraciones en el medio. Sus características se presentan en seguida.

### CAPÍTULO 3 SISTEMA ACÚSTICO DE CORRELACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA

- Requieren de una modificación a la red de agua (en los puntos de estudio se deberá contar con una válvula de inserción para su utilización).
- Excelentes en frecuencias bajas (tuberías plásticas, de diámetro grande, mayores a 16 pulgadas, o en distancias considerables)

El proceso de la adquisición por parte del correlacionador tiene un especial interés, ya que dependiendo de las características del equipo a adquirir, podrían ser determinantes en la decisión de su adquisición.

La Figura 3.13 muestra el proceso de conversión analógica digital (llevada a cabo por los sensores), que conlleva dos procesos: el muestreo y la cuantificación:

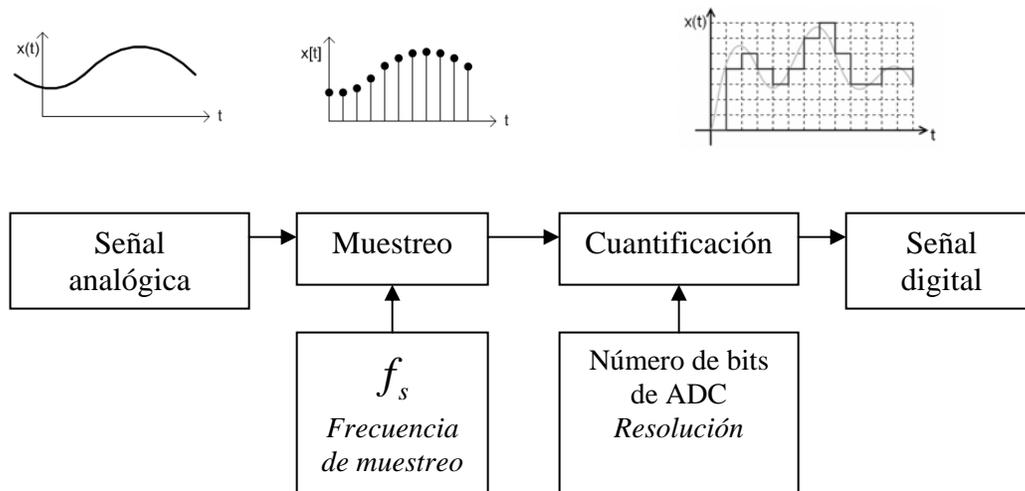


Figura 3.13 Proceso de la creación de la señal digital por parte del sensor de los sistemas acústicos de correlación.

*Muestreo.* Siendo la señal de interés limitada en ancho de banda, ésta puede ser muestreada (esto es, los valores de la señal pueden ser medidos y guardados cada cierto intervalo de tiempo  $T$ ) y puede ser posteriormente reproducida exactamente si la frecuencia de este muestreo cumple con el teorema de Shannon-Nyquist. En esencia, nos dice que si se conoce la componente de frecuencia más alta de la señal de interés (que se puede ser denominada como  $f$ ), la frecuencia de muestreo mínima para reconstruir perfectamente la señal ( $f_s$ ) debe tener por lo menos el valor de dos veces la frecuencia máxima:

$$f_s = 2f \tag{3.7}$$

## CAPÍTULO 3 SISTEMA ACÚSTICO DE CORRELACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA

En nuestro problema en particular y considerando los estudios que ha realizado el Instituto Mexicano de Tecnología de Agua (IMTA), los componentes más importantes de frecuencia de los ruidos de fuga se encuentran en la banda comprendida entre los 1 y 2000 Hz. Aplicando a la fórmula (3.7), la tasa de muestreo mínima que debe contar un sistema acústico de correlación es igual a

Frecuencia mínima de muestreo = 2 \* Frecuencia máxima de componente de fuga

$$\text{Frecuencia mínima de muestreo} = 2 * 2000 \text{ Hz} = 4000 \text{ Hz} \quad (3.8)$$

**Cuantificación.** Es el proceso de convertir el rango continuo de los valores de amplitud a un rango discreto. La resolución de la cuantificación depende del número de valores discretos que pueden ser producidos. Estos valores son almacenados regularmente en forma binaria, así que la resolución es expresada en bits. Por tanto, el número posible de valores discretos o niveles es una potencia de 2. Por ejemplo, un convertidor analógico digital con una resolución de 8 bits puede producir 256 niveles distintos, ya que  $2^8 = 256$ . El proceso de cuantificación puede ser observada en la Figura 3.14.

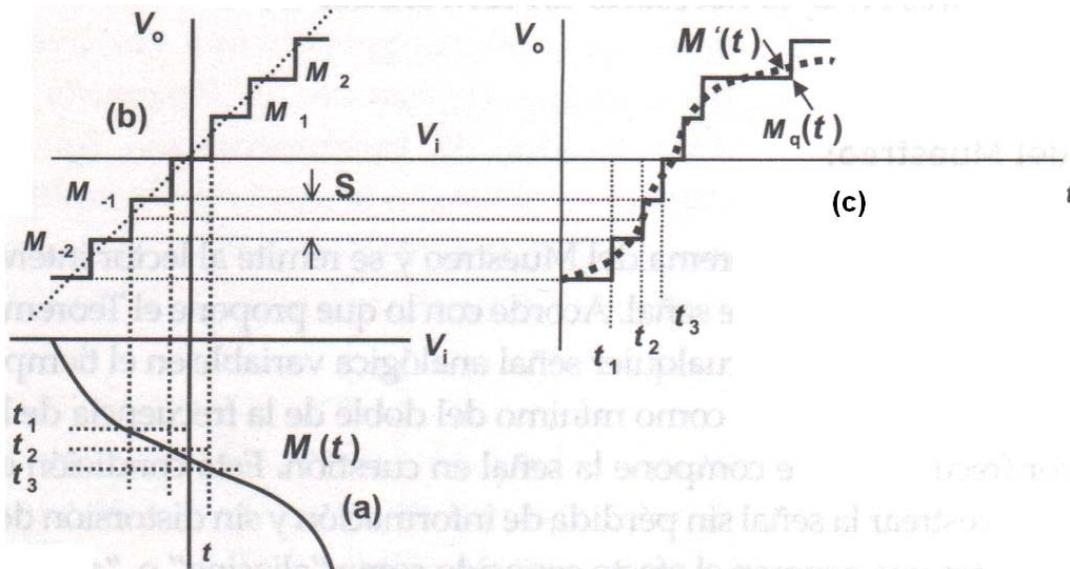


Figura 3.14 Operación de cuantificación a) señal de entrada  $M(t)$  b) función de transferencia del cuantificador en línea llena, en línea de puntos función de transferencia lineal y c)  $M_q(t)$  función  $M(t)$  cuantificada y en línea de puntos  $M'(t)$  a la que se aplicó la función de transferencia lineal en línea de trazos (Chicala 2004).

## CAPÍTULO 3 SISTEMA ACÚSTICO DE CORRELACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA

La señal cuantificada es una aproximación de la señal original y la calidad de la aproximación se puede mejorar reduciendo el tamaño de los escalones y por lo tanto, aumentando el número de niveles permitidos. Esto implica aumentar la cantidad de bits del ADC.

El mantenimiento principal de estos sistemas es el reemplazo de la batería tanto de los sensores como del radio o unidad de control. Usualmente tienen una vida útil de 5 a 10 años. El tipo de componentes que lo conforman son de montaje superficial, por tanto, la reparación requiere el cambio completo de la tarjeta donde se encuentre el componente que está fallando.

Se debe acordar perfectamente con el distribuidor de qué manera se realiza lo anterior y la responsabilidad para ello, para que este proceso se lleve de la mejor y más rápida manera posible.

En conclusión, la selección de equipo deberá obedecer a los siguientes criterios.

- a) El sistema de correlación deberá tener una frecuencia de muestreo por lo menos de 2 veces la frecuencia máxima de las componentes de ruido de fuga, es decir  $f_{s\text{ mínima}} = 2000 * 2 = 4000 \text{ Hz}$ .
- b) La selección de un sistema en tiempo real (con dos sensores) o de uno de post-procesamiento (con  $n$  sensores) está en función de la longitud de red a estudiar. Entre mayor sea, la opción de tener  $n$  sensores será más adecuada.
- c) La selección del tipo de sensor está en función de los diámetros y los materiales de las tuberías. En el caso de sensores hidrófonos, se deberá considerar la herramienta necesaria para su utilización.
- d) Se obtendrá una mejor información entre mayor sea el número de bits del sistema para la realización de la conversión analógica digital.
- e) Preferentemente, el software especializado, los manuales y las guías deberán estar en idioma español. Se deben además especificar las características de hardware y sistema operativo que requiere el software.
- f) El distribuidor deberá contar con mecanismos detallados y eficientes para el mantenimiento y reparación del sistema.

**3.4.2. Localización de fugas de agua.** El resultado obtenido mediante los sistemas pre-localizadores en una sección de red, se muestra en la Figura 3.15.

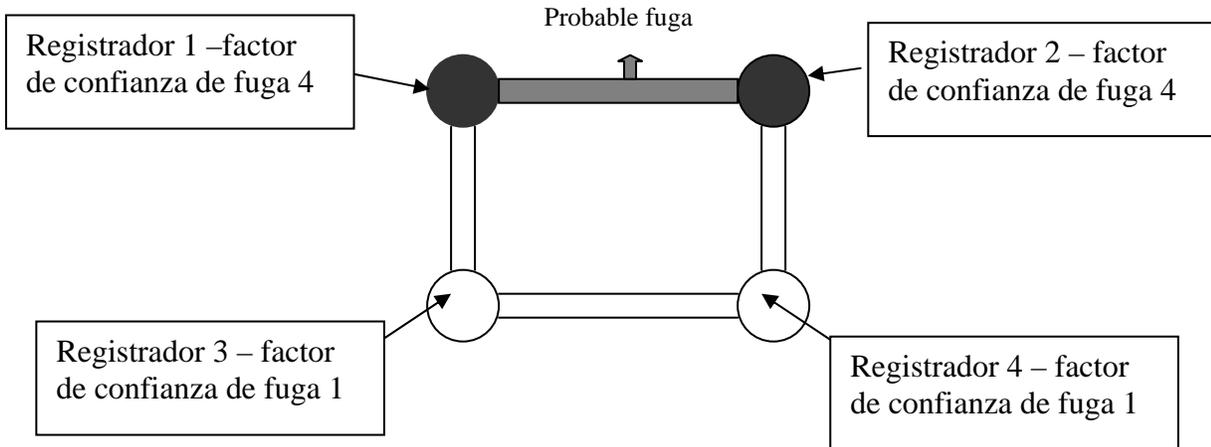


Figura 3.15 Resultado de pre-localizador. En el tramo iluminado de color azul, existe la probabilidad alta de encontrar fuga(s) de agua.

Lo que se tiene son tramos de red con probabilidad alta de fuga de agua. Para cada tramo se utiliza el sistema de correlación para encontrar puntos donde existe una probabilidad alta de fuga. El procedimiento se muestra en la Figura 3.16.

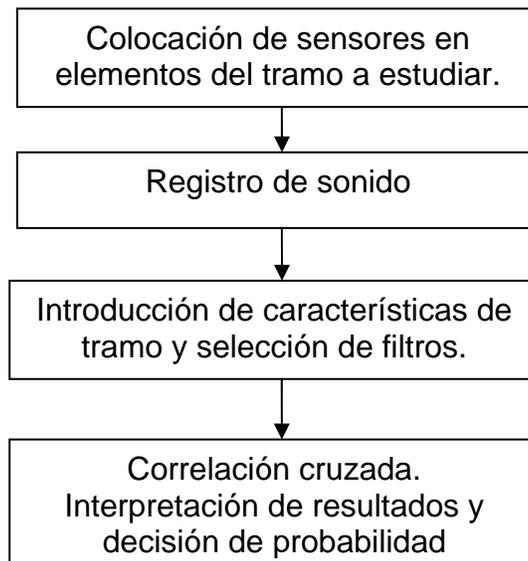


Figura 3.16 Procedimiento de localización utilizando correlacionadores.

### CAPÍTULO 3 SISTEMA ACÚSTICO DE CORRELACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA

*Colocación de sensores en elementos del tramo a estudiar.* Consiste en adaptar el sensor de tal manera que pueda captar las vibraciones producidas por el ruido de fuga presente.

*Acelerómetros.* Cuentan con un imán como base para realizar la sujeción, por tanto, se requiere un elemento metálico de la red para su colocación. Puede ser una sección de la tubería o una parte de alguna válvula. Se debe retirar cualquier material adherido distinto de la tubería, ya que podría dificultar la adquisición del sonido. Uno de estos sensores instalados puede observarse en la Figura 3.17.



Figura 3.17 Sensor de sistema correlación sujeto mediante imán a vástago de válvula (PRIMAYER 2005).

*Hidrófonos.* Para su utilización, se requiere de una válvula de inserción, la cual requiere una instalación especial y es de instalación permanente. La válvula permite introducir el sensor sin necesidad de interrumpir el servicio. Uno de estos sensores con sus accesorios puede ser observada en la Figura 3.18.

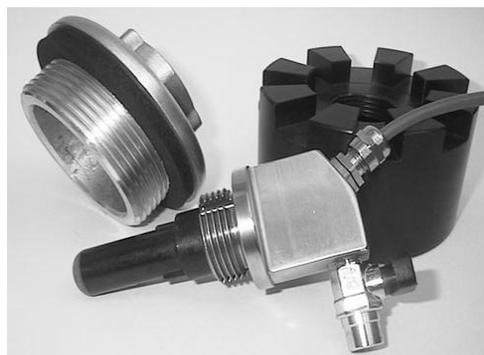


Imagen 3.18 Sensor hidrófono junto a su válvula de inserción (PRIMAYER 2005).

## CAPÍTULO 3 SISTEMA ACÚSTICO DE CORRELACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA

*Registro de sonido.* Este muestreo es llevado de manera automática por el sensor, y el operador sólo debe programar la hora de inicio (para los sistemas de post-procesamiento) o bien, iniciar la adquisición en sitio (para los sistemas de correlación en tiempo real).

Se recomienda realizar estos estudios en el horario comprendido entre las 0:00 y 5:00 horas por lo siguiente:

- La cantidad de ruido ambiental es menor
- Los consumos de agua son mínimos
- La presión de la red usualmente es máxima

Si se tiene una presión mínima en red de  $1 \text{ kg/cm}^2$ , se podrá asegurar que los datos obtenidos son fidedignos.

*Introducción de características de tramo y selección de filtros.* Una vez realizado el registro de sonido (para los sistemas de post-procesamiento) o mientras se realiza la adquisición de datos (para los sistemas de correlación en tiempo real) se solicitará la introducción de la siguiente información por parte del programa:

- Longitud de la tubería del tramo entre los sensores
- Material de la tubería
- Diámetro de la tubería

Recordando la ecuación  $L = \frac{D - (V \cdot \tau)}{2}$ , para obtener una longitud  $L$  de distancia del sensor 1, y la distancia al sensor 2, que es  $L + (V \cdot \tau)$  se puede observar que para cualquier  $L$  comprendida en el tramo inspeccionado

$$L = f(D, V, \tau) \quad (3.9)$$

Además

$$V = f(\text{diámetro de tubería, material de tubería}) \quad (3.10)$$

donde  $V$  es la velocidad de sonido en la tubería,  $D$  es la longitud de la tubería del tramo entre los sensores y  $\tau$  es el tiempo de retardo de la señal de ruido. Conforme mayor sea la exactitud de esta información, también será la exactitud del resultado entregado por la función de correlación cruzada.

## CAPÍTULO 3 SISTEMA ACÚSTICO DE CORRELACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA

Los valores de la longitud de la tubería del tramo y de los sensores, material de la tubería y diámetro de la tubería son información que puede ser obtenida en el catastro de la red. La velocidad del sonido de la tubería es calculada de manera automática por los programas de correlación cruzada.

Un filtro es una combinación de elementos diseñado para seleccionar o rechazar una banda de frecuencias. Para los sistemas acústicos de correlación, un filtro permite que las componentes de frecuencia de la señal de ruido sean significativas en la función correlación cruzada, mientras las componentes de frecuencia de sonido que no pertenecen a señales de ruido sean idealmente eliminadas. El diagrama mostrado en la Figura 3.19 ejemplifica lo anterior.

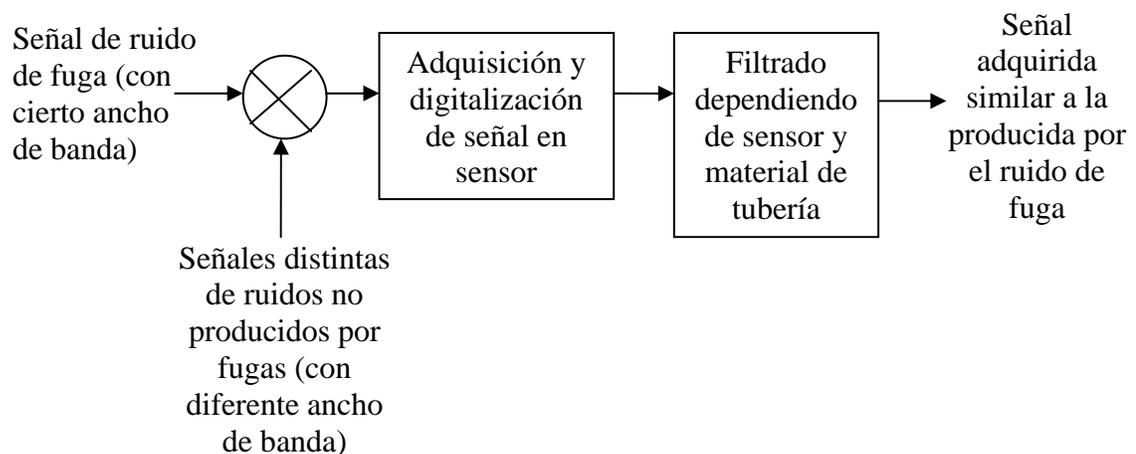


Figura 3.19 Diagrama básico de la función del filtrado en un sistema de correlación.

La selección de filtros depende del material y el tipo de sensor utilizado. Como referencia, las Tablas 3.1 y 3.2 muestran algunos valores típicos de velocidad para diversos materiales y diámetros, y los filtros recomendados dependiendo del tipo de sensor, acelerómetro (Mic/Mic) o hidrófono (Hydro/Hydro).

