

I NFORMES

TÉCNICOS

SISTEMAS DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA EN ACAPULCO, TIJUANA, MOTOZINTLA TAPACHULA Y MONTERREY

ÓSCAR ARTURO FUENTES MARILES
ROBERTO QUAAS WEPPEN
MARTÍN JIMÉNEZ ESPINOSA
MIGUEL ÁNGEL FRANCO SÁNCHEZ
HÉCTOR ESLAVA MORALES
JAVIER GONZÁLEZ PRADO

COORDINACIONES
DE
INVESTIGACIÓN E
INSTRUMENTACIÓN

Área de Riesgos Hidrometeorológicos
Área de Instrumentación Hidrometeorológica



CENAPRED
MÉXICO

SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN

Miguel Ángel Osorio Chong
SECRETARIO DE GOBERNACIÓN

Luis Felipe Puente Espinosa
COORDINADOR NACIONAL
DE PROTECCIÓN CIVIL

Dr. Carlos M. Valdés González
DIRECTOR GENERAL DEL
CENTRO NACIONAL DE
PREVENCIÓN DE DESASTRES

1ª edición, diciembre 2002
CI/RH-CM/IH-12122002
Versión Electrónica 2014

©SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN
Abraham González Núm. 48,
Col. Juárez, Deleg. Cuauhtémoc,
C.P. 06699, México, D.F.

©CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES
Av. Delfín Madrigal Núm. 665,
Col. Pedregal de Santo Domingo,
Deleg. Coyoacán, C.P. 04360, México, D. F.
Teléfonos:
(55) 54 24 61 00
(55) 56 06 98 37
Fax: (55) 56 06 16 08
e-mail: editor@cenapred.unam.mx
www.cenapred.gob.mx

©Autores: Oscar Arturo Fuentes Mariles, Roberto Quaas Weppen,
Martín Jiménez Espinosa, Miguel Ángel Franco Sánchez,
Héctor Eslava Morales, Javier González Prado.
Edición: Violeta Ramos Radilla.
Portada: D.G. Demetrio Vázquez y Susana González.

ISBN: 970-628-634-9

Derechos reservados conforme a la ley.
IMPRESO EN MÉXICO. *PRINTED IN MEXICO.*

Distribución Nacional e Internacional: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
EL CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO ES EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DE LOS AUTORES.

Sistema Nacional de Protección Civil
Centro Nacional de Prevención de Desastres

SISTEMAS DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA EN ACAPULCO, TIJUANA, MOTOZINTLA,
TAPACHULA Y MONTERREY

Oscar Arturo Fuentes Mariles
Martín Jiménez Espinosa
Héctor Eslava Morales

Roberto Quaas Weppen
Miguel Ángel Franco Sánchez
Javier González Prado

Coordinaciones de Investigación e Instrumentación

Área de Riesgos Hidrometeorológicos
Área de Instrumentación Hidrometeorológica

Diciembre, 2002

ÍNDICE

I INTRODUCCIÓN.....	5
II DESCRIPCIÓN DE UN SISTEMA DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA	7
2.1 Componentes de un sistema de alerta	7
2.2 Funcionamiento de un sistema de alerta	8
2.3 Descripción del programa de interrogación y despliegue	9
2.3.1 Archivos del sistema	11
2.3.2 Inicio del programa de interrogación de estaciones	14
2.4 Programa de la computadora <i>Hidráulica</i>	15
2.4.1 Inicio del programa.....	15
2.4.2 Hietogramas.....	18
2.4.3 Hidrogramas.....	20
III SISTEMA DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA DE ACAPULCO.....	25
3.1 Instrumentación.....	25
3.2 Medición y Procesamiento Hidrológico.....	30
3.2.1 Sitios para medir lluvia y niveles de agua en ríos.....	30
3.2.1.1 Selección de los sitios para medir lluvia.....	32
3.2.1.2 Selección de los sitios para medir niveles.....	33
3.2.1.3 Determinación de los escurrimientos en las cuencas.....	35
3.2.1.4 Aplicación del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico.....	35
3.2.1.5 Aplicación del hidrograma unitario adimensional.....	36
3.2.1.6 Cálculo del escurrimiento directo.....	37
3.3 Resultados.....	37
IV SISTEMA DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA DE TIJUANA.....	43
4.1 Instrumentación.....	43
4.2 Medición y Procesamiento Hidrológico.....	50
4.2.1 Sitios para medir lluvia y niveles de agua en ríos.....	51
4.2.1.1 Selección de los sitios para medir lluvia.....	52
4.2.1.2 Selección de los sitios para medir niveles.....	53
4.2.1.3 Determinación de los escurrimientos en las cuencas.....	54
4.2.1.4 Aplicación del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico.....	55
4.2.1.5 Aplicación del hidrograma unitario adimensional.....	56
4.2.1.6 Cálculo del escurrimiento.....	56
4.3 Resultados.....	57
V SISTEMA DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA DE MOTOZINTLA.....	61
5.1 Instrumentación.....	61
5.2 Medición y Procesamiento Hidrológico.....	66
5.2.1 Sitios para medir lluvia y niveles de agua en ríos.....	66
5.2.1.1 Selección de los sitios para medir lluvia.....	67
5.2.1.2 Selección de los sitios para medir niveles.....	68
5.2.1.3 Determinación de los escurrimientos en las cuencas.....	69
5.2.1.4 Aplicación del hidrograma unitario adimensional.....	69
5.2.1.5 Cálculo del escurrimiento.....	70
5.3 Resultados.....	70
VI SISTEMA DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA DE TAPACHULA.....	70
6.1 Instrumentación.....	73
6.2 Medición y Procesamiento Hidrológico.....	77
6.2.1 Sitios para medir lluvia y niveles de agua en ríos.....	77

6.2.1.1 Selección de los sitios para medir lluvia.....	78
6.2.1.2 Selección de los sitios para medir niveles.....	80
6.2.1.3 Determinación de los escurrimientos en las cuencas.....	80
6.2.1.4 Aplicación del hidrograma unitario adimensional.....	81
6.2.1.5 Cálculo del escurrimiento.....	81
6.3 Resultados.....	81
VII SISTEMA DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA DE MONTERREY.....	83
7.1 Instrumentación.....	83
7.2 Medición y Procesamiento Hidrológico.....	86
7.2.1 Sitios para medir lluvia y niveles de agua en ríos.....	86
7.2.1.1 Selección de los sitios para medir lluvia	87
7.2.1.2 Selección de los sitios para medir niveles.....	88
7.2.1.3 Determinación de los escurrimientos en las cuencas.....	89
7.2.1.4 Aplicación del hidrograma unitario adimensional.....	89
7.2.1.5 Cálculo del escurrimiento.....	90
7.3 Resultados.....	90
VIII CONCLUSIONES.....	95
IX RECONOCIMIENTOS.....	97

I INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Alerta Hidrometeorológica son herramientas técnicas, desarrolladas en conjunto por las áreas de Riesgos Hidrometeorológicos e Instrumentación Hidrometeorológica del Centro Nacional de Prevención de Desastres, que tienen el fin de auxiliar en la toma de decisiones a las autoridades de Protección Civil. Estiman los escurrimientos que producirá la lluvia en una región, en los minutos u horas posteriores a la ocurrencia de esta última, para advertir del peligro que podría generarse en algunas zonas de una ciudad. Su objetivo es calcular, con base en mediciones de lluvia o niveles de agua en ríos, los eventos que causan daños (escurrimientos, flujos de lodo, etc.), para que se actúe anticipadamente con la intención de disminuir sus consecuencias. Este sistema se apoya en un estudio hidrológico que permite obtener la magnitud de los efectos de la lluvia en las zonas que podrían sufrir mayores daños y en instrumentación para la medición de la lluvia y los niveles de agua en ríos.

El presente documento tiene como objeto presentar los Sistemas de Alerta Hidrometeorológica que se instalaron en varias ciudades del país durante los años 1998 y 1999, según se muestra en la figura 1.1. Algunos de estos proyectos han sufrido algunas modificaciones a su configuración original, pero ello será motivo de otro reporte que se publicará posteriormente.

El capítulo 2 trata sobre aspectos generales de un sistema de alerta, como su funcionamiento, los programas para adquisición y análisis de datos.

En los cinco capítulos subsecuentes (del 3 al 7) se describen, por orden de instalación, los sistemas de alerta correspondientes a las ciudades de Acapulco, Guerrero; Tijuana, Baja California; Motozintla y Tapachula, Chiapas, y Monterrey, Nuevo León. En el capítulo correspondiente a cada sistema de alerta se tratan aspectos específicos de éste, como son la instrumentación y los criterios hidrológicos empleados, así como algunos resultados obtenidos.

Finalmente, en el capítulo 8 se presentan las conclusiones y las recomendaciones más importantes.



Figura 1.1 Sistemas de Alerta Hidrometeorológica instalados entre 1998 y 1999

II DESCRIPCIÓN GENERAL DE UN SISTEMA DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA

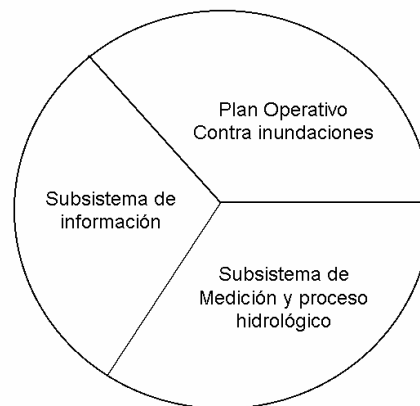
2.1 Componentes de un Sistema de Alerta

Los sistemas de alerta están formados por varias partes que se complementan entre sí, tales como un plan operativo contra inundaciones, un subsistema de medición y proceso hidrológico y un subsistema de información (figura 2.1). El plan operativo consiste en el conjunto de instrucciones específicas para realizar de modo eficiente el traslado de las personas a los lugares seguros. Considera que los caminos hacia estos lugares sean cortos y no queden interrumpidos durante la ocurrencia del fenómeno hidrometeorológico. Debe formularse antes de la temporada en que suelen presentarse tales fenómenos y haberse realizado simulacros donde participe la población que habita las zonas de riesgo.

Por otro lado, el subsistema de información incluye los procedimientos para enterar a la población de los lugares seguros, las rutas hacia estos sitios desde sus viviendas, el momento de iniciar una evacuación, etc.

El subsistema de medición y procesamiento hidrológico estima los escurrimientos que producirá la lluvia en una región, en los minutos u horas posteriores a la ocurrencia de esta última, para advertir del peligro que podría generarse en algunas zonas de una ciudad. Su objetivo es calcular, de preferencia con base en mediciones de lluvia o niveles de agua en cauces, los eventos que causan daños (escurrimientos, flujos de lodo, etc.), para que se actúe anticipadamente con la intención de disminuir sus consecuencias. Este subsistema se apoya en un estudio de ingeniería que permite obtener la magnitud de los efectos de la lluvia en las zonas que podrían sufrir mayores daños.

Figura 2.1 Componentes indispensables de un Sistema de Alerta Hidrometeorológica



Se le denominará subsistema de medición y procesamiento hidrológico al componente del sistema de alerta hidrometeorológica temprana municipal que se encarga de la medición de lluvias o niveles de agua y del cálculo hidrológico que sirve de base para activar una alerta en caso de ser necesario.

La observación de los fenómenos hidrometeorológicos será permanente en la zona y servirá para estimar algunos de sus efectos que puedan ser perjudiciales para la población. Emplea una red de instrumentos que permite tener las mediciones en tiempo real en un puesto central para su procesamiento inmediato.