CAPÍTULO 3 SISTEMA ACÚSTICO DE CORRELACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA

Tabla 3.1 Velocidades y selección de filtros para los materiales asbesto-cemento, hierro colado, concreto, cobre y hierro dúctil (PRIMAYER 2005)

<b>AC</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Filtros (Hz) Mic/Mic</b>	<b>Filtros (Hz) Hydro/Hydro</b>
Asbesto	< 100	1080	100 – 1000	25 – 500
Cemento	100 – 200	1010		
	210 – 350	980		
	360 – 500	960		
	510 – 800	930		
	> 800	900		

<b>CI</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Filtros (Hz) Mic/Mic</b>	<b>Filtros (Hz) Hydro/Hydro</b>
Hierro	< 100	1280	100 – 1000	25 – 500
Colado	100 – 200	1220		
	210 – 300	1160		
	310 – 400	1120		
	410 – 600	1100		
	610 – 800	1080		
	> 800	1050		

<b>CON</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Filtros (Hz) Mic/Mic</b>	<b>Filtros (Hz) Hydro/Hydro</b>
Concreto	< 500	1160	100 – 1000	25 – 500
	500 – 750	1110		
	760 – 1000	1060		
	1010 – 1500	1030		
	> 1500	1000		

<b>CO</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Filtros (Hz) Mic/Mic</b>	<b>Filtros (Hz) Hydro/Hydro</b>
Cobre	< 15	1290	100 – 2000	25 – 1000
	15 – 25	1220		
	26 – 50	1180		
	> 50	1100		

<b>DI</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Filtros (Hz) Mic/Mic</b>	<b>Filtros (Hz) Hydro/Hydro</b>
Hierro	< 100	1320	100 – 2000	25 – 1000
Dúctil	100 – 200	1280		
	210 – 300	1210		
	310 – 400	1180		
	410 – 600	1130		
	610 – 800	1110		
	810 – 1000	1070		
	> 1000	1050		

CAPÍTULO 3 SISTEMA ACÚSTICO DE CORRELACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA

Tabla 3.2 Velocidades y selección de filtros para los materiales línea de concreto y hierro dúctil, hierro galvanizado, polietileno de alta densidad, plomo y polietileno de mediana densidad (PRIMAYER 2005)

<b>DCL</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Filtros (Hz) Mic/Mic</b>	<b>Filtros (Hz) Hydro/Hydro</b>
Línea de Concreto y Hierro Dúctil	< 250	1140	100 – 2000	25 – 1000
	250 – 500	1120		
	510 – 750	1100		
	760 – 1000	1050		
	> 1000	1010		

<b>GI</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Filtros (Hz) Mic/Mic</b>	<b>Filtros (Hz) Hydro/Hydro</b>
Hierro Galvanizado	< 100	1320	100 – 2000	25 – 1000
	100 – 200	1280		
	210 – 300	1210		
	310 – 400	1180		
	410 – 600	1130		
	610 – 800	1110		
	810 – 1000	1070		
> 1000	1050			

<b>HDPE</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Filtros (Hz) Mic/Mic</b>	<b>Filtros (Hz) Hydro/Hydro</b>
Polietileno de Alta Densidad	< 25	395	25 – 500	3 – 250
	25 – 50	380		
	60 – 150	370		
	> 150	350		

<b>AC</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Filtros (Hz) Mic/Mic</b>	<b>Filtros (Hz) Hydro/Hydro</b>
Plomo	< 25	1220	100 – 1000	25 – 500
	> 25	1160		

<b>MDPE</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Filtros (Hz) Mic/Mic</b>	<b>Filtros (Hz) Hydro/Hydro</b>
Polietileno de Mediana Densidad	< 25	380	25 – 500	3 – 250
	25 – 50	360		
	60 – 150	350		
	> 150	340		

*Correlación cruzada, interpretación de resultados y decisión de probabilidad.* Una vez introducida la información del tramo de red, se presentará la función de correlación cruzada en función del tiempo de retardo, que se asocia a la distancia entre los sensores (el tramo inspeccionado). Un resultado típico puede ser observado en la Figura 3.20.

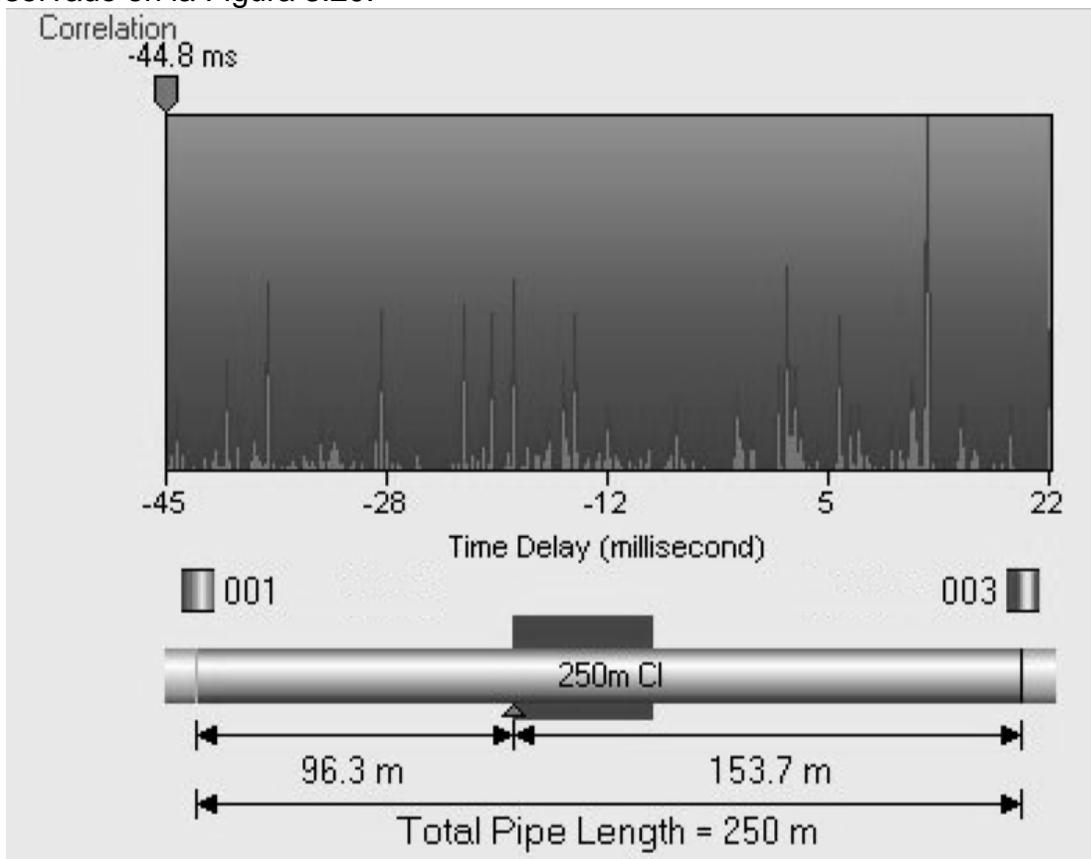


Figura 3.20 Función de correlación cruzada en un tramo de tubería de hierro colado, con una longitud de 250 metros. El cursor que está definido por la flecha roja puede ser controlado para poder variar la distancia del valor de la función de correlación cruzada a la distancia de los sensores. *Correlation*, *Time Delay* y *Total Pipe Length* se traducen como correlación, tiempo de retardo y longitud total de tubería respectivamente (PRIMAYER 2005).

Los programas especializados no identifican la presencia de fugas respecto a la función de correlación cruzada, sino que el operador debe juzgar cualitativamente el resultado entregado, y decidir los puntos donde se encuentra probablemente una fuga. Recordando la definición de la función, ésta tiene valor máximo cuando

## CAPÍTULO 3 SISTEMA ACÚSTICO DE CORRELACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA

las señales son idénticas, y mínimo cuando no existe una relación entre ellas. Por tanto, la presencia de un valor máximo dentro de la función indica que existe una fuente de ruido que fue capturada por ambos sensores. La Figura 3.21 muestra el cursor en la posición donde la función de correlación cruzada es máxima.

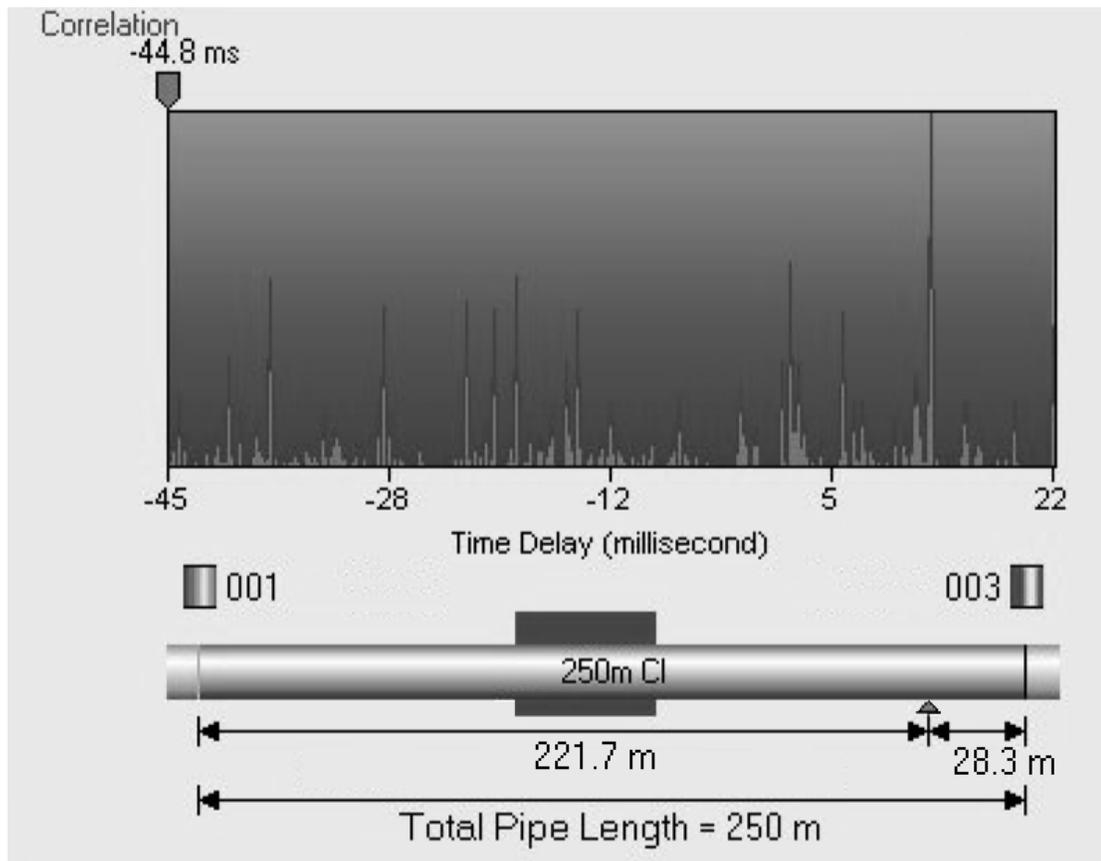


Figura 3.21 La función de correlación cruzada máxima, asociada a un tiempo de retardo y una distancia de los sensores (221.7 m y 28.3 m). *Correlation*, *Time Delay* y *Total Pipe Length* se traducen como correlación, tiempo de retardo y longitud total de tubería respectivamente (PRIMAYER 2005)

La identificación de valores máximos de la función no debe considerarse siempre como la presencia de fuga, sino en primera instancia como una fuente de sonido. Estas fuentes pueden ser producidas por:

### a) Elementos en la tubería

- Fuga de agua en la tubería o accesorio
- Obstrucción parcial de tubería por agente externo (sedimentos)

## CAPÍTULO 3 SISTEMA ACÚSTICO DE CORRELACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA

### b) Elementos normales de la red

- Consumos por parte de usuario (flujo de agua en toma domiciliaría)
- Válvulas reductoras de presión
- Válvulas parcialmente cerradas (válvulas castigadas)
- Cambios en el diámetro de la tubería
- Interconexión o derivación de línea.

### c) Elementos externos de la red

- Ruido eléctrico (producido por líneas de distribución, transformadores o motores con una frecuencia de 60 Hz)
- Proximidad a tuberías de descarga de efluentes (red de alcantarillado)

Por esto, la etapa de puntualización es la encargada de identificar finalmente la presencia de fugas en los puntos detectados con probabilidad por el correlacionador, ya que el ruido producido por una fuga es característico y distinto a los ruidos producidos por elementos de la red o elementos externos. También el contar con un catastro actualizado permite identificar la ubicación de los elementos propios de la red.

Finalmente, y gracias a la característica de que se pueden detectar fuentes de ruido diferentes a la fuga, es posible utilizar el sistema acústico de correlación para la localización de tomas domiciliares, lo cual será explicado a detalle en el Capítulo 5.

## Capítulo 4

### Sistema de radar de penetración de suelos

#### 4.1 Descripción general

El uso del sistema de radar se origina en aplicaciones militares en la Segunda Guerra Mundial, donde es usado como sistema de detección de naves enemigas en una zona delimitada. Dicho sistema cuenta con un transmisor, que emite ondas electromagnéticas, las cuales viajan a través del aire (detección aérea), o agua (detección submarina), que al encontrarse con un objetivo (reflector), se reflejan y son captadas por un receptor y procesadas en una unidad de control. Radar viene de “Radio Detection and Ranging”, radio detección y medición.

El radar de penetración de suelos se basa en la emisión y propagación de ondas electromagnéticas al subsuelo, las cuales se propagan y reflejan las discontinuidades del medio. Los conceptos que se tratarán son basados en la teoría electromagnética definida por las leyes de Maxwell, en las que se comprenden los campos electromagnéticos.

El rango de frecuencias que comprende la técnica de radar de penetración de suelos se encuentra desde los 10 MHz hasta los 2500 MHz, contemplando el ancho de banda de las frecuencias de radio. Diferentes tipos de anchos de banda y aplicaciones puede ser visto en la Figura 4.1.

## CAPÍTULO 4 SISTEMA DE RADAR DE PENETRACIÓN DE SUELOS

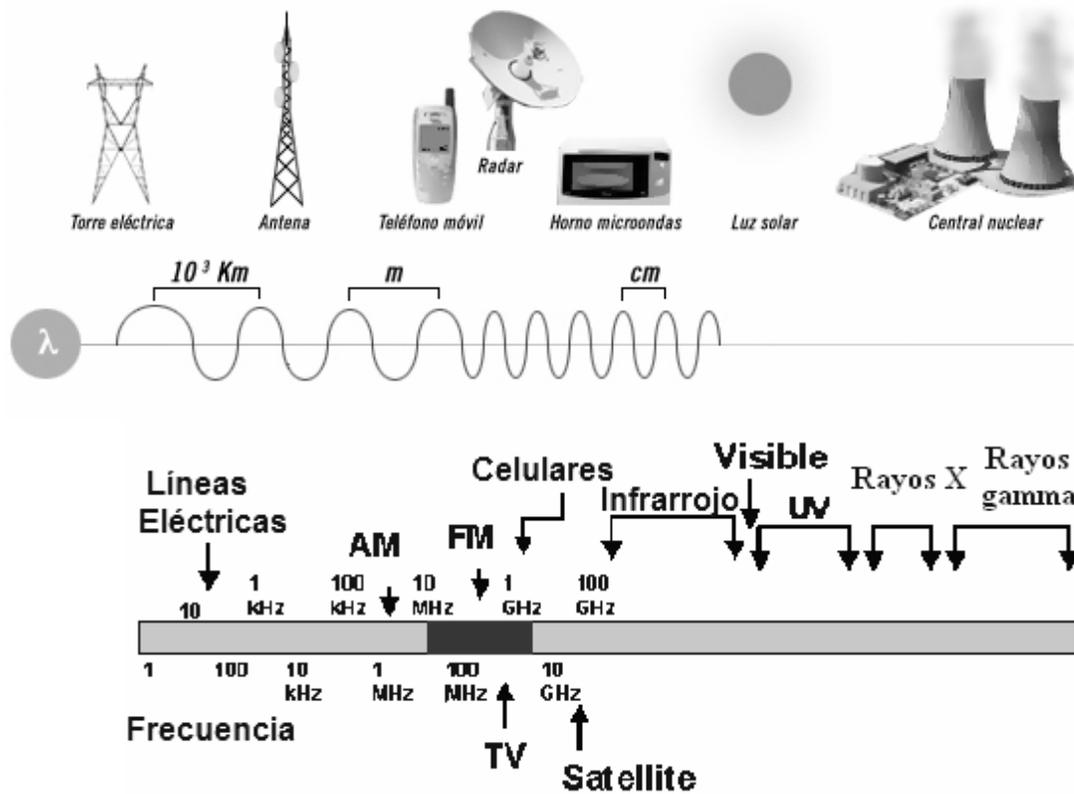


Figura 4.1 Espectro electromagnético (GSSI 2004)

Dentro del ancho de banda del radar de penetración de suelos, se encuentran frecuencias que son generadas por fuentes externas, como los celulares, equipos de radio-comunicación, señales de TV, entre otros, por lo que son fuentes de interferencia para el radar de penetración de suelos.

El radar de penetración de suelos es un método indirecto y no destructivo para realizar prospección del subsuelo, por lo que las aplicaciones de la técnica son amplias, usándose en estudios arqueológicos, geológicos, localización de instalaciones en zonas urbanas, estudios geofísicos, estudios ambientales, estudios de estructuras de concreto, entre otros. La Figura 4.2 muestra algunas de ellas.

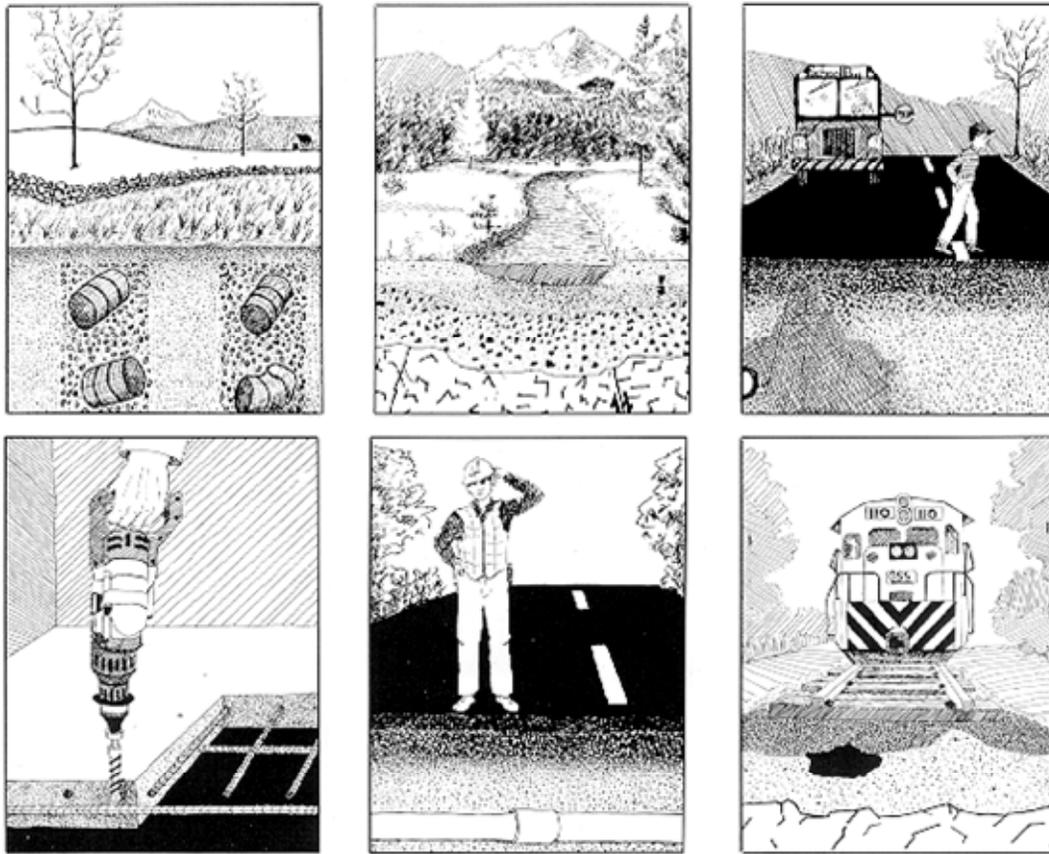


Figura 4.2 Algunas aplicaciones comprenden estudios ambientales, estudios geológicos, localización de oquedades, inspecciones en estructuras de concreto, localización de instalaciones, estudios del subsuelo en vías de transporte, entre otras (GSSI 2004).