Un Sistema de Alerta Hidrometeorológica está basado en un conjunto de estaciones pluviométricas e hidrométricas, ubicadas en las diferentes cuencas hidrológicas en que se divide la región en estudio (figura 2.2). Estas estaciones miden la precipitación acumulada, la intensidad de lluvia y los niveles de los cauces y envían la información vía radio a un puesto central de registro (figura 2.3). Allí se procesan los datos con los modelos lluvia-escurrimiento para estimar los escurrimientos esperados en las zonas vulnerables y los pronósticos de los tiempos de ocurrencia de los niveles críticos en los cauces. Al rebasarse ciertos umbrales establecidos, se activan alarmas indicando a los usuarios, generalmente autoridades de Protección Civil, sobre

el peligro de la posible ocurrencia de flujos e inundaciones que pudiesen provocar daños en una cierta área de la cuenca y poder poner así en marcha un plan de emergencia previamente establecido.

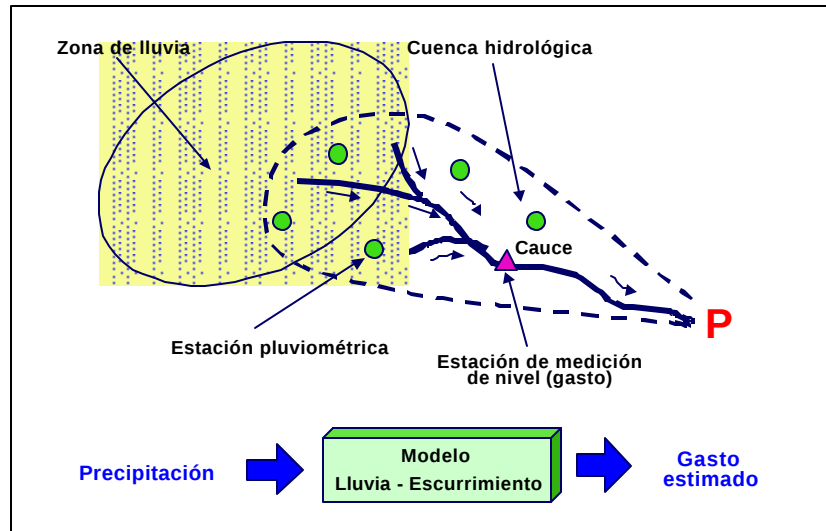


Figura 2.2 Medición del fenómeno hidrometeorológico

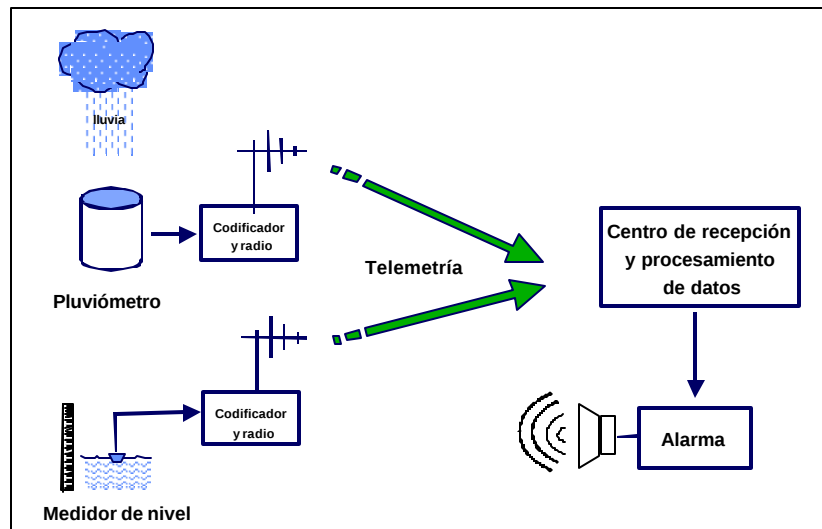


Figura 2.3 Sistema de medición y alerta

2.2 Funcionamiento de un Sistema de Alerta

En la figura 2.4 se observa cómo está constituido un sistema de alerta: un cierto número de estaciones remotas, distribuidas en las regiones de interés, y dos puestos centrales de registro, que es donde se concentran los datos de lluvia y de nivel de agua de los ríos. El Puesto Central de Registro (PCR-1) se encarga de interrogar a cada una de las estaciones remotas a intervalos fijos de 10 minutos. Para ello envía un código a la estación en turno, solicitándole el envío de la información recolectada en los 10 minutos anteriores. Una

vez que los datos de un intervalo han sido recibidos, decodificados y desplegados en forma tabular, se almacenan en un archivo para ser procesados y analizados por las computadoras. Si después del análisis y procesamiento de cada uno de estos archivos los datos resultantes sobrepasan los umbrales preestablecidos, de acuerdo con el estudio hidrológico, se activa una alarma visual en la pantalla y también se acciona una señal auditiva de alerta que da aviso al personal de la guardia y supervisión del sistema, para que de acuerdo con los procedimientos de emergencia establecidos tome las medidas necesarias.

Cuando el proceso de interrogación de un intervalo ha concluido y se han procesado los datos, el PCR-1 envía el archivo con los datos del último intervalo de interrogación hacia el puesto PCR-2. Éste es un espejo del PCR-1, excepto que no controla el proceso de interrogación, sólo recibe el archivo con todos los datos de precipitación ya recolectados. Una vez recibidos, los analiza y los presenta en pantalla en la misma forma que en el PCR-1. También procesa las alarmas de igual manera.