En la presente sección se estudiará solamente a la localización de tuberías de la red de agua potable, específicamente en la localización de instalaciones no registradas de agua potable. A continuación se explicará la teoría de la propagación de ondas electromagnéticas en medios diferentes al aire, lo cual es la base del diseño de sistemas de radar de penetración de suelos.

## 4.2 Marco teórico

Una onda electromagnética es la perturbación simultánea de los campos eléctricos y magnéticos existentes en una misma región. Se le llaman transversales por

encontrarse en fase pero siendo perpendiculares entre sí, y a su vez perpendiculares a su dirección de propagación. Lo anterior puede ser observado en la Figura 4.3.

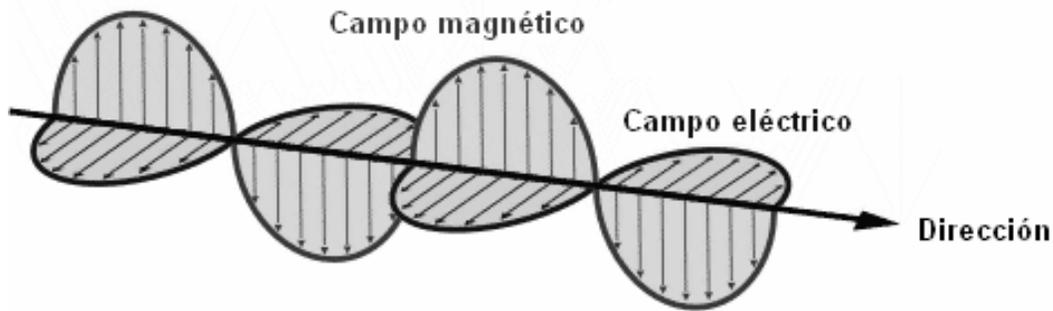


Figura 4.3 Onda electromagnética con sus componentes de campo eléctrico y magnético (Kraus 1999).

Existen parámetros electromagnéticos (permitividad dieléctrica, conductividad, y permeabilidad magnética) que definen un medio al paso de una onda electromagnética.

Para medios homogéneos, las ecuaciones relacionadas se expresan como sigue:

$$\vec{E} = \frac{1}{\sigma} \vec{J} \quad (4.1)$$

donde:

$\vec{E}$ : intensidad del campo eléctrico en V/m

$\vec{J}$ : densidad de corriente eléctrica en A/m<sup>2</sup>

$\sigma$ : conductividad eléctrica en S/m

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (4.2)$$

donde:

$\vec{D}$ : vector de desplazamiento eléctrico en C/m<sup>2</sup>

$\epsilon$ : permitividad dieléctrica absoluta, adimensional

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (4.3)$$

donde:

$\vec{H}$  : intensidad del campo magnético en A/m

$\vec{B}$  : inducción magnética en W/m<sup>2</sup>

$\mu$ : permeabilidad magnética absoluta H/m

*Conductividad.* La conductividad de un medio nos proporciona una medida de la respuesta de sus cargas libres en presencia de un campo eléctrico externo, siendo el factor de proporcionalidad entre el campo libre aplicado y la densidad de volumen de corriente debido al movimiento de estas cargas libres. Es decir, proporciona una medida de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica.

$$\vec{E} = \frac{1}{\sigma} \vec{J} ; \text{Ley de Ohm} \quad (4.4)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4.5)$$

donde:

$\sigma$ : conductividad eléctrica en S/m

$\rho$ : resistividad eléctrica en  $\Omega \cdot m$

La conductividad de un medio se define como la inversa de su resistividad eléctrica. Con esto se puede distinguir entre materiales conductores, semiconductores, y aislantes. Esta clasificación puede ser observada en la Tabla 4.1. y en la Figura 4.4 se pueden observar algunos valores de materiales de resistividad y conductividad.

Tabla 4.1 Rangos de conductividad para definición de materiales (Daniels 2004).

Conductores	$\sigma > 10^5$ en S/m
Semiconductores	$10^{-8} [S/m] < \sigma < 10^5$ en S/m
Aislantes	$\sigma < 10^{-8}$ en S/m

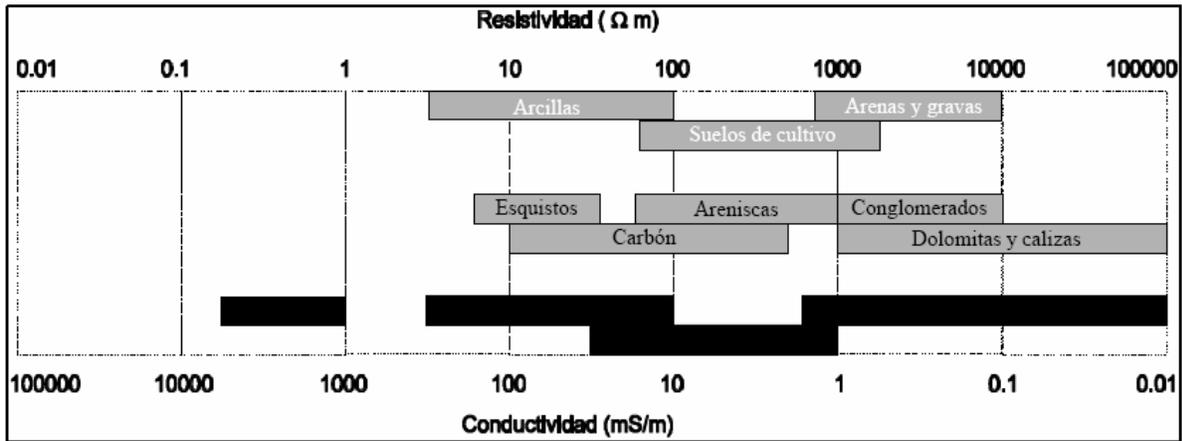


Figura 4.4 Resistividad y conductividad de materiales comunes en los estudios de prospección (GSSI 2004)

La mayoría de los materiales que se encuentran en el subsuelo cuentan con conductividades bajas distinguiéndose como aislantes (excepto materiales arcillosos o con materiales metálicos), los cuales se ven afectados directamente por la cantidad de agua contenidos en los poros del material, siendo en la mayoría de los casos lo que dicta su conductividad.

En medios con condiciones de baja conductividad (menor de  $1 \times 10^{-7}$  S/m) como el aire, granito seco, caliza seca, concreto, asfalto, la utilización del GPR es excelente. En medios con condiciones de media conductividad (menor de  $1 \times 10^{-2}$  S/m) como el agua dulce, hielo, nieve, arena, arcilla seca, basalto, aluvión, la utilización del radar de penetración de suelo es buena. En medios con condiciones de alta conductividad (mayores a  $1 \times 10^{-2}$  S/m) como la arcilla húmeda, lutita húmeda, y el agua de mar, la utilización del GPR es muy difícil.

Permitividad dieléctrica. La permitividad dieléctrica absoluta es una constante de proporcionalidad entre la intensidad del campo eléctrico externo aplicado y el vector desplazamiento eléctrico

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \tag{4.6}$$

La permitividad dieléctrica absoluta se define como:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \tag{4.7}$$

## CAPÍTULO 4 SISTEMA DE RADAR DE PENETRACIÓN DE SUELOS

siendo:

$\varepsilon_o$  : permitividad dieléctrica del vacío en F/m

$\varepsilon_r$  : permitividad dieléctrica relativa del material, adimensional

La permitividad dieléctrica relativa es una constante que da una medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. Proporciona un valor de la respuesta estática del material cuando está en presencia de un campo eléctrico externo. Algunos valores de dieléctrico para materiales comunes en los estudios de prospección pueden ser observados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Valores de dieléctrico para algunos materiales comunes (GSSI 2004).

Material	$\varepsilon_r$
Aire	1
PVC	3
Arena seca	3-6
Concreto	5-8
Basalto	8
Tierra de cultivo	15
Arcilla seca	16
Arcilla húmeda	32
Agua	81

Permeabilidad magnética. La permeabilidad magnética absoluta relaciona la inducción magnética con la intensidad de campo magnético

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.8)$$

La permeabilidad magnética absoluta se define como:

$$\mu = \mu_o \mu_r \quad (4.9)$$

donde:

$\mu_o$  : permeabilidad magnética del vacío  $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$  en H/m

$\mu_r$  : permeabilidad magnética relativa del material

En la mayoría de los materiales que se encontrarán en los estudios de prospección con radar de penetración de suelos (excepto en aquellos que

## CAPÍTULO 4 SISTEMA DE RADAR DE PENETRACIÓN DE SUELOS

contengan materiales ferromagnéticos) se cumple que la permeabilidad magnética relativa es próxima a 1, no dependiendo de la frecuencia del campo magnético. La permeabilidad magnética del vacío se relaciona con la permitividad dieléctrica en la ecuación:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_o \mu_o}} = 2.998 \times 10^8 \quad (4.10)$$

Siendo  $c$  la velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío, con unidades de  $m/s$ .

*Velocidad de ondas electromagnéticas en un medio material.* La velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío es de  $2.998 \times 10^8$  en  $m/s$ . Para conocer la velocidad de una onda electromagnética en un medio material, consideraremos las ecuaciones de una onda plana, tanto para el campo eléctrico como para el campo magnético

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_o e^{(i\omega t - \gamma \vec{r})} \quad (4.11)$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}_o e^{(i\omega t - \gamma \vec{r})} \quad (4.12)$$

donde:

$\vec{r}$  : es la dirección de propagación de la onda

$t$  : tiempo

$\vec{E}_o$  : vector del campo eléctrico

$\vec{H}_o$  : vector del campo magnético

$\omega$  : frecuencia angular ( $2\pi f$ )

$\gamma$  : constante de propagación, o número de onda complejo

Se puede factorizar la ecuación de la siguiente manera:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_o e^{(i\omega t)} e^{(-\gamma \vec{r})} \quad (4.13)$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}_o e^{(i\omega t)} e^{(-\gamma \vec{r})} \quad (4.14)$$

donde:

## CAPÍTULO 4 SISTEMA DE RADAR DE PENETRACIÓN DE SUELOS

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_o e^{i\omega t}$$

$$\vec{H}(t) = \vec{H}_o e^{i\omega t}$$

que son las ecuaciones que definen a la propagación de la onda en el tiempo, y también se tiene:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_o e^{-\gamma \vec{r}}$$

$$\vec{H}(\vec{r}) = \vec{H}_o e^{-\gamma \vec{r}}$$

que es la ecuación de la onda que define la disminución de la amplitud de la onda en la distancia recorrida, es decir, considera la atenuación de la onda electromagnética durante su propagación por el medio.

El término  $\gamma$  puede expresarse en función de los parámetros electromagnéticos característicos de cada medio, siendo:

$$\gamma = i\omega \sqrt{\epsilon_o \epsilon_r \mu_o \mu_r} = i \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (4.15)$$

La constante de propagación se define como:

$$\gamma = \alpha + i\beta \quad (4.16)$$

Donde  $\alpha$  determina el factor de atenuación de la onda y  $\beta$  denominada constante de fase, determina la velocidad de fase de la misma. Con lo que entonces se tiene:

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \text{Im} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (4.17)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} \text{Re} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (4.18)$$

y se sabe que

$$\beta = \frac{\omega}{v} \quad (4.19)$$

igualando:

$$v = \frac{c}{\operatorname{Re} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (4.20)$$

y considerando que el medio es no magnético, la expresión se simplificará, ya que  $\mu_r = 1$ , teniendo así:

$$v = \frac{c}{\operatorname{Re} \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.21)$$

También se puede definir a la velocidad de una onda electromagnética en un medio material con la ecuación:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (4.22)$$

ya que se sabe que  $\epsilon = \epsilon_o \epsilon_r$  y  $\mu = \mu_o \mu_r$  por lo que:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_o \mu_r \mu_o}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_o \mu_o}} \quad (4.23)$$

quedando así:

$$v = c \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (4.24)$$

con  $\mu_r = 1$  queda:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.25)$$

siendo la expresión que define la velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío. La Figura 4.5 muestra la variación de esta velocidad en función de la permitividad dieléctrica relativa.

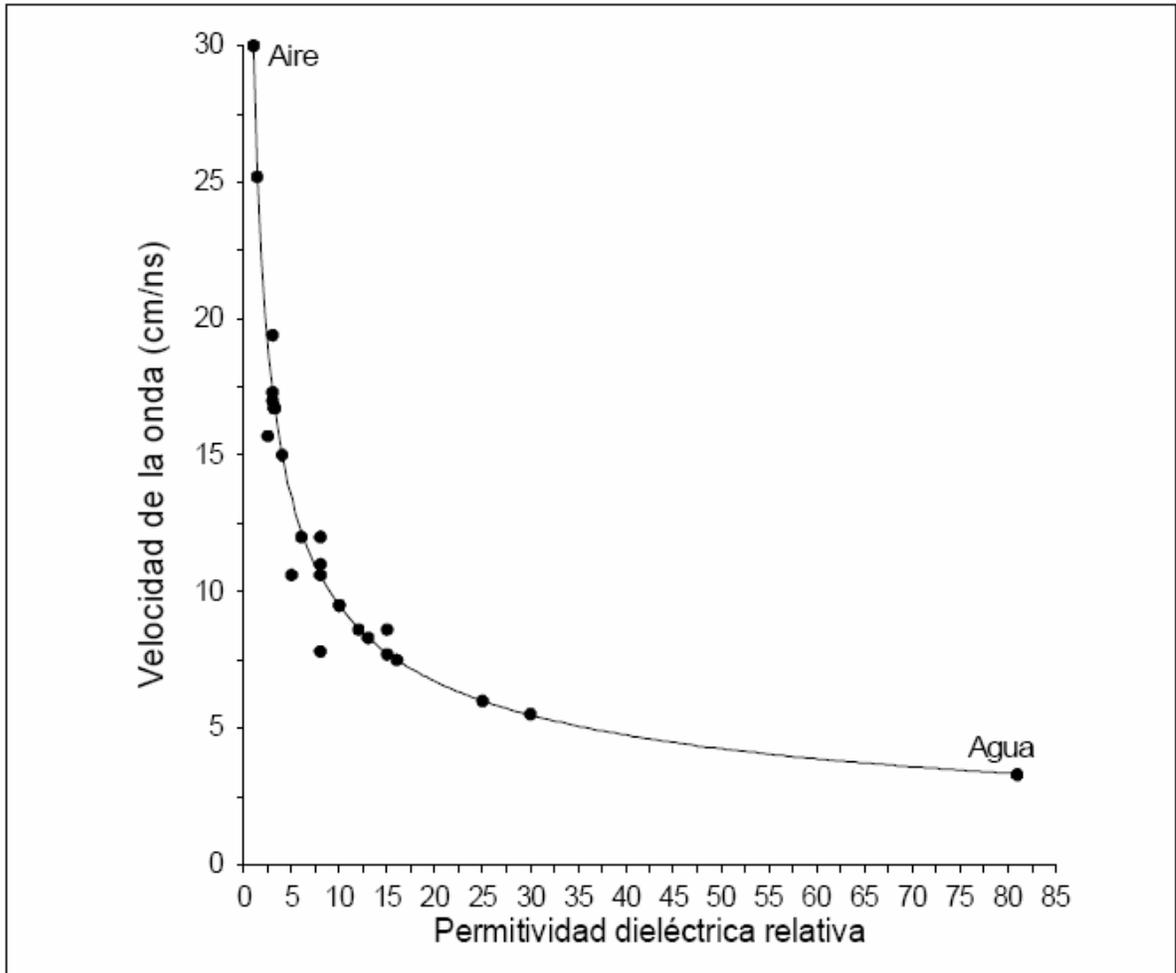


Figura 4.5 Variación de la velocidad frente a la permitividad dieléctrica relativa (Daniels 2004).

### 4.3 Principio de funcionamiento

El sistema de adquisición de datos de un radar de penetración de suelos, comprende tanto el control de la emisión de ondas electromagnéticas al subsuelo, como el registro y procesamiento primario de las ondas reflejadas. De manera comercial existen diversos tipos de sistemas de adquisición de datos en el mercado, conteniendo interfaces de control de la transmisión, recepción, y acondicionamiento de la señal para un registro y procesamiento posterior en una computadora suministrada por el usuario. También existen sistemas integrales multifunción, facilitando en campo la utilización del mismo. El principio básico de funcionamiento puede ser observado en la Figura 4.6.