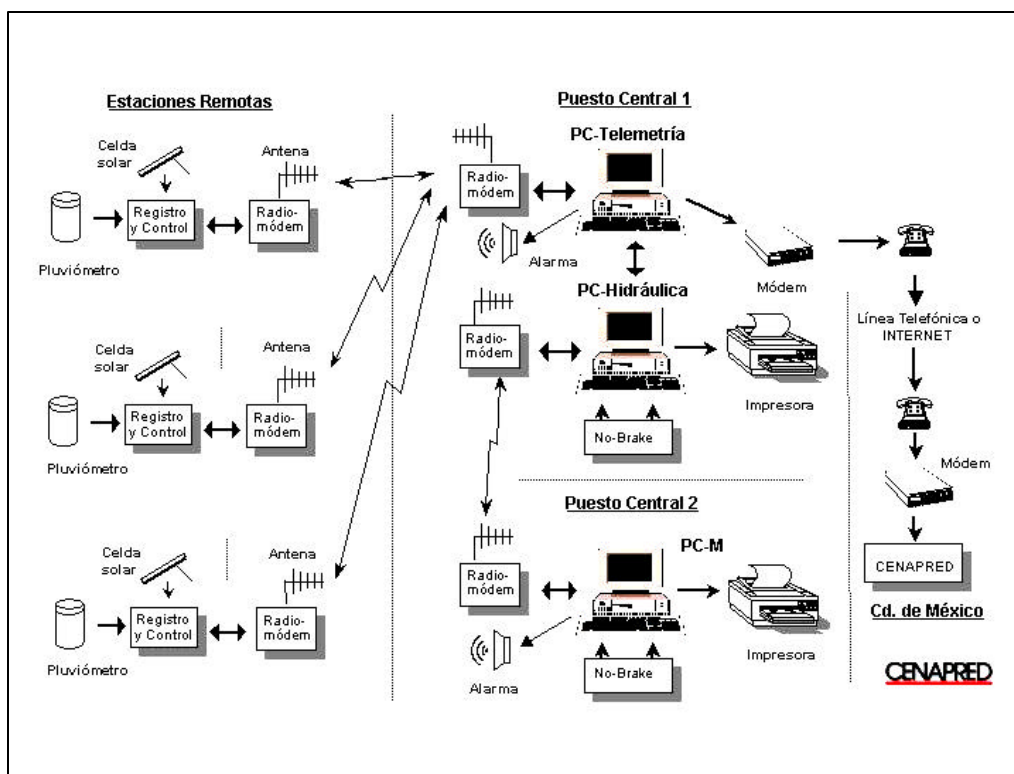


Figura 2.4 Diagrama general de un Sistema de Alerta Hidrometeorológica

2.3 Descripción del programa de interrogación y despliegue

Como se mencionó anteriormente, el sistema se basa en una computadora, *Telemetría*, que interroga vía radio desde el Puesto Central de Registro PCR-1 a cada estación pluviométrica, y recoge los datos de lluvia registrados en el último intervalo de 10 minutos. Una vez recibidos, los decodifica, analiza y finalmente los despliega en pantalla en forma tabular, como se muestra en la figura 2.5, que en este caso corresponde al caso de Acapulco pero la presentación es similar en los otros cuatro sistemas de alerta, variando solamente el número de estaciones y su nombre.

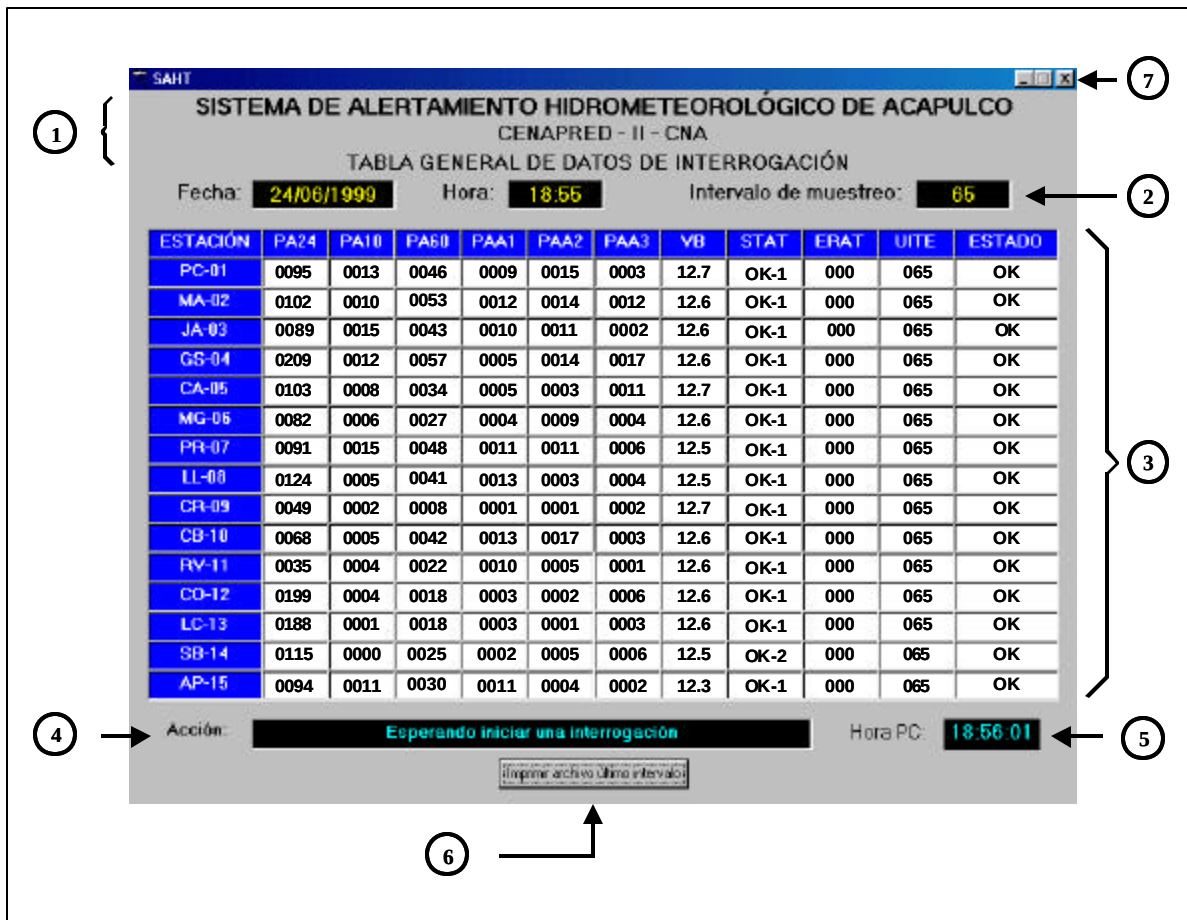


Figura 2.5. Despliegue de los datos de interrogación por la computadora Telemetría