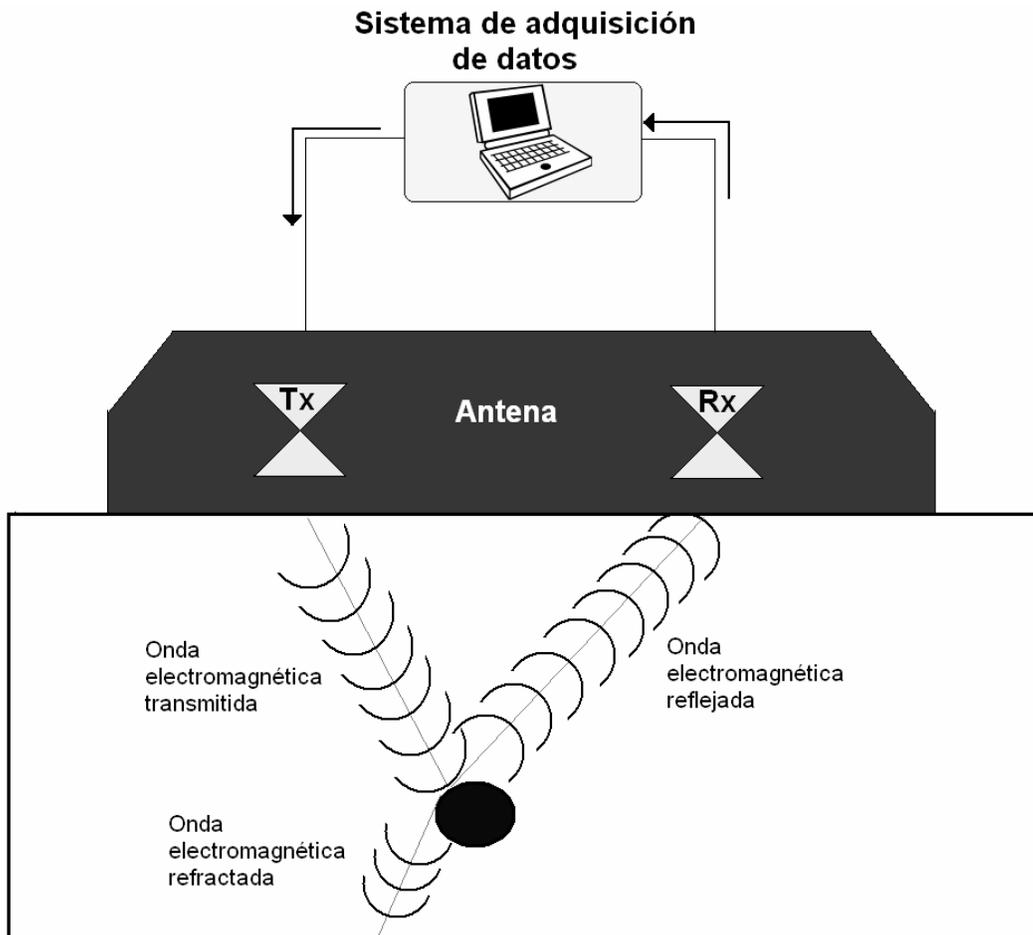


Figura 4.6 Principio básico del funcionamiento de radar de penetración de suelo (GSSI 2004).

El sistema de adquisición de datos (unidad de control) envía pulsos con una tasa de transmisión determinada, los cuales al llegar a la antena se transforman en un pulso electromagnético bipolar. Lo anterior puede ser observado en la Figura 4.7.

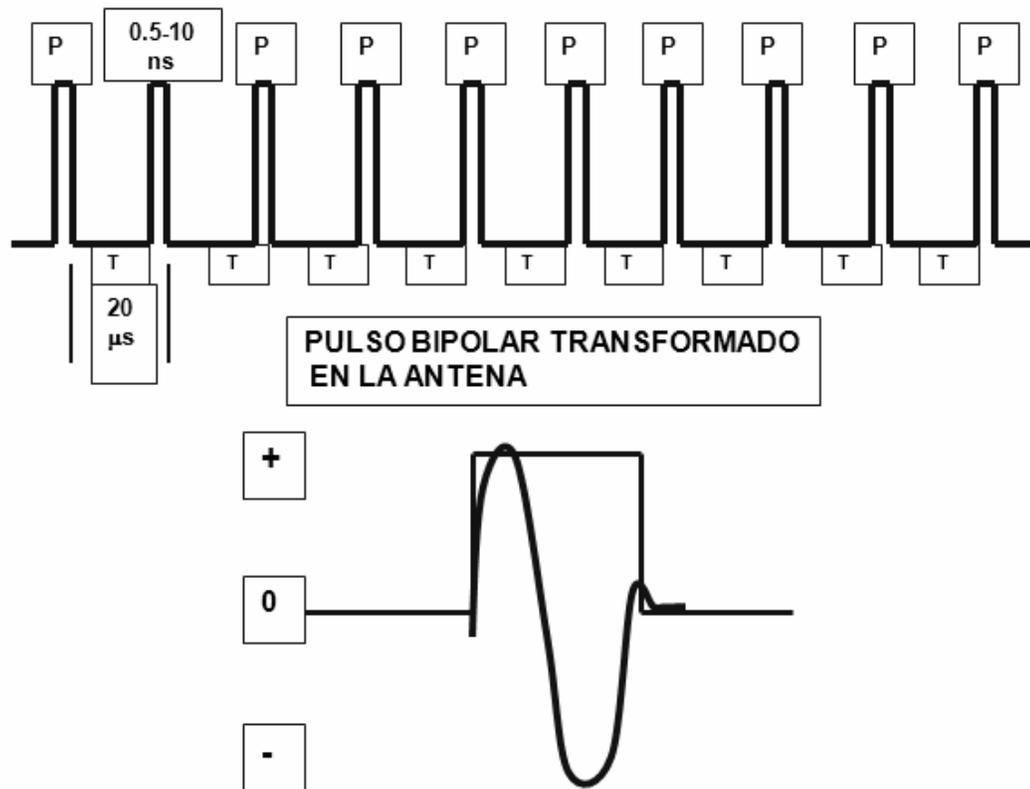


Figura 4.7 Transmisión de pulsos del sistema de adquisición de datos a la antena, y generación de la señal analógica bipolar (GSSI 2004).

Así el sistema genera pulsos electromagnéticos los cuales son dirigidos hacia el subsuelo. Al encontrarse con discontinuidades, parte del pulso se reflejará y parte se refractará, cumpliendo con la ley de Snell, la cual dice:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (4.26)$$

donde:

$n_1$ : índice de refracción del medio 1

$\theta_1$ : ángulo de incidencia

$n_2$ : índice de refracción del medio 2

$\theta_2$ : ángulo de refracción

De manera gráfica se puede observar en la Figura 4.8.

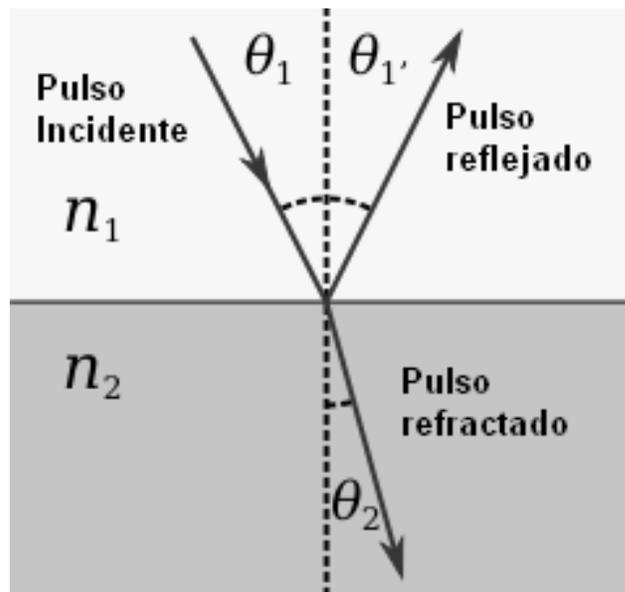


Figura 4.8 Representación de la ley de Snell (Daniels 2004).

Además:

$$n = \frac{c}{v} \quad (4.27)$$

donde:

$n$ : índice de refracción

$c$ : velocidad de una onda electromagnética en el vacío;  $2.998 \times 10^8$  m/s

$v$ : velocidad de una onda electromagnética en un medio, en [m/s].

El patrón de radiación en un medio distinto al vacío se muestra en la Figura 4.9.

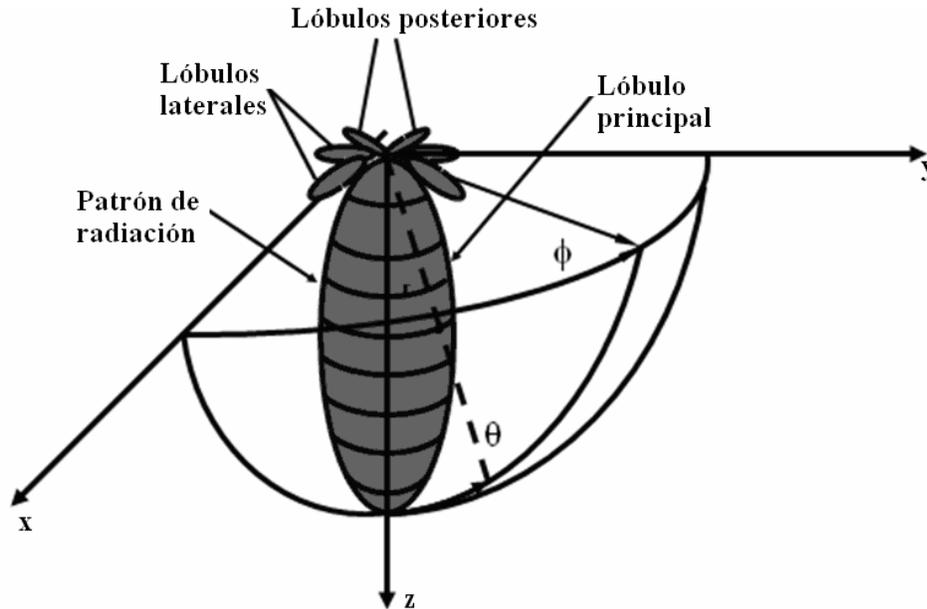


Figura 4.9 Patrón de radiación (GSSI 2004).

En la unidad de control la adquisición de la onda reflejada por la diferencia de medios puede ser observada en la Figura 4.10.

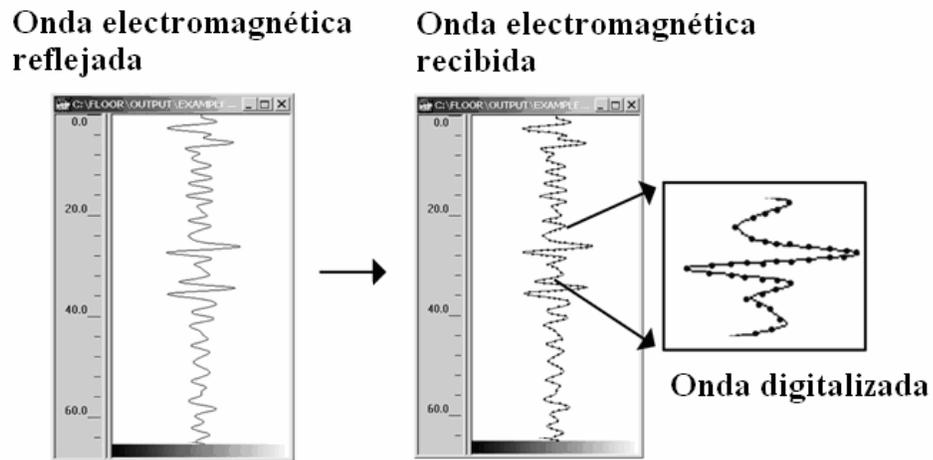


Figura 4.10 Onda adquirida y digitalizada por unidad de control (GSSI 2004).

El sistema de adquisición de datos registra la magnitud del pulso reflejado a lo largo de la ventana de tiempo configurada, creando así una traza formada por un número de muestras previamente seleccionadas. Cada traza es registrada en referencia a un intervalo de tiempo, o a una distancia recorrida específica. Lo anterior puede ser observado en la Figura 4.11.

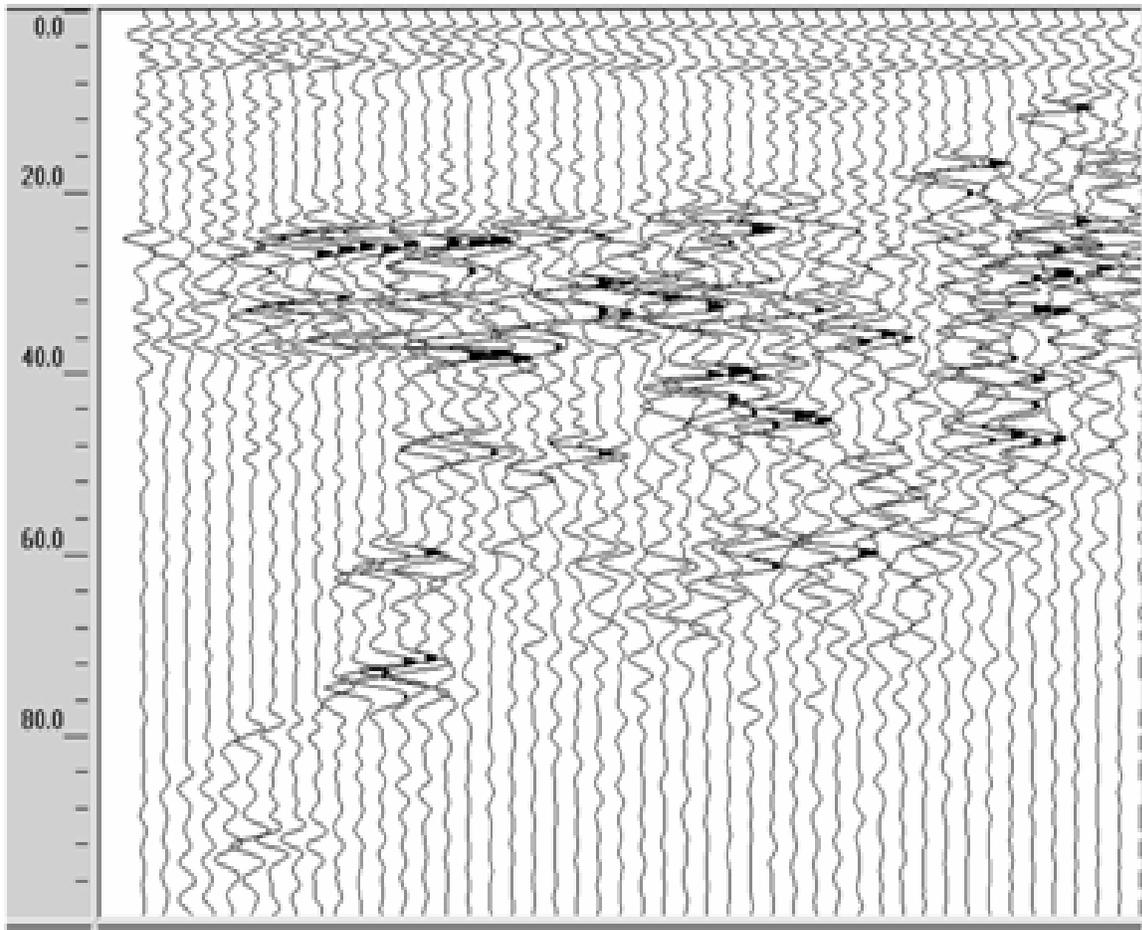


Figura 4.11 Creación de perfil de subsuelo combinando trazas en diferentes intervalos de distancia o tiempo (GSSI 2004).

Si se dibuja un eje imaginario al centro de la señal recibida, ubicando el origen se puede trabajar la traza recibida como una señal bipolar, contando con valores positivos, negativos, como lo muestra la Figura 4.12.

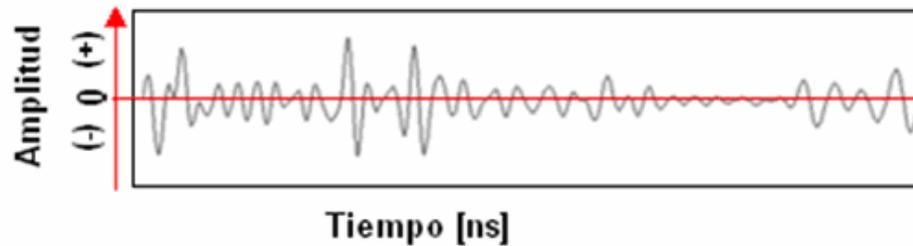


Figura 4.12 Traza creada con el valor de la onda reflejada en función del tiempo (GSSI 2004).

Así, el sistema de adquisición de datos registra un número de muestras con amplitud específica (positiva o negativa), en un intervalo de tiempo determinado (en el orden de los ns). Los datos registrados son posteriormente relacionados con una tabla de color, la cual es determinada por el usuario, conteniendo para cada valor de amplitud y polaridad un color específico, generando como resultado final una representación de imagen llamado radargrama, como se puede observar en la Figura 4.13.

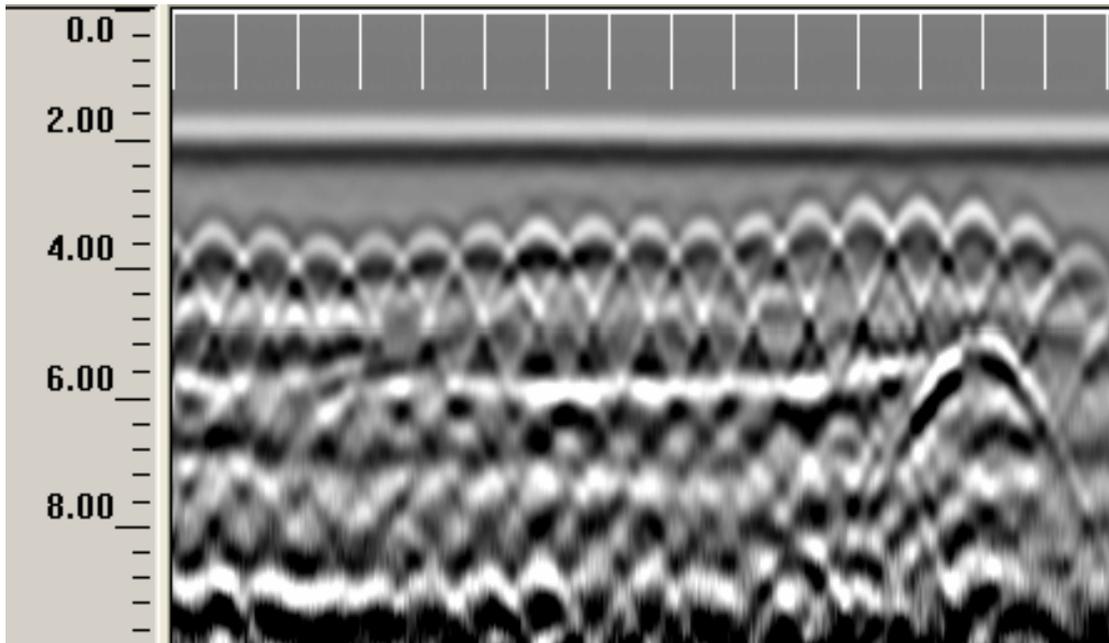


Figura 4.13 Creación de radargrama mediante la asignación de una tabla de color al conjunto de trazas (GSSI 2004).

## CAPÍTULO 4 SISTEMA DE RADAR DE PENETRACIÓN DE SUELOS

La profundidad de inspección está en función de la velocidad del pulso electromagnético en el medio y de la conductividad. Si se tiene un objetivo a una profundidad  $h$  como lo muestra en la Figura 4.14:

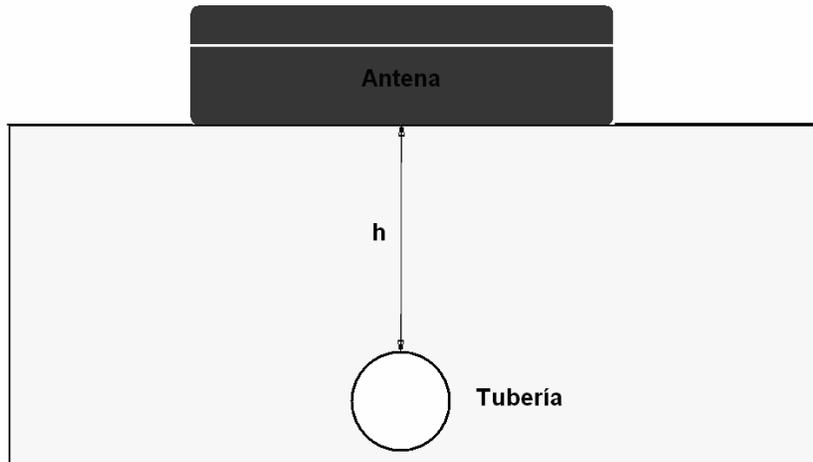


Figura 4.14 Antena de radar de penetración terrestre que se encuentra a una distancia "h" de un objeto a localizar (para el ejemplo una tubería) (GSSI 2004).

se puede calcular la velocidad como:

$$v = \frac{2h}{t} \quad (4.28)$$

donde:

v: velocidad del pulso electromagnético

h: profundidad de la tubería al lomo

t: tiempo que tarda en recorrer el pulso desde que se transmite, hasta que se recibe.

pero también se sabe que:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.29)$$

igualando ecuaciones queda:

$$\frac{2h}{t} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.30)$$

ecuación con la que se puede determinar la profundidad del objetivo en función solamente de la permitividad dieléctrica del medio, ya que el tiempo  $t$  será configurado en el sistema de adquisición de datos y el término  $c$  es una constante. La resolución vertical está dada por la longitud de onda electromagnética. Esto está en función de la frecuencia central de propagación, la cual siendo mayor significará una mayor resolución vertical.

Esto se debe al fenómeno de la difracción, el cual dispersa y produce una curvatura aparente de ondas al incidir en un objetivo con dimensiones menores a la longitud de onda de la emisión electromagnética. En la práctica se considera que para el sistema de radar de penetración de suelos que un objeto podrá ser identificable, si sus dimensiones son de al menos

$$d \geq \frac{\lambda}{2} \quad (4.31)$$

Después de la adquisición de datos es necesario aplicar filtros horizontales y verticales, para así incrementar la relación señal a ruido, ya que existen señales que interfieren en los datos.

También existe la posibilidad de realizar procesos avanzados como la deconvolución y la migración de datos, los cuales en términos cualitativos eliminan el fenómeno de eco o repeticiones de los perfiles, y colapsan las hipérbolas en puntos definidos, eliminando las refracciones generadas del pulso electromagnético en el medio huésped. Además la migración permite estimar el valor de la permitividad dieléctrica del medio huésped en un tiempo determinado, con lo que se puede tener una mejor aproximación a la profundidad real.

## 4.4 Utilización

Dado a la información que proporciona el sistema radar de penetración de suelos, es que los materiales creados por el hombre tienden a ser usualmente homogéneos, por lo que el contraste respecto al medio natural podrá ser identificable. Cabe resaltar que es necesario tener un contraste en la permitividad dieléctrica entre el medio huésped y el objetivo a localizar, ya que si éste no existiera, el pulso electromagnético traspasaría ambos medios como si fuera uno solo, siendo no visible en los resultados adquiridos. Los materiales metálicos tienen por lo regular un contraste más alto con el medio que los materiales plásticos, por tanto, se pueden identificar de mejor manera.

Para la localización de tuberías, el procedimiento se muestra en la Figura 4.15.

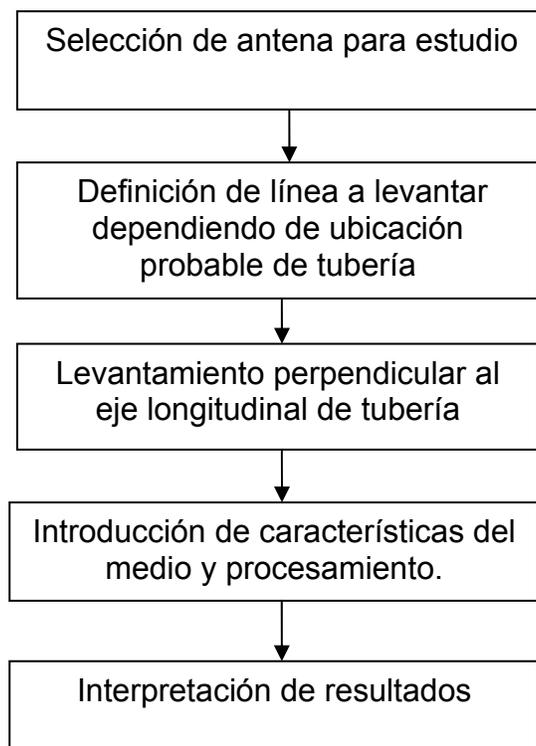


Figura 4.15 Procedimiento de localización de tuberías utilizando radar de penetración terrestre.

## CAPÍTULO 4 SISTEMA DE RADAR DE PENETRACIÓN DE SUELOS

*Selección de antena.* La antena más adecuada para un problema específico depende principalmente de los siguientes factores:

- Profundidad requerida de penetración
- Resolución requerida
- Tipo de aplicación

La Tabla 4.3 proporciona una guía para la selección de antena apropiada con base en el tipo de aplicación y en la profundidad de penetración.

Tabla 4.3 Profundidad de penetración de algunas antenas comerciales (GSSI 2004)

Frecuencia central de operación, en MHz	Aplicaciones	Profundidad, en m	Ventana de tiempo [ns]
12.5, 16, 20, 25, 35, 40, 50, 60	Geología	5 - 30	300 – 800
100	Geología Medio ambiente	4 – 25	300 – 500
200	Geología Búsqueda de infraestructura Medio ambiente	1 – 10	70 – 300
270	Geología superficial Búsqueda de infraestructura Medio ambiente	1 – 8	70 – 300
400	Geología superficial Búsqueda de infraestructura Medio ambiente Arqueología	0.5 – 4	20 – 100
900	Concretos, suelos Arqueología Puentes	0 – 1	10 – 20
1000	Concreto, pavimento	0 – 0.5	10 – 15
1500 - 2000	Concreto, pavimento	0 – 0.25	1 – 10

La selección de antena también dependerá del material promedio donde se realizará el estudio, esto es, la penetración máxima del estudio depende de la resistividad del medio. La Tabla 4.4 muestra los valores de resistividad y profundidad de penetración para varios materiales.

Tabla 4.4 Profundidad de penetración para algunos materiales (GSSI 2004).

Tipo de material	Resistividad, en $\Omega \cdot m$	Profundidad de penetración, en m
<b>LECHO ROCOSO</b>		
Granito y gneiss	7,000 – 15,000	20 – 50
Gabro	10,000 – 40,000	30 – 50
Cuarzita	5,000 – 10,000	20 – 50
<b>SUELOS</b>		
<b>Arena gruesa y grava</b>		
Seca	20,000 – 80,000	25 – 40
Saturada	10,000 – 5,000	10 – 15
<b>Arena</b>		
Seca	5,000 – 20,000	15 – 30
Saturada	200 – 1,000	2.5 – 5
<b>Aluvión</b>		
Seco	400 – 2,000	5 – 10
Saturado	30 – 200	3 – 6
<b>Arcilla</b>		
Saturada	10 – 30	2 – 6
<b>Tierra de cultivo</b>		
Seca	1,000 – 15,000	10 – 20
Saturada	200 – 1,000	5 – 10
<b>Turba</b>	100 - 300	8 – 12
<b>Agua dulce</b>	10,000	20

Para los sistemas de distribución de agua potable, las tuberías se encuentran en el rango de profundidades entre 0.5 m y 4 m. La tubería del ramal de una toma domiciliaría (sea registrada o clandestina) se encuentran a una profundidad máxima de 0.8 m. Por lo anterior y considerando las características de los suelos, la antena de 400 MHz es la más recomendable para este tipo de estudios.

*Definición de línea a levantar dependiendo de ubicación probable de tubería, y levantamiento perpendicular al eje longitudinal de la tubería* - El mejor método de localización de instalaciones es el de realizar levantamientos en forma perpendicular a la tubería, ya que de esta forma se creará un perfil hiperbólico característico. Para nuestra aplicación es muy fácil predecir la orientación de las tuberías, ya que la posición de la red de distribución es conocida y la tubería del ramal de la toma domiciliaría es perpendicular a ella. Las Figuras 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19 ejemplifican lo anterior:

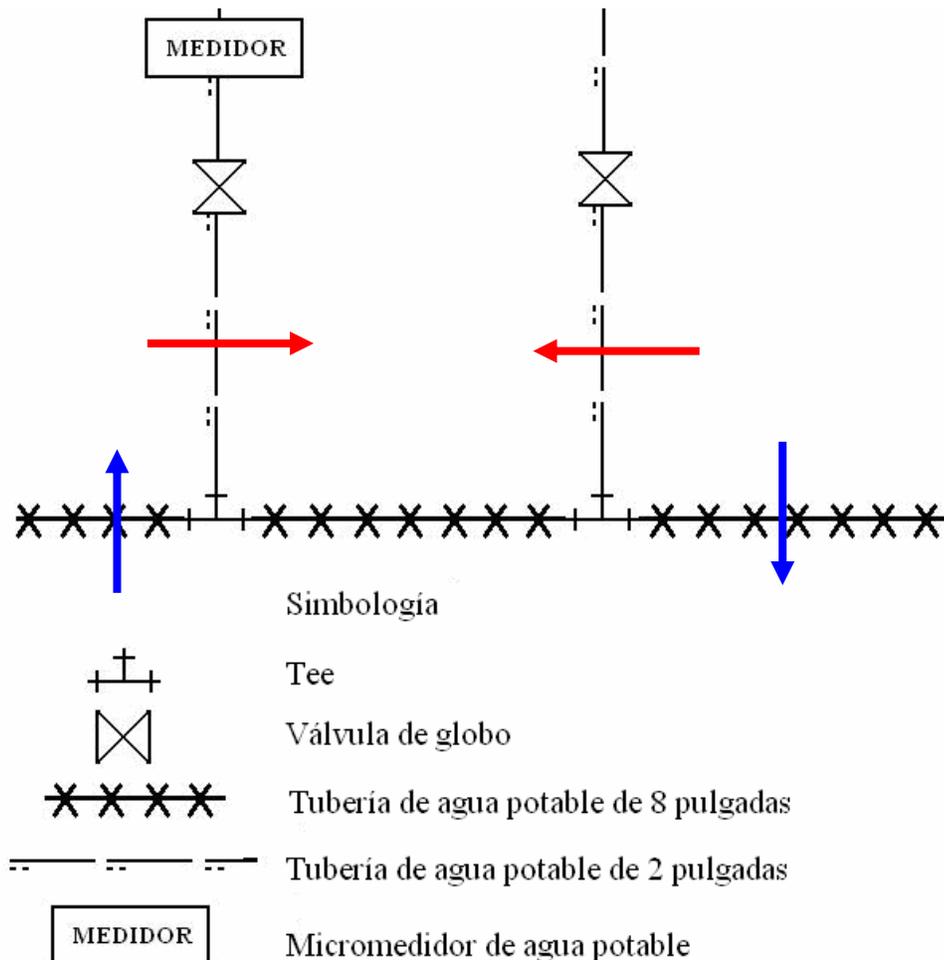


Figura 4.16 Representación de dos tomas domiciliares en una red de agua potable. Una de ellas tiene medidor (es legal) y la otra no lo tiene (es clandestina). Las flechas azules representan direcciones de levantamiento para la localización de la red secundaria de agua, las flechas rojas representan la dirección del levantamiento para la localización de la tubería que conforma el ramal.

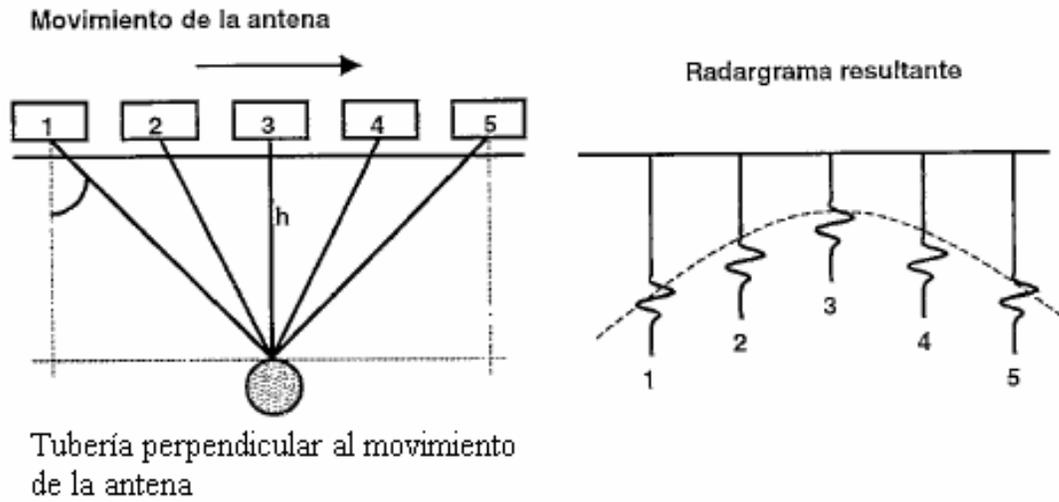


Figura 4.17 Posiciones de la antena que pasa encima de un reflector (tubería perpendicular a su movimiento) y las trazas registradas de acuerdo a las diferentes posiciones (GSSI 2004).

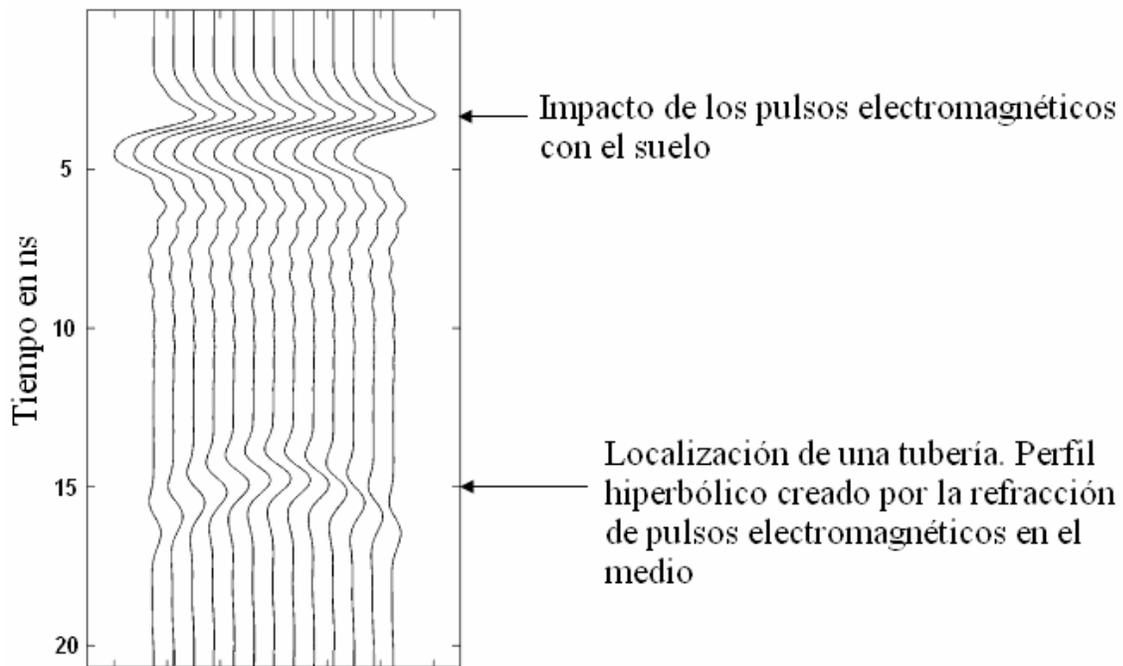


Figura 4.18 Estudio de radar en formato WIGGLE, donde se aprecian los pulsos electromagnéticos reflejados (GSSI 2004).

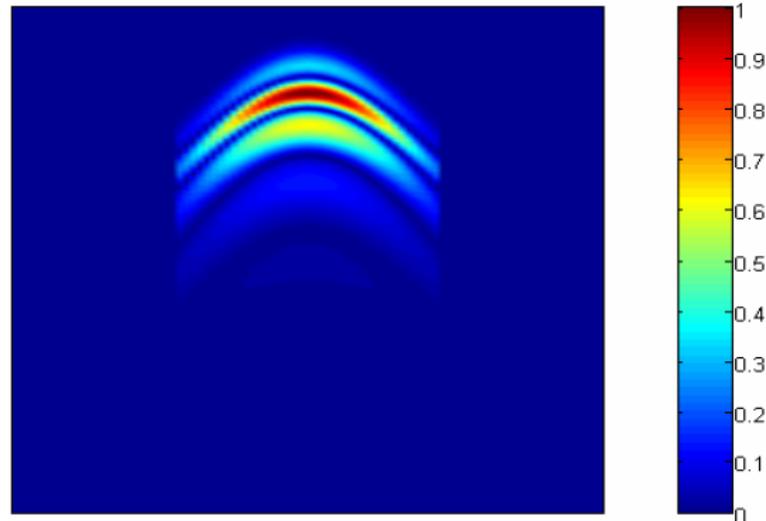


Figura 4.19 Perfil hiperbólico característico en la detección de tuberías, mostrando la tabla de color usada (GSSI 2004).

*Introducción de características del medio y procesamiento.* Una vez definido la trayectoria a estudiar y recordando que la profundidad de un objeto puede ser obtenida de la ecuación  $\frac{2h}{t} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$ , la profundidad  $h$  está dada por:

$$h = \frac{c \cdot t}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.32)$$

$c$  es la constante de la velocidad de la luz (constante),  $\epsilon_r$  es la permitividad dieléctrica del medio donde se realiza el estudio y  $t$  es el tiempo que tarda el pulso electromagnético en viajar hasta el objeto. Por tanto se requiere definir al sistema:

- a) Permitividad dieléctrica del medio
- b) Ventana de tiempo
- c) Frecuencias de filtros a utilizar (para paso-altas y paso-bajas, para crear un filtro paso-banda) para eliminar señales que no forman parte de la creación del radargrama.

El inciso a) dependerá del dieléctrico del suelo promedio de la zona, por lo que se deberá tener un estimado del mismo para obtener una mejor aproximación de la distancia real del objetivo. Los incisos a) y d) son dependientes de la antena a

utilizar, y es una información proporcionada por el fabricante. A continuación se muestran los datos para una antena con frecuencia central de operación de 400 MHz:

- Ventana de tiempo:  $50 \text{ ns}$
- frecuencia de corte de filtro paso bajas =  $800 \text{ MHz}$
- frecuencia de corte de filtro paso altas =  $100 \text{ MHz}$ .