Los elementos que integran la tabla son los siguientes:

- (1) Título e instituciones participantes.
- (2) Ventanas con el intervalo de muestreo de 10 minutos más reciente, la hora y la fecha correspondientes a dicho intervalo.
- (3) Tabla general de datos de interrogación en la cual se vacían los datos que resultan de la interrogación de las estaciones.
- (4) Acción o actividad que el programa está realizando en un momento determinado, tal como espera para iniciar una nueva interrogación, almacenamiento de los datos en un archivo, envío del archivo al PCR-2, entre otras.
- (5) Hora actual de la computadora.
- (6) Botón de control para imprimir los datos del último intervalo de interrogación.
- (7) Controles para minimizar la ventana o terminar la ejecución del programa.

La Tabla general de datos de interrogación se compone de 12 columnas, un renglón de encabezado y n renglones con datos, uno para cada estación, donde n es el número de estaciones de cada sistema, que para el caso de Acapulco es 15. Las columnas tienen los siguientes significados:

Tabla 2.1 Parámetros desplegados en la Tabla General de Datos de Interrogación

Parámetro	Descripción
ESTACIÓN	Clave de la estación (dos letras y dos números)
PA24	Precipitación acumulada diaria (en cuentas), iniciando a las 8:00 horas
PA10	Precipitación acumulada (en cuentas) en el intervalo más reciente de 10 minutos
PA60	Precipitación acumulada (en cuentas) en los últimos 60 minutos
PAA1	Precipitación acumulada (en cuentas) en el intervalo anterior (hace 20 minutos)
PAA2	Precipitación acumulada (en cuentas) 2 intervalos antes del actual (hace 30 minutos)
PAA3	Precipitación acumulada (en cuentas) 3 intervalos antes del actual (hace 40 minutos)
VB	Voltaje de la batería de la estación interrogada (en volts)
STAT	Estado de la transmisión
ERAT	Número de errores de transmisión acumulados desde las 8:00 horas
UITE	Último intervalo de transmisión exitosa
ESTADO	Se refiere al estado general de la estación

Los valores de precipitación presentados en la Tabla están dados en cuentas o balanceos del pluviómetro de balancín que se emplea. Para convertir de cuentas a milímetros basta con dividir el número de cuentas entre 4. Cabe hacer la aclaración de que la información que se muestra en la tabla no indica cuánto está lloviendo en ese momento, sino qué cantidad de lluvia se acumuló en el intervalo más reciente de 10 minutos.

El parámetro STAT puede tomar dos valores OK-x, si el resultado de la transmisión fue exitosa y los datos recibidos fueron correctos y ER-x, si hubo algún error, por ejemplo, no se pudo establecer la comunicación con la estación o si los datos recibidos no son confiables. La “x” indica en cuál intento de los tres que realiza el PCR-1 para interrogar a la estación fue posible (o no) establecer la comunicación. En caso de no obtener respuesta en una interrogación o que los datos recibidos no fueron correctos, el sistema efectúa dos intentos más. Si después del tercer intento no se logra tener datos confiables, se registra tanto en pantalla como en archivo la condición de error.

ERAT es una variable que se reajusta a cero cada día a las 8:00 horas.

La columna ESTADO permite de un vistazo ver cual es la situación operativa de cada estación. Pueden aparecer los siguientes tres mensajes: “OK” que indica que la estación se encuentra en buenas condiciones y que la comunicación con ella ha sido posible en el último intervalo; “ATENCIÓN!” indica que el voltaje de alimentación de los equipos en la estación alcanzó un valor por debajo del preestablecido de 11.8 volts; por último el mensaje “NO COMUN.”, que indica que por alguna razón no se logró establecer la comunicación.

2.3.1 Archivos del sistema

Archivo de Datos de Interrogación (ADI)

Todos los datos presentados en la pantalla de la computadora se almacenan después de cada ciclo de interrogación en un archivo de texto, es decir, uno por cada intervalo de 10 minutos. Por lo tanto se crean 144 archivos cada día. Estos Archivos de Datos de Interrogación se almacenan en el subdirectorio C:\xxxxxxx\datos de donde luego son tomados por la computadora *Hidráulica* para extraer los datos de precipitación necesarios para procesar el modelo lluvia-escorrentamiento, donde xxxxxxxx es el nombre de la ciudad o población donde se encuentra el sistema. Un ejemplo del contenido de un archivo de interrogación se muestra en la figura 2.6.

Nombre del archivo:							A0770602.199				
SISTEMA DE ALERTAMIENTO HIDROMETEOROLOGICO DE ACAPULCO							CENAPRED - CNA - II				
ARCHIVO DE DATOS DE INTERROGACION											
Fecha: 02/06/1999			Hora: 20:50		Intervalo de muestreo: 077						
=====											
ESTACION	PA24	PA10	PA60	PAA1	PAA2	PAA3	VB	STAT	ERAT	UITE	ESTADO
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----											
PC-01	0005	0000	0000	0000	0000	0000	14.0	OK-1	000	077	OK
MA-02	0000	0000	0000	0000	0000	0000	14.0	OK-1	000	077	OK
JA-03	0011	0000	0000	0000	0000	0000	14.0	OK-1	000	077	OK
GS-04	0013	0000	0000	0000	0000	0000	14.0	OK-1	000	077	OK
CA-05	0015	0000	0000	0000	0000	0000	14.0	OK-1	000	077	OK
MG-06	0000	0000	0000	0000	0000	0000	14.0	OK-1	000	077	OK
PR-07	0000	0000	0000	0000	0000	0000	14.0	OK-1	000	077	OK
LL-08	0000	0000	0000	0000	0000	0000	14.0	OK-1	000	077	OK
CR-09	0000	0000	0000	0000	0000	0000	14.0	OK-1	000	077	OK
CB-10	0000	0000	0000	0000	0000	0000	13.2	OK-1	000	077	OK
RV-11	0000	0000	0000	0000	0000	0000	13.2	OK-1	000	077	OK
CO-12	0000	0000	0000	0000	0000	0000	14.0	OK-1	000	077	OK
LC-13	-0013	-0013	-0013	-0013	-0013	-0013	00.0	ER-3D	001	076	No Comun.
SB-14	-0014	-0014	-0014	-0014	-0014	-0014	00.0	ER-3D	001	076	No Comun.
AP-15	0000	0000	0000	0000	0000	0000	14.0	OK-1	000	077	OK
=====											

Figura 2.6 Ejemplo del contenido de un archivo de datos de interrogación

El formato del nombre del archivo ADI se muestra en la figura 2.7. Corresponde al estándar de 8 caracteres para el nombre más 3 caracteres para la extensión. Respecto al nombre, el primer carácter indica que se trata de un archivo de datos de interrogación. Los siguientes tres caracteres indican el número del intervalo de 10 minutos (1 a 144) iniciado a las 08:00. Se utilizan dos caracteres para el mes y dos más para el día. El primer carácter de la extensión indica el milenio y los otros dos caracteres indican los últimos dos dígitos del año.

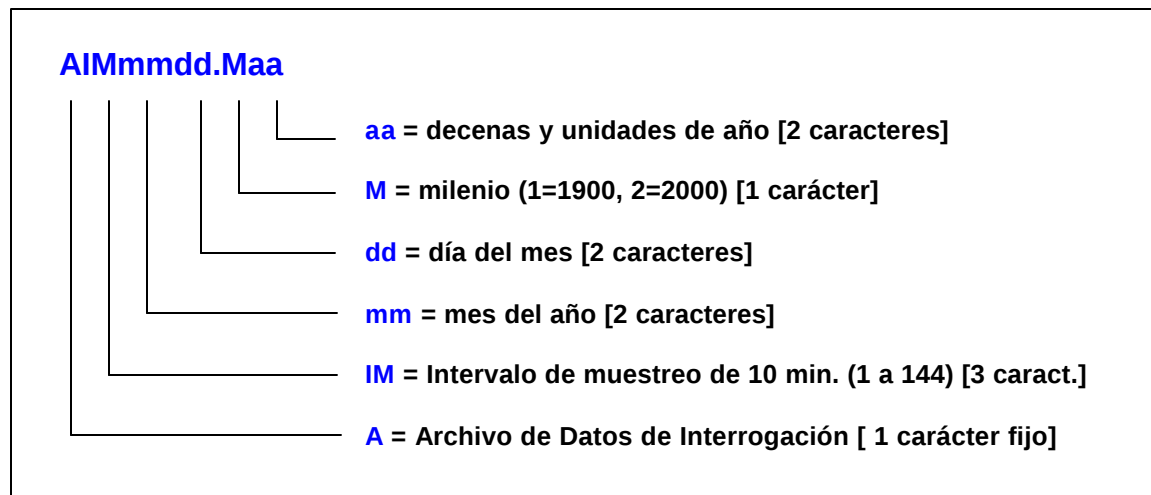


Figura 2.7 Estructura del nombre del Archivo de Datos de Interrogación (ADI)

Archivo Bitácora de Telemetría

En el Archivo Bitácora de Telemetría (ABT) se registran todas las actividades que realiza la computadora *Telemetría* tales como fecha y hora de inicio del programa, creación de archivos de datos, errores en la transmisión, etc. Este archivo permite hacer un diagnóstico de la operación del sistema facilitando al operador la detección de algún problema. El archivo se crea una vez por día a las 00:00 horas y se almacena en el subdirectorio C:\xxxxxxx\bitácora, donde xxxxxxxx es el nombre de la ciudad o población.

Un ejemplo del contenido de un archivo de bitácora se muestra en la figura 2.8. El formato del nombre del archivo se da en la figura 2.9. Cumple también con el estándar de 8 caracteres para el nombre más 3 caracteres para la extensión. Los primeros 4 caracteres indican que se trata de un archivo bitácora del puesto central de registro No. 1; se utilizan dos caracteres para el mes y dos más para el día. El primer carácter de la extensión indica el milenio y los otros dos caracteres los últimos dos dígitos del año.

Fecha	Hora	Intervalo muestreo	Tarea
14/04/1999	00:00	096	CREACION ABC1
14/04/1999	00:10	097	CREACION ADI
14/04/1999	00:10	097	Envío de archivo al PCR-2 OK
14/04/1999	00:20	098	CREACION ADI
14/04/1999	00:20	098	Envío de archivo al PCR-2 OK
14/04/1999	00:30	099	CREACION ADI
14/04/1999	00:30	099	Envío de archivo al PCR-2 OK
14/04/1999	00:40	100	CREACION ADI
14/04/1999	00:40	100	Envío de archivo al PCR-2 OK
14/04/1999	00:50	101	CREACION ADI
14/04/1999	00:50	101	Envío de archivo al PCR-2 OK
14/04/1999	01:00	102	CREACION ADI
14/04/1999	01:00	102	Envío de archivo al PCR-2 OK
14/04/1999	01:10	103	CREACION ADI
14/04/1999	01:10	103	Envío de archivo al PCR-2 OK
:			
:			