La continuación del levantamiento es conocido como procesamiento, y básicamente cuenta con los siguientes pasos:

- a) ajuste de la posición del suelo (punto de impacto del pulso electromagnético con el suelo)
- b) ajuste de ganancia (amplificar o atenuar la amplitud de las trazas obtenidas por el radar)
- c) aplicación de filtros verticales y horizontales avanzados (filtros de respuesta infinita al impulso IIR y filtros de respuesta finita al impulso FIR)
- d) elección de tabla de color.

No es objetivo de esta tesis explicar la realización de lo anterior, ya que dependerá del programa especializado a utilizar. Estos programas cuentan con manuales y guías detallados para la obtención del radargrama procesado, por lo que se recomienda encarecidamente su estudio y lectura para la adecuada aplicación de esta etapa. Una mala aplicación de funciones puede provocar que información perteneciente a instalaciones subterráneas sea eliminada por una mala aplicación de filtros, o bien, que la profundidad obtenida tenga un margen de error alto (debido a una errónea asignación del dieléctrico)

Finalmente, el radargrama puede ser relacionado en su escala vertical con una profundidad estimada, una tabla de color y una distancia recorrida en su escala horizontal. De tal manera que se obtiene un radargrama que puede ser interpretado y dependiendo del objetivo a estudiar, se decida el tipo de objetivo encontrado.

*Interpretación de resultados.* El radargrama obtenido contiene información que puede informar del tipo de instalaciones, objetivos o características geológicas encontradas en el estudio. En el caso de instalación de tuberías, se busca una perfil hiperbólico en el radargrama, que supone la existencia de una tubería perpendicular a la trayectoria de levantamiento. Un ejemplo de lo anterior puede ser observado en la Figura 4.20.

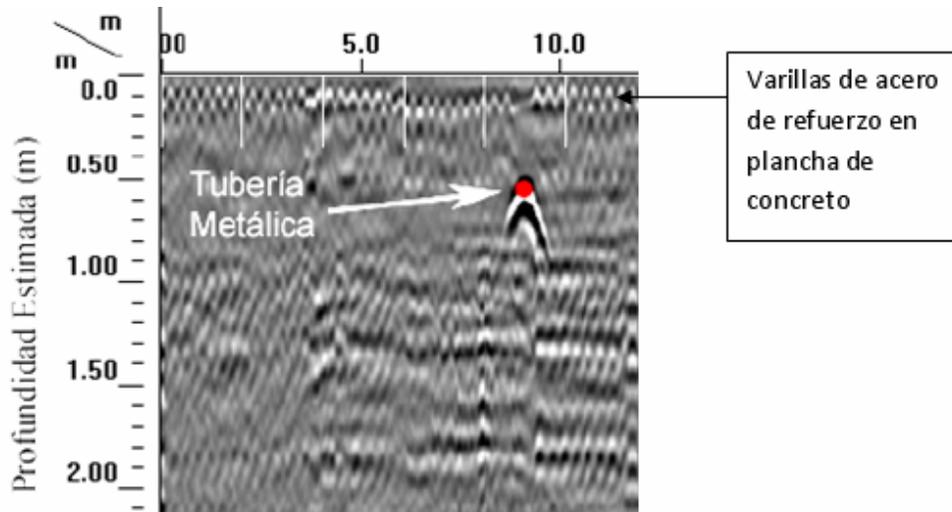


Figura 4.20 Ejemplo de localización de tubería metálica a 50 cm de profundidad (GSSi 2004).

Para asegurar que el perfil obtenido sea debido a una tubería, se debe recordar que una tubería es una instalación continua, y puede comprobarse mediante dos técnicas:

a) Realizar estudios paralelos a la primera trayectoria, ya que el perfil hiperbólico será observado en los subsecuentes radargramas como se muestra en la Figura 4.21.

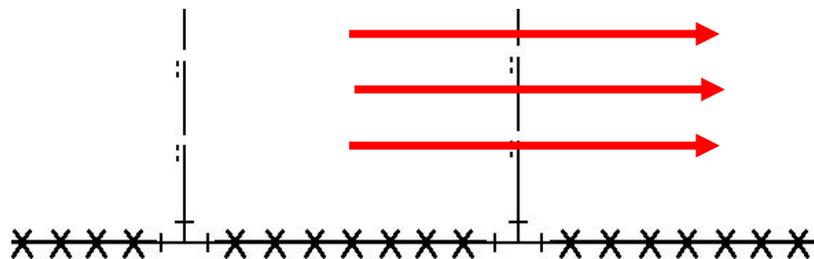


Figura 4.21 Levantamientos paralelos para confirmar la existencia de una tubería (el movimiento de la antena está determinado por las flechas rojas).

b) La mayoría de sistemas de radares de penetración de suelos comerciales cuentan con la creación automática de un perfil tridimensional (3D) de una sección de suelo. El estudio consiste en realizar levantamientos en una cuadrícula en el área de interés. Las tuberías forman perfiles constantes y fácilmente identificables. Esto puede ser observado en las Figuras 4.22 y 4.23.

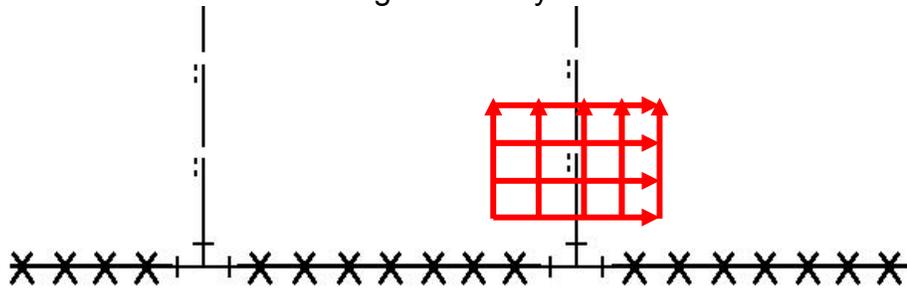


Figura 4.22 Levantamientos de radar de penetración terrestre (el movimiento de la antena está determinado por las flechas rojas).

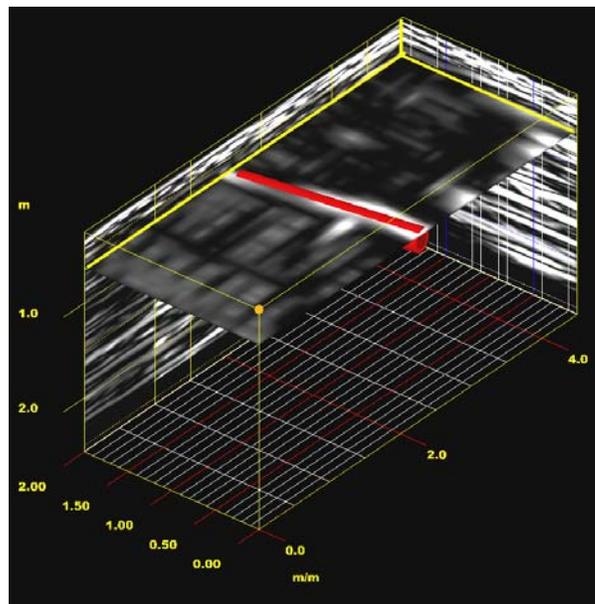


Figura 4.23 Resultado obtenido por el estudio tridimensional del perfil de una instalación continua (tubería) (GSSI 2004).

En el siguiente capítulo, se propondrá una metodología sistemática que utilizando las características del sistema acústico de correlación y el radar de penetración de suelos, se podrá detectar la localización en red de tomas domiciliarias, sean registradas o clandestinas.

## Capítulo 5

# Metodología para la localización de tomas no registradas en red de distribución de agua potable

### 5.1 Alcance

El alcance principal de la metodología propuesta es obtener una localización de tomas no registradas en red que cuente con las siguientes características:

- 1) Cuantitativa y cualitativa, es decir, que los resultados no dependan exclusivamente de la interpretación subjetiva de un operador (como sucede en la localización de fugas utilizando equipos de puntualización)
- 2) No destructiva, es decir, que la localización de tomas no registrada no requiera la destrucción de elementos externos o internos de la red de agua potable
- 3) Indirecta, es decir, que no requiera tener que implementarse dentro de la red de agua potable (un ejemplo de una tecnología directa es la utilización de tractores con cámara que evalúan directamente el estado de conexiones dentro de la tubería)
- 4) Viable, es decir, que existan tecnologías, técnicas o herramientas de manera comercial para su implementación.
- 5) Con mínimo impacto urbano, es decir, que su utilización no requiera el tener que suspender el servicio, o el tener que detener o desviar el tráfico o pasos peatonales de manera semi-permanente.

Se propone a continuación una metodología que considerará en su implementación lo descrito anteriormente. Se discutirá si cada una de las características fue cubierta, y finalmente, se presentarán resultados experimentales de su implementación en campo.

## 5.2 Metodología propuesta

A continuación se muestran en las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 las etapas de la metodología mediante diagramas de flujo.

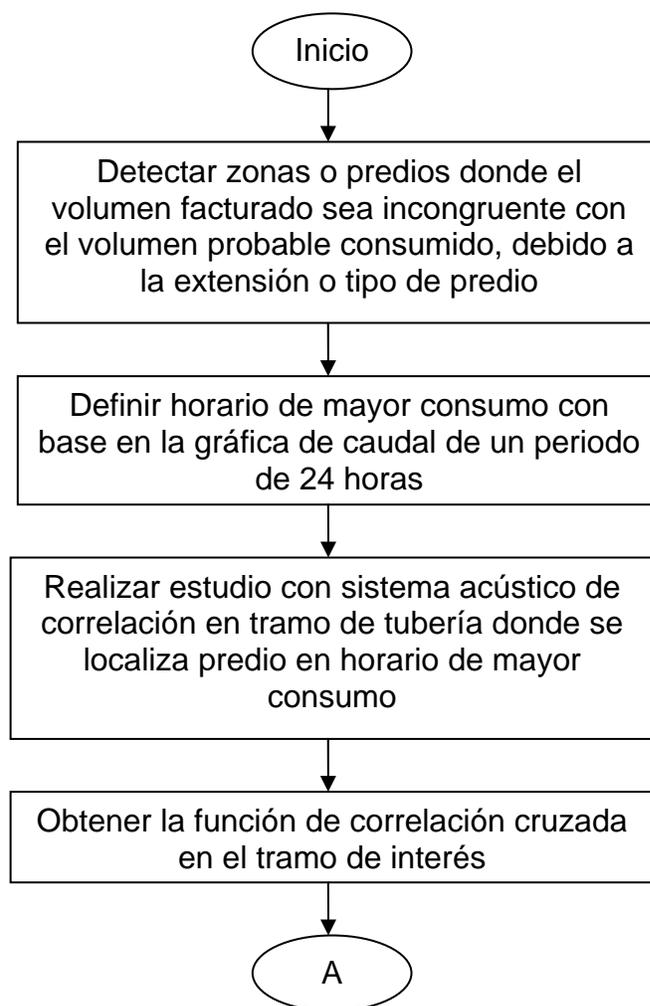


Figura 5.1 Primera etapa de la localización de tomas no registradas en red de agua potable.

CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE TOMAS NO REGISTRADAS EN RED DE AGUA POTABLE

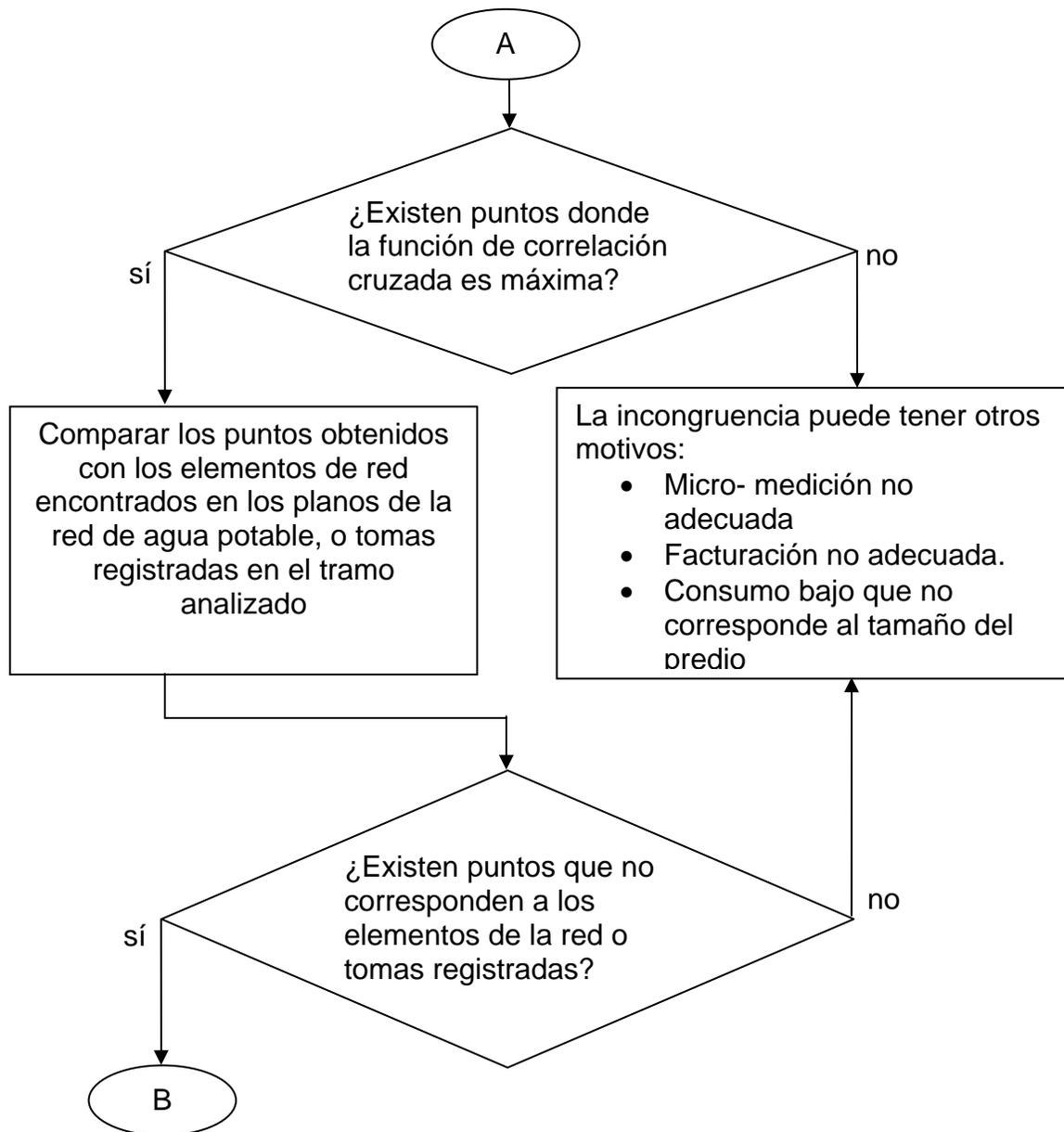


Figura 5.2 Segunda etapa de la localización de tomas no registradas en red de agua potable.

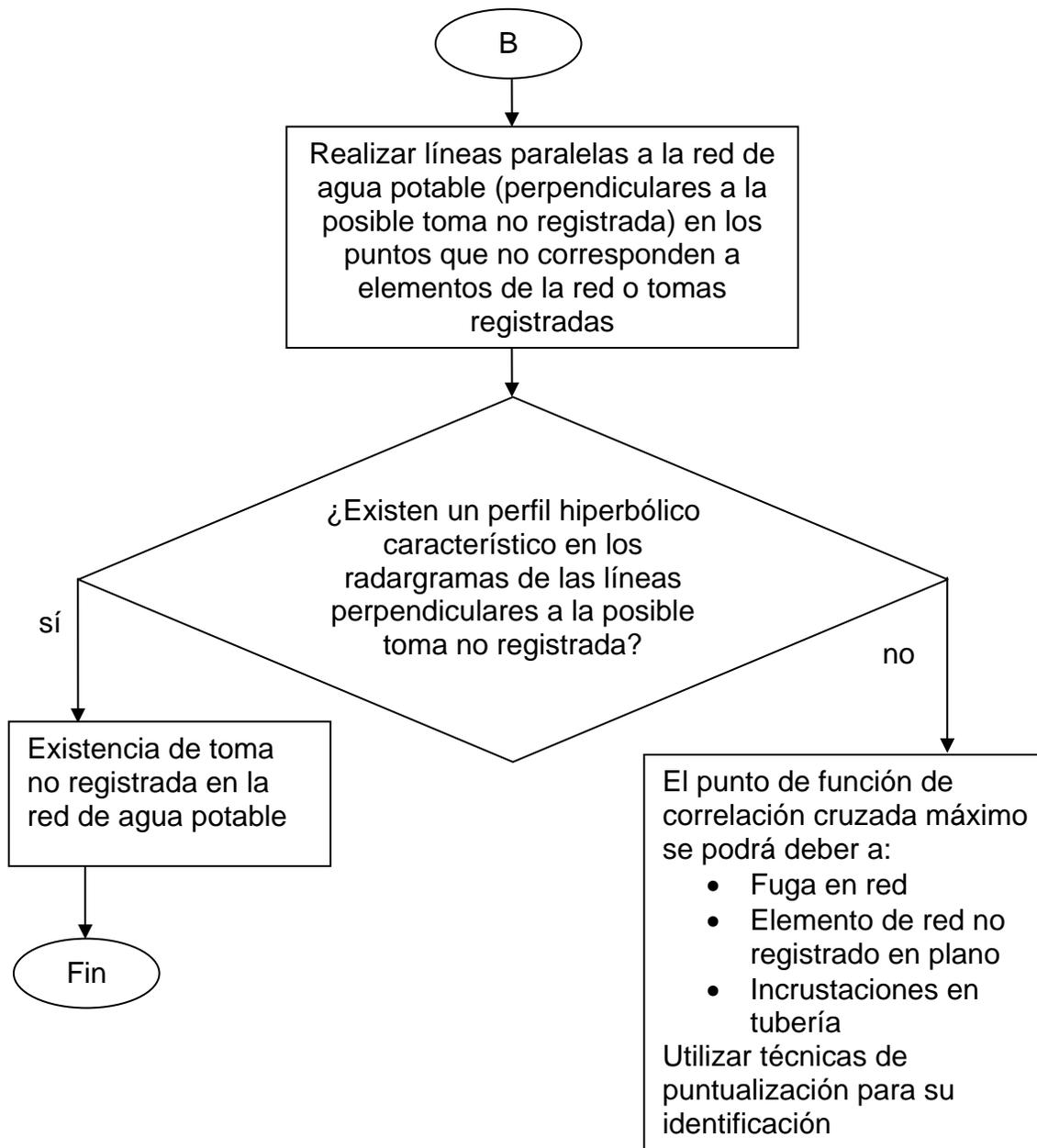


Figura 5.3 Tercera etapa de la localización de tomas no registradas en red de agua potable.

## CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE TOMAS NO REGISTRADAS EN RED DE AGUA POTABLE

Los resultados de las etapas de la localización de tomas no registradas podrán ejemplificarse en las implementaciones experimentales.

Al revisar los diagramas de flujo, se puede afirmar que la metodología propuesta es:

- 1) Es *cuantitativa y cualitativa*, ya que los resultados dependen del valor de la función de correlación cruzada y la identificación del perfil hiperbólico producido por una tubería perpendicular al movimiento del radar de penetración terrestre.
- 2) Es *no destructiva*, ya que no requiere de ningún tipo de modificación a la red de agua potable en su implementación.
- 3) Es *indirecta* para el caso de la utilización de sensores acelerómetros, ya que los correlacionadores requieren tener sólo un punto de contacto superficial con algún elemento de la red (no trabajan dentro de la red) y el radar de penetración terrestre trabaja en el subsuelo que cubre a los elementos de la misma.
- 4) Es *viabile*, ya que las tecnologías planteadas existen de manera comercial.
- 5) Cuenta con un *mínimo impacto urbano*, ya que en su utilización no requieren el detener suministro de agua, ni requieren detener el tráfico o el paso peatonal por periodos prolongados de tiempo.

### 5.3 Resultados experimentales

Las siguientes pruebas experimentales fueron realizadas en la Ciudad de Bogotá, Colombia, como parte de los trabajos correspondientes a la “Detección y localización física de fugas no visibles e inventario de acometidas en forma sistemática en las redes menores de distribución de agua potable y toma de aforos” para la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), por parte de Tecnoevoluciones Aplicadas S.A. de C.V., donde los autores de la presente tesis participaron en la ejecución de los mismos.

Se presentan tres resultados experimentales, ubicados en un área industrial (con tres turnos por día de trabajo) y determinándose que el consumo máximo estaba comprendido entre las 6:00 y 9:00 horas. En todos los casos, el EAAB sospecha la existencia de tomas no registradas en red, debido a que el tamaño del lote y tipo del mismo no correspondía al volumen facturado. Para cada uno de ellos, se entrega la siguiente información:

CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE TOMAS NO REGISTRADAS EN RED DE AGUA POTABLE

- a) Descripción de la zona a inspeccionar
- b) Tabla con las condiciones y valores experimentales
- c) Resultado de la función de correlación cruzada en el tramo de tubería donde se sospecha que existe una toma clandestina
- d) Fotografía del inicio del levantamiento con radar de penetración de suelos
- e) Radargrama procesado e interpretado
- f) Comentarios sobre los resultados obtenidos

**Resultado experimental 1.** Se realizó sobre la calle 10 y las esquinas formadas por las carreras 38 y 39, en un tramo que tenía extensos predios industriales. A continuación se muestra las condiciones y valores experimentales en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Condiciones y valores experimentales de resultado 1.

Condiciones y valores experimentales	
Característica	Descripción / valor
Lugar de realización	Ciudad de Bogotá, Colombia, en el área de influencia VRP_S1103-0101, en la calle 10, entre las carreras 38 y 39
Sistema acústico de correlación	Modelo ENIGMA marca PRIMAYER tipo de post-procesamiento. Contiene 8 sensores acelerómetros
1 Día de realización	1 29 de octubre de 2007
2 Tiempo de muestreo	2 1 minuto
3 Frecuencia de muestreo	3 5500 <i>muestras/segundo</i>
4 Inicio de muestreo	4 7:00 horas
5 Ancho de banda de filtro paso banda	5 1 – 2000 <i>Hz</i>
Radar de penetración de suelos	Modelo UtilityScan400 marca Geophysical Survey Systems (GSSI). Contiene un sistema de adquisición de datos modelo SIR-3000, antena mono estática con frecuencia central de 400 MHz, vehículo de transporte con codificador de posición y software de post-procesamiento RADAN.
1 Permitividad dieléctrica del medio	1 8
2 Ventana de tiempo	2 50 <i>ns</i>
3 Frecuencia de corte filtro paso-bajas	3 800 <i>MHz</i>
4 Frecuencia de corte filtro paso-altas	4 100 <i>MHz</i>

## CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE TOMAS NO REGISTRADAS EN RED DE AGUA POTABLE

En el resultado de la función de correlación cruzada se obtuvieron dos puntos donde la función de correlación era máxima como puede ser observado en la Figura 5.4. El punto más cercano al sensor denominado "0A6" correspondió a una toma domiciliaría registrada:

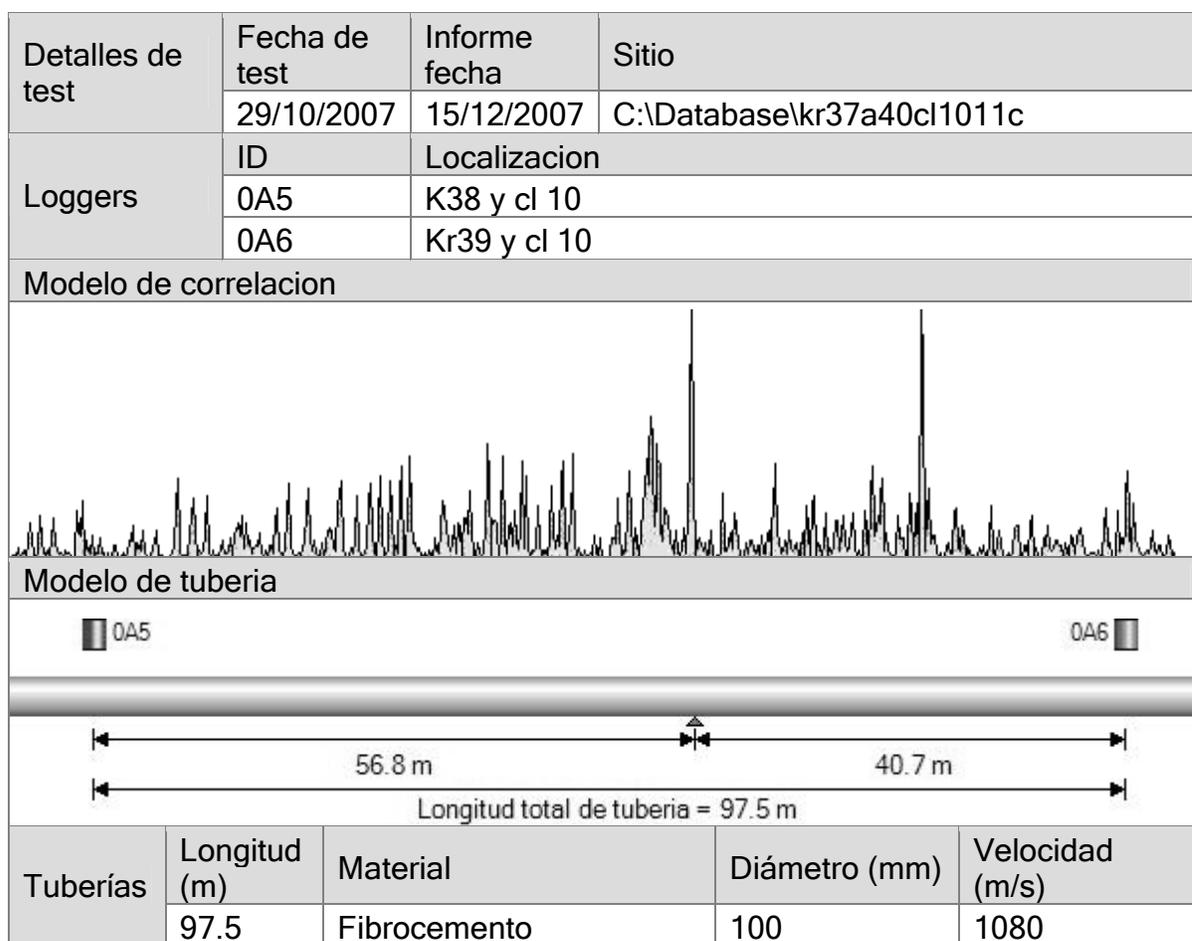


Figura 5.4 Función de correlación cruzada de resultado 1.

A continuación se muestra en la Figura 5.5 el sitio donde fue realizado el estudio y el inicio marcado en el suelo, y en la Figura 5.6 se muestra el resultado ya procesado donde se observa el perfil característico de una tubería perpendicular al movimiento de la antena.

## CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE TOMAS NO REGISTRADAS EN RED DE AGUA POTABLE



Figura 5.5 Inicio de levantamiento y trayectoria de resultado 1 con radar de penetración de suelo. La flecha naranja sirve como inicio y referencia. El inicio se encontraba a 8 metros del punto localizado por el correlacionador.

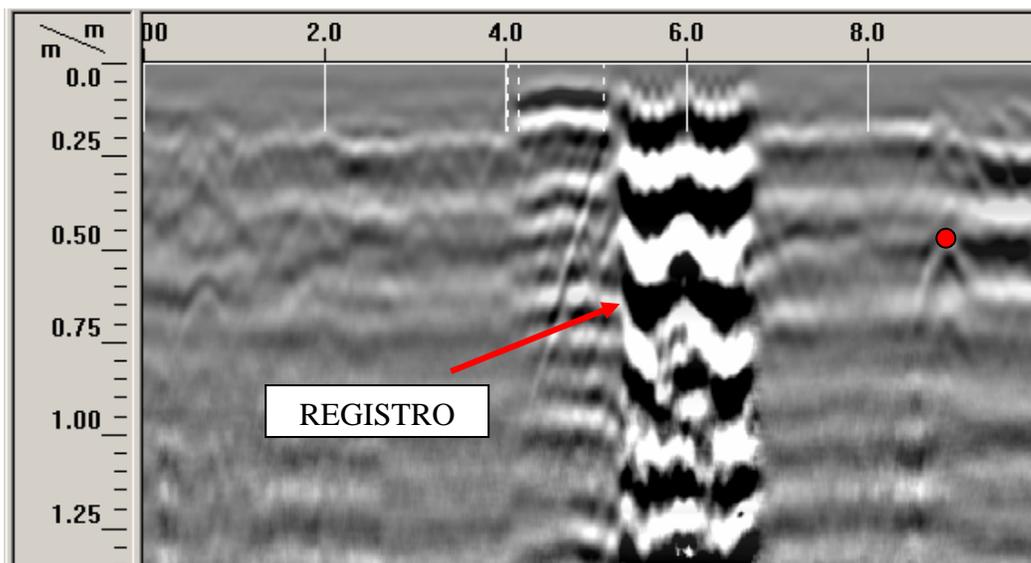


Figura 5.6 Radargrama procesado de resultado 1. La línea tiene una longitud de 10 metros. A los 5 metros, se encontró un registro (tapa metálica) que provoca este tipo de perfiles. A una distancia aproximada de 9 m y una profundidad estimada de 0.45 m, se encontró un perfil hiperbólico característico de una tubería perpendicular a la dirección de movimiento de la antena (el punto rojo representa el lomo de la tubería).

## CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE TOMAS NO REGISTRADAS EN RED DE AGUA POTABLE

Se encontró la diferencia entre estos resultados, la distancia entregada por el sistema acústico de correlación del punto de la toma no registrada como  $D_{\text{correlador}}$ , y la distancia encontrada mediante el radar de penetración de suelos como  $D_{\text{real}}$  (ambas referidas a alguno de los sensores) y se puede definir el porcentaje de error como:

$$\% \text{ error} = \frac{|D_{\text{real}} - D_{\text{correlador}}|}{D_{\text{real}}} * 100 \quad (5.1)$$

Para el resultado 1, se tienen los resultados mostrados en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Porcentaje de error para el resultado 1.

$D_{\text{correlador}}$ [m]	$D_{\text{real}}$ [m]	%error
40.7	41.7	$\frac{ 41.7 - 40.7 }{41.7} * 100 = 2.39\%$

CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE TOMAS NO REGISTRADAS EN RED DE AGUA POTABLE

**Resultado experimental 2.** Se realizó sobre la carrera 35 y las esquinas formadas por las calles 15 y 16, en un tramo que tenía de igual forma extensos predios industriales. En la Tabla 5.3 se pueden observar las condiciones y valores experimentales.

Tabla 5.3 Condiciones y valores experimentales de resultado 2.

Condiciones y valores experimentales	
Característica	Descripción / valor
Lugar de realización	Ciudad de Bogotá, Colombia, en el área de influencia VRP_S1103-0101, en la carrera 35, entre las calles 15 y 16
Sistema acústico de correlación	Modelo ENIGMA marca PRIMAYER LTD tipo de post-procesamiento. Contiene 8 sensores acelerómetros
<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Día de realización</li> <li>2 Tiempo de muestreo</li> <li>3 Frecuencia de muestreo</li> <li>4 Inicio de muestreo</li> <li>5 Ancho de banda de filtro paso banda</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 21 de noviembre de 2007</li> <li>2 1 minuto</li> <li>3 5500 <i>muestras/segundo</i></li> <li>4 8:00 horas</li> <li>5 1 – 2000 <i>Hz</i></li> </ol>
Radar de penetración de suelos	Modelo UtilityScan400 marca Geophysical Survey Systems (GSSI). Contiene un sistema de adquisición de datos modelo SIR-3000, antena mono estática con frecuencia central de 400MHz, vehículo de transporte con codificador de posición y software de post-procesamiento RADAN
<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Permitividad dieléctrica del medio</li> <li>2 Ventana de tiempo</li> <li>3 Frecuencia de corte filtro paso-bajas</li> <li>4 Frecuencia de corte filtro paso-altas</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 8</li> <li>2 50 <i>ns</i></li> <li>3 800 <i>MHz</i></li> <li>4 100 <i>MHz</i></li> </ol>

## CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE TOMAS NO REGISTRADAS EN RED DE AGUA POTABLE

En el resultado de la función de correlación cruzada se obtuvo un punto donde la función de correlación era máxima, como se puede observar en la Figura 5.7. Este punto no correspondía a tomas domiciliarias registradas existentes o elementos de la red. :

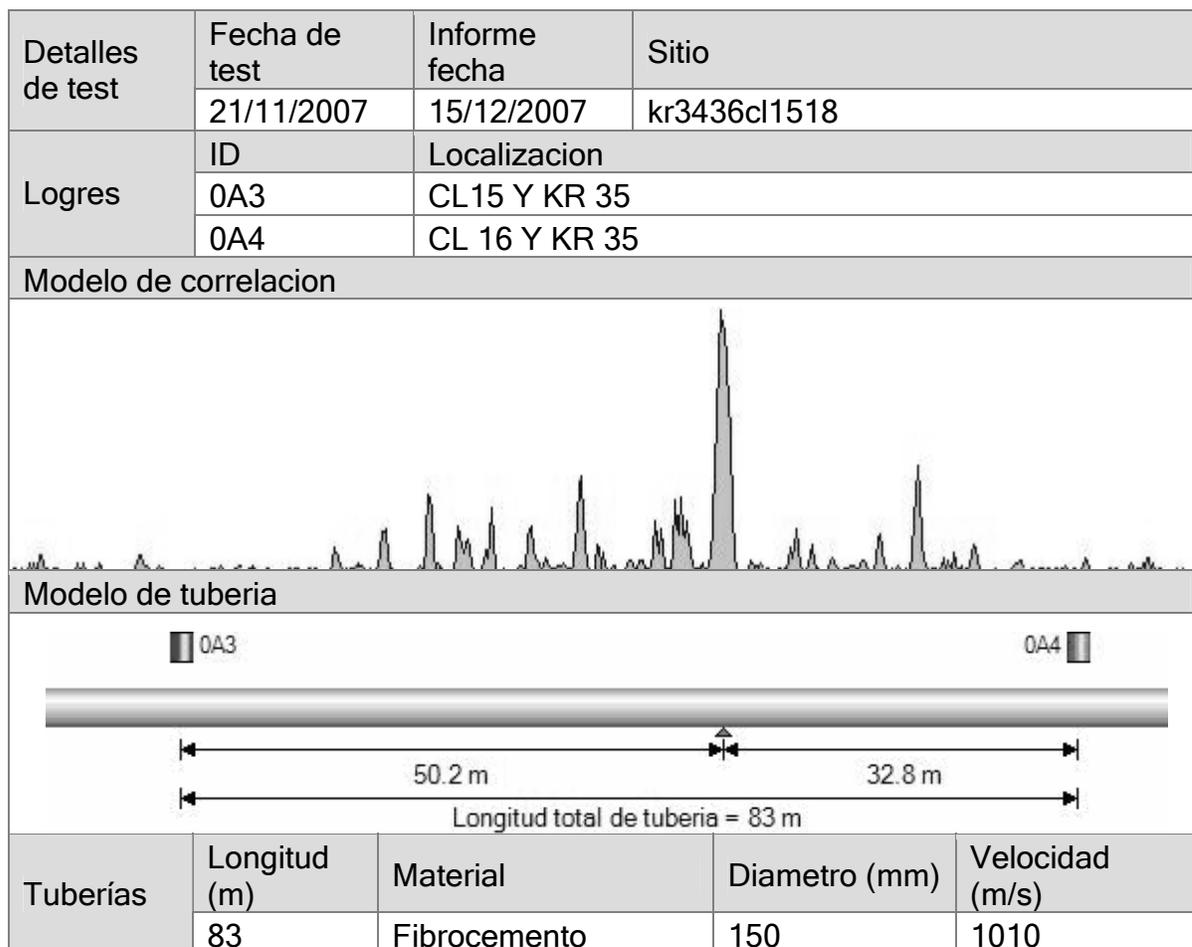


Figura 5.7 Función de correlación cruzada de resultado 2.

A continuación se muestra en la Figura 5.8 el sitio donde fue realizado el estudio y el inicio marcado en el suelo, y en la Figura 5.9 se muestra el resultado ya procesado donde se observa el perfil característico de una tubería perpendicular al movimiento de la antena.

## CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE TOMAS NO REGISTRADAS EN RED DE AGUA POTABLE



Figura 5.8 Inicio de levantamiento y trayectoria de resultado 2 con radar de penetración de suelo. La flecha naranja sirve como inicio y referencia. El inicio se encontraba a 7 metros del punto localizado por el correlacionador.