Figura 2.8 Fragmento del contenido de un Archivo Bitácora de Telemetría

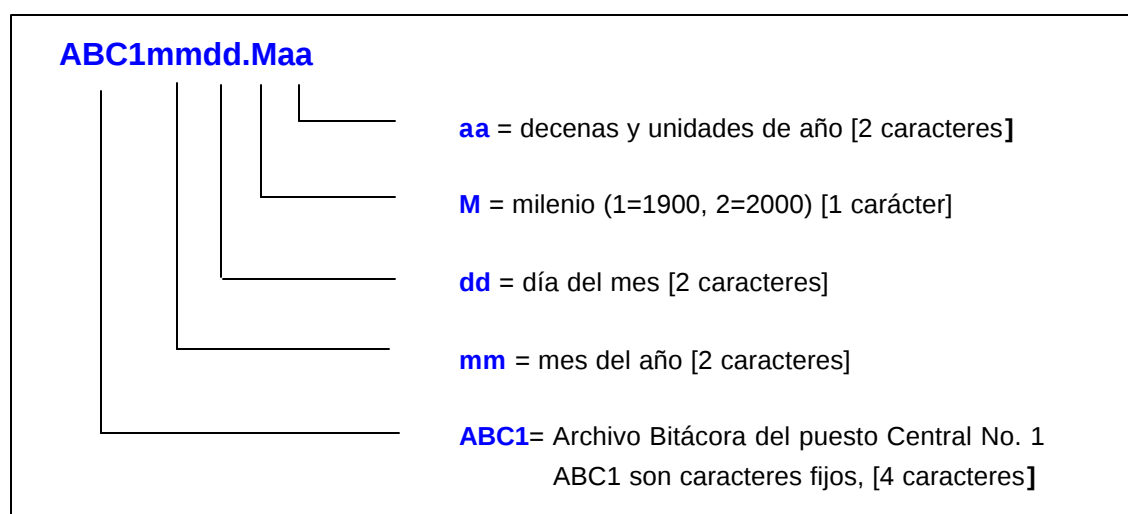


Figura 2.9 Estructura del nombre del Archivo Bitácora de Telemetría (ABT)

2.3.2 Inicio del programa de interrogación de estaciones

El programa que efectúa la interrogación de estaciones se llama SAHx1.EXE y se ejecuta automáticamente al encender o reiniciar la computadora *Telemetría*, donde *x* es la inicial que identifica al programa de un determinado sistema. En caso de que se tenga que detener el programa, éste puede volverse a correr ya sea reiniciando la computadora, o bien oprimiendo dos veces consecutivas el botón izquierdo del ratón sobre el icono que identifica al programa (figura 2.10) y que se encuentra en la pantalla inicial del sistema operativo Windows 95 o Windows 98.

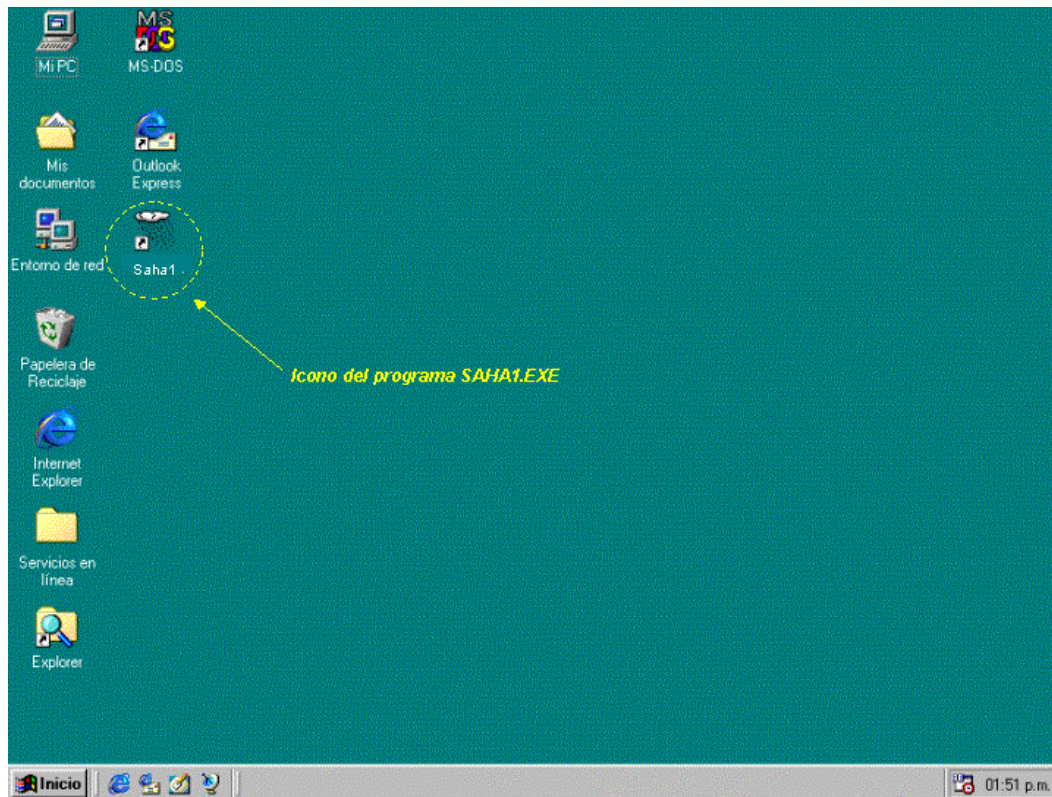


Figura 2.10 Pantalla inicial del sistema operativo e icono del programa

2.4 Programa de la computadora *Hidráulica*

En esta sección se describe el funcionamiento del programa que se ejecuta en la computadora *Hidráulica*, el cual efectúa el análisis de los datos de lluvia recopilados por la computadora *Telemetría*. Lo tratado aquí aplica a todos los sistemas de alerta, aunque se presentan dos casos a manera de ejemplo: Acapulco (al que se asemejan los de Tijuana, Motozintla y Tapachula) y Monterrey, que difiere ligeramente de los demás.