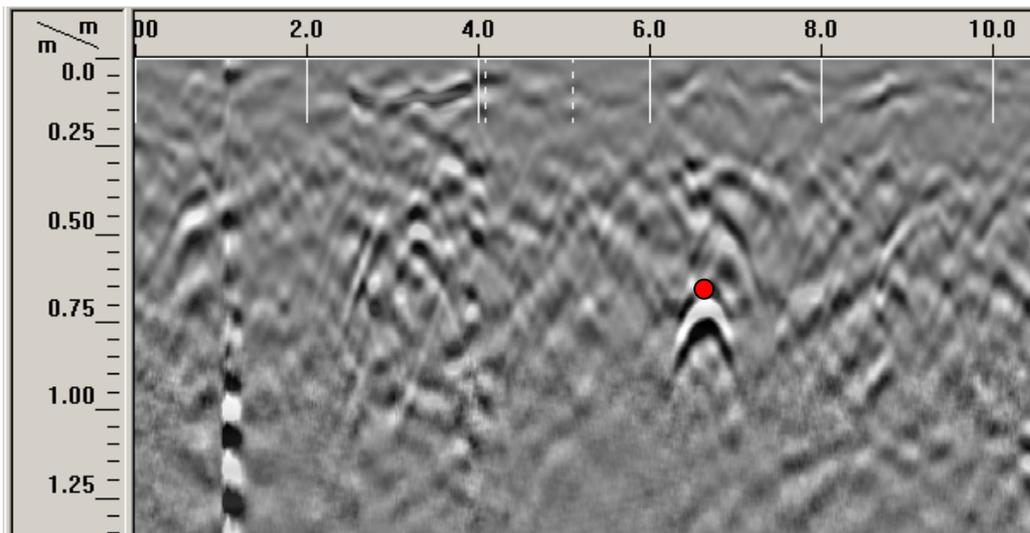


Figura 5.9 Radargrama procesado de resultado 2. La línea tiene una longitud de 10 metros. A una distancia aproximada de 6.5 m y una profundidad estimada de 0.7 m, se encontró un perfil hiperbólico característico de una tubería perpendicular a la dirección de movimiento de la antena (el punto rojo representa el lomo de la tubería).

## CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE TOMAS NO REGISTRADAS EN RED DE AGUA POTABLE

Para el resultado 2, se tienen los resultados mostrados en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Porcentaje de error para el resultado 2.

$D_{correlador}$ [m]	$D_{real}$ [m]	%error
50.2	49.7	$\frac{ 49.7 - 50.2 }{49.7} * 100 = 1.00\%$

**Resultado experimental 3.** Se realizó sobre la carrera 31 y las esquinas formadas por las calles 9 y 10, en un tramo que tenía de igual forma extensos predios industriales. Las condiciones y valores experimentales pueden ser observados en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Condiciones y valores experimentales de resultado 3.

Condiciones y valores experimentales	
Característica	Descripción / valor
Lugar de realización	Ciudad de Bogotá, Colombia, en el área de influencia VRP_S1103-0101, en la carrera 31, entre las calles 9 y 10
Sistema acústico de correlación	Modelo ENIGMA marca PRIMAYER tipo de post-procesamiento. Contiene 8 sensores acelerómetros
1 Día de realización 2 Tiempo de muestreo 3 Frecuencia de muestreo 4 Inicio de muestreo 5 Ancho de banda de filtro paso banda	1 27 de noviembre de 2007 2 1 minuto 3 5500 <i>muestras/segundo</i> 4 7:00 horas 5 1 – 2000 <i>Hz</i>
Radar de penetración de suelos	Modelo UtilityScan400 marca Geophysical Survey Systems (GSSI). Contiene un sistema de adquisición de datos modelo SIR-3000, antena mono estática con frecuencia central de 400 MHz, vehículo de transporte con codificador de posición y software de post-procesamiento RADAN.
1 Permitividad dieléctrica del medio 2 Ventana de tiempo 3 Frecuencia de corte filtro paso-bajas 4 Frecuencia de corte filtro paso-altas	1 8 2 50 <i>ns</i> 3 800 <i>MHz</i> 4 100 <i>MHz</i>

CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE TOMAS NO REGISTRADAS EN RED DE AGUA POTABLE

En el resultado de la función de correlación cruzada se obtuvo un punto donde la función de correlación era máxima, como puede ser observado en la Figura 5.10. Este punto no correspondía a tomas domiciliarias registradas existentes o elementos de la red. :

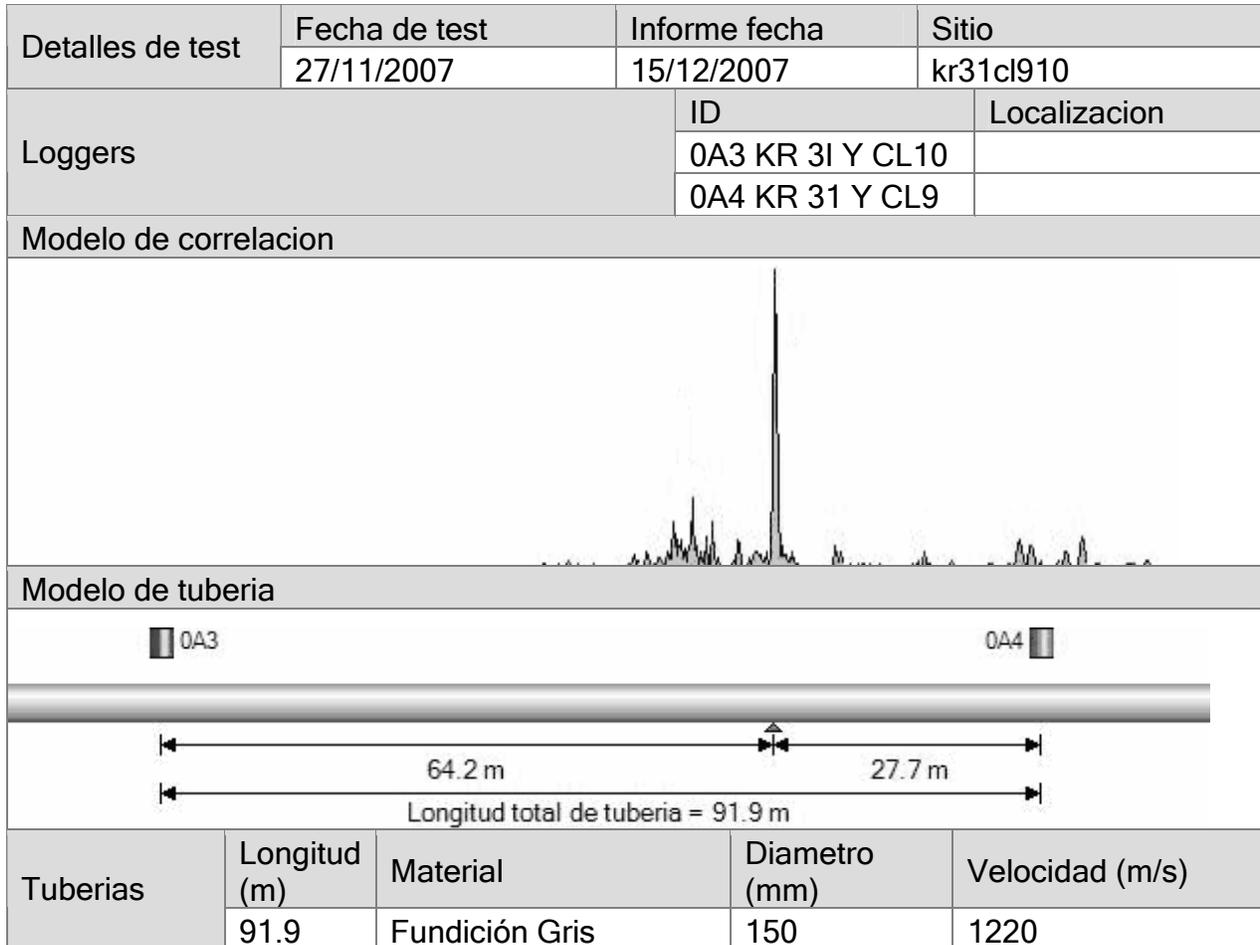


Figura 5.10 Función de correlación cruzada de resultado 3.

A continuación se muestra en la Figura 5.11 el sitio donde fue realizado el estudio y el inicio marcado en el suelo, y en la Figura 5.12 se muestra el resultado ya procesado donde se observa el perfil característico de una tubería perpendicular al movimiento de la antena.

## CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE TOMAS NO REGISTRADAS EN RED DE AGUA POTABLE



Figura 5.11 Inicio de levantamiento y trayectoria de resultado 2 con radar de penetración de suelo. La flecha naranja sirve como inicio y referencia. El inicio se encontraba a 5 metros del punto localizado por el correlacionador.

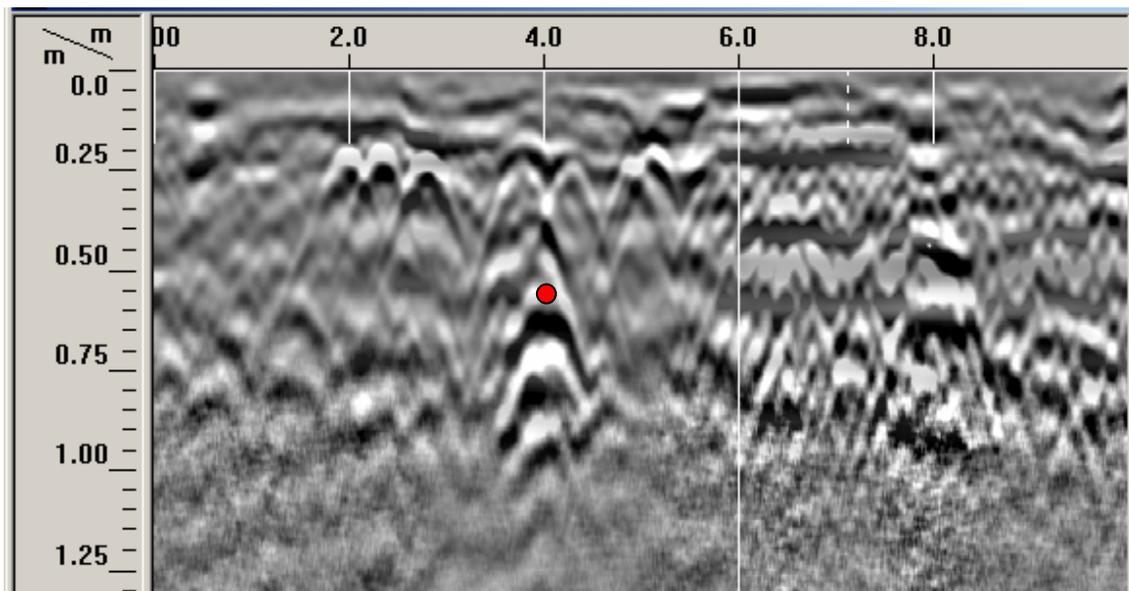


Figura 5.12 Radargrama procesado de resultado 3. La línea tiene una longitud de 10 metros. A una distancia aproximada de 4 m y una profundidad estimada de 0.65 m, se encontró un perfil hiperbólico característico de una tubería perpendicular a la dirección de movimiento de la antena (el punto rojo representa el lomo de la tubería).

Para el resultado 3, se tienen los resultados que se observan en la Tabla 5.6.

## CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE TOMAS NO REGISTRADAS EN RED DE AGUA POTABLE

Tabla 5.6 Porcentaje de error para el resultado 3.

$D_{\text{correlador}}$ [m]	$D_{\text{real}}$ [m]	% error
27.7	26.7	$\frac{ 49.7 - 50.2 }{49.7} * 100 = 3.74\%$

Los anteriores resultados experimentales confirman la aplicabilidad y viabilidad de la metodología propuesta, ya que mediante la combinación de ambas tecnologías es posible detectar de manera sistemática la existencia de tomas no registradas en la red de agua potable.

Es interesante notar que las diferencias entre las distancias encontradas tienen un error que es menor al 5%, las cuales se pueden explicar por lo siguiente:

- Los programas de análisis de correlación establecen de manera automática una velocidad de propagación de sonido para un material estándar, y variaciones del mismo (debido a defectos de fabricación, deterioro por su vida útil) provocan una diferencia en la velocidad real, lo que causa un error en la distancia estimada.
- Errores en la medición de la distancia debido al equipo utilizado, en este caso, se utilizaron odómetros analógicos y la medición de la distancia se realizó superficialmente sobre la acera.

Lo anterior confirma la necesidad de equipos de localización puntual (geófonos) para la localización exacta de elementos de la red fugas de agua, o radar de penetración de suelos para la localización de tomas no registradas.

En el siguiente capítulo se discutirán de qué manera fueron alcanzados los objetivos planteados en esta tesis, y se mencionarán algunos puntos de investigación futuros que complementen la problemática general de la reducción integral de pérdidas de agua potable en la República Mexicana.

## Capítulo 6

### Conclusiones

Con el desarrollo de este trabajo se pudieron obtener los siguientes resultados:

- 1 Se describieron las etapas de la reducción integral de pérdidas de agua, que es un proceso dinámico y multidisciplinario que tiene como objetivo identificar y eliminar la pérdida física y económica de una red de distribución urbana de agua potable.
- 2 Se presentaron estadísticas para dimensionar la problemática de las pérdidas en la República Mexicana, que en promedio representan el 51% del volumen total suministrado.
- 3 Se explicó la importancia de la localización de tomas no registradas, debido tanto a una actitud dolosa por parte del usuario y el beneficio económico que le proporciona su localización al organismo al no existir una metodología sistemática planteada en la República Mexicana.
- 4 Se explicó de manera general el principio de funcionamiento de los equipos utilizados para la detección sistemática de fugas de agua, así como el procedimiento para ello.
- 5 Se describió el principio de funcionamiento, utilización e interpretación de resultados del sistema acústico de correlación que, mediante el registro de sonido en dos puntos de la red, puede localizar las fuentes de sonido entre ellos, lo cual permite principalmente localizar fugas de agua, aunque también permite localizar elementos de la red y tomas domiciliarias, sean registradas o no.
- 6 Se describió el principio de funcionamiento, utilización e interpretación de resultados del radar de penetración de suelos para la localización de tuberías subterráneas, mediante la emisión de pulsos electromagnéticos al subsuelo y registrando las reflexiones del mismo al existir una diferencia del dieléctrico de los materiales presentes.

## CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

- 7 Combinando los resultados entregados por el sistema acústico de correlación y el radar de penetración de suelos, se propuso y se probó experimentalmente una metodología para la localización de tomas no registradas en la red de agua potable, la cual resultó cuantitativa, cualitativa, no destructiva, indirecta, viable y con mínimo impacto ambiental.

Lo presentado en este trabajo aún dista mucho de ser completo y ser definitivo en la utilización de las tecnologías de radar de penetración de suelos y tecnologías para la reducción integral de pérdidas de agua. Por lo pronto, sería significativo y productivo para la resolución de la problemática general el desarrollo e investigación de lo siguiente:

- 1 Caracterizar la banda de frecuencia de los sonidos de fuga en función de los materiales y diámetros de tuberías usuales en la República Mexicana, así como del tamaño de fuga y de las condiciones operativas de la red.
- 2 Realizar un mapa de viabilidad de estudio de radar de penetración de suelos en la República Mexicana, o bien, encontrar una metodología viable y sistemática que permita caracterizar un área de estudio y decidir la viabilidad del estudio en el mismo.
- 3 Mejorar los algoritmos de la función de correlación cruzada, de tal forma que los puntos de la función con valor máximo puedan ser diferenciados dependiendo del tipo de fuente de sonido (fuga, elemento de red, incrustaciones en la tubería)
- 4 Desarrollar tecnologías en México de equipos pre-localizadores, localizadores y puntualizadores, ya que los algoritmos utilizados por los mismos podrían ser fácilmente adaptados a las condiciones propias del país, y su manufactura y precio de comercialización tentativamente sería menor a los equipos desarrollados en otros países (especialmente Estados Unidos, el Reino Unido y Alemania).
- 5 Estudiar y definir el perfil típico del encargado del organismo de agua potable de la utilización de estos equipos en la República Mexicana, para diseñar capacitaciones que dependiendo de su preparación académica y laboral, le permitan comprender de una manera profunda el uso e interpretación de resultados.

## Bibliografía

- [1] López Romero C. y Pineda Romero E. *Curso Integral de Eficiencia Electromecánica y Recuperación de Caudales*, CEMCAS, México, 2001.
- [2] Ochoa Alejo L. y Bourguett Ortiz V. *Manual para la Recuperación Integral de Pérdidas de Agua*, IMTA, México, 1998.
- [3] Zelch G.N. y otros. *Water Audits and Leak Detection*, American Waterworks Association, Estados Unidos, 1990.
- [4] Ochoa Alejo L. *Políticas y Resultados de Programas de Uso Eficiente de Agua en México*, IMTA, México, 2004.
- [5] Farley M. *Leakage Management and Control*, World Health Organization, Suiza, 2001.
- [6] Grigg N. *Water, Wastewater and Stormwater Infrastructure Management*, Lewis Publishers, Estados Unidos, 2002.
- [7] Subdirección gerencial técnica de CONAGUA. *Redes de distribución*, CONAGUA, México, 1996.
- [8] Tzatchkov V. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento – Redes de distribución*, CONAGUA, México, 2007.
- [9] Chyuan H.J. *Leak Detection and Localization in Water Distribution Network by Acoustic Method*, UTM, Malasia, 2007.
- [10] Lahlou Z. *Leak Detection and Water Loss Control*, National Drinking Water Clearing House, Estados Unidos, 2006.
- [11] Hunadai O. *Detecting Leaks in Water Distribution Pipes*, Institute for research in construction, Canada, 2006.

## BIBLIOGRAFÍA

- [12] Hunadai O y Chu W. *Acoustical Characteristics of Leak Signal in Plastic Water Distribution Pipes*, Institute for research in construction, Canada, 1999.
- [13] Primayer Limited. *Primayer ENIGMA System – Manual de Usuario*, Primayer Limited, Reino Unido, 2005.
- [14] Daniels D, *Ground Penetrating Radar*, Segunda edición, IEE, Reino Unido, 2004.
- [15] Salas J. *Detección de Estructuras Civiles Subterráneas por Medio de Radar de Penetración Terrestre en las Inmediaciones de la Av. Carlos Hank González y el Río de los Remedios, Estado de México*, Facultad de Ingeniería UNAM, 2007.
- [16] Blancas J. *Principios y Aplicaciones del Método de Radar de Penetración Terrestre (GPR)*, Facultad de Ingeniería UNAM, 2000.
- [17] GSSI. *Radan 6.5. for Windows*, GSSI, Estados Unidos, 2004.
- [18] GSSI. *Utility Scan*, GSSI, Estados Unidos, 2004.
- [19] Chicala C. *Adquisición de Datos*, Soluciones en Control, Argentina, 2004.
- [20] Boylestad R. *Introducción al Análisis de Circuitos*, 10ª edición, Prentice Hall, México, 2004.
- [21] Proakis J. y Manolakis D. *Tratamiento Digital de Señales*, 3era edición, Prentice Hall, México, 2005.
- [22] Montgomery D. y Runger G. *Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería*, McGraw Hill, México, 1996.
- [23] Kraus D. y Fleish D. *Electromagnetismo con Aplicaciones*, 5a edición, McGraw Hill, México, 1999.
- [24] Primayer Limited. *Primayer PHOCUS – Manual de Usuario*, Primayer Limited, Reino Unido, 2005.