2.4.1 Inicio del programa

El programa se encuentra instalado en el menú principal de Inicio en la barra de tareas (normalmente situada en la parte inferior de la pantalla) en la computadora designada como *Hidráulica* (figura 2.11). Este programa debe arrancarse después del programa de comunicaciones (situado en una computadora *Telemetría*).

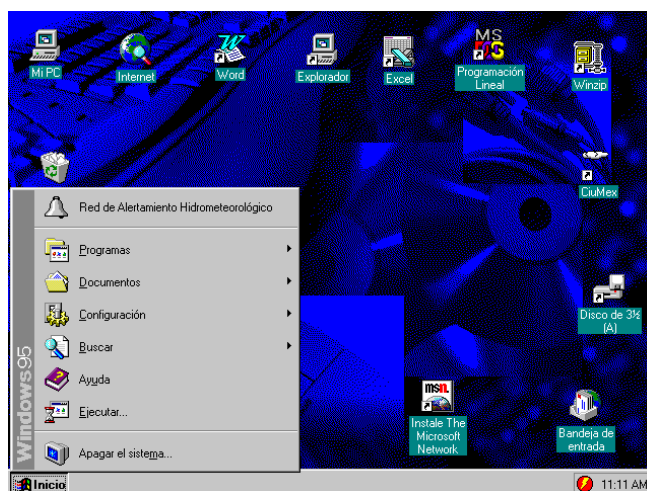


Figura 2.11 Ventana principal

Después de acceder al programa desde la barra de tareas aparece el mensaje de la figura 2.12, el cual tiene por objeto asegurar que durante el arranque del programa no se interferirá con alguna lectura del otro programa, ya que leerá la información de las estaciones desde las 8:00 h de la mañana del día hasta el momento actual, por lo que se recomienda que al iniciar el programa esté dentro de los 2 a 8 minutos del intervalo de espera de las interrogaciones, para lo cual conviene consultar el reloj del programa de *Telemetría*. Si se selecciona *Cancelar* el programa no arrancará. Después de *Aceptar*, el programa procederá a leer todas las lluvias y a realizar los cálculos con las lluvias registradas desde las 8:00 h de la mañana del día y después se quedará en espera de la siguiente interrogación, con lo que se inicia su operación normal.

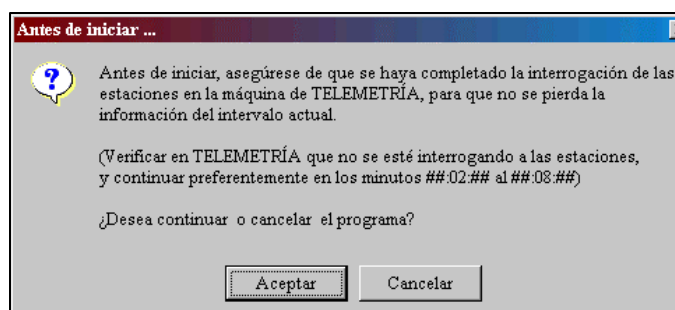


Figura 2.12 Mensaje al iniciar el programa

En la ventana principal (figura 2.13) se ve la fecha, la hora y el número del intervalo de muestreo. Como las interrogaciones son a cada 10 minutos existen 144 intervalos de 10 minutos en un día; el primer intervalo será de las 8:00 a las 8:10 h de la mañana, mientras que el intervalo 144 será de las 7:50 a las 8:00 h de la mañana del siguiente día.

SISTEMA DE ALERTAMIENTO HIDROMETEOROLÓGICO DE ACAPULCO Ver. 2.1 CENAPRED - II - CNA

Fecha: **06-17-1999** Hora: **11:01:27** Intervalo de muestreo: **18**

LLUVIAS

ESTACIÓN	Hp24 (mm)	Hp10 (mm)	Hp60M (mm)	Hpi10 (mm)	Hpi20 (mm)	Hpi30 (mm)
PC-01	12	.5	3	.5	.5	.5
MA-02	12	.5	3	.5	.5	.5
JA-03	12	.5	3	.5	.5	.5
GS-04	0	0	0	0	0	0
CA-05	0	0	0	0	0	0
MG-06	0	0	0	0	0	0
PR-07	16.5	.75	4.5	.75	.75	.75
LL-08	16.5	.75	4.5	.75	.75	.75
CR-09	16.5	.75	4.5	.75	.75	.75
CB-10	7.5	.25	1.5	.25	.25	.25
RV-11	7.5	.25	1.5	.25	.25	.25
CO-12	7.5	.25	1.5	.25	.25	.25
LC-13	3	0	0	0	0	0
SB-14	3	0	0	0	0	0
AP-15	3	0	0	0	0	0

ALARMAS - Anfiteatro

CUENCA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ACTIVADA					Magallanes								

ALARMAS - Pie de la Cuesta

CUENCA	1	2	3	4	5
ACTIVADA					

ALARMAS - Renacimiento y El Coloso

CUENCA	1	2	3	4
ACTIVADA				

GASTOS

CUENCA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
GASTO	0.9	0.4	2.8	6.6	5.2	8.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.2	0.7	3.4	2.5	0.5	1.3	1.6	1.6	1.7	0.4	0.5	0.4
UMBRAL	38	15	51	104	125	130	55	65	10	18	96	32	68	36	8	19	180	94	130	14	18	16

a) Acapulco

SISTEMA DE ALERTAMIENTO HIDROMETEOROLÓGICO DE MONTERREY Ver. 2.0 CENAPRED - II - CNA

Fecha: **05-13-2000** Hora: **07:42:27** Intervalo de muestreo: **142**

LLUVIAS

ESTACIÓN	Hp24 (mm)	Hp10 (mm)	Hp60M (mm)	Hpi10 (mm)	Hpi20 (mm)	Hpi30 (mm)
SM-01	1.25	0	1	0	0	.25
LM-02	.25	0	.25	0	0	.25
CU-03	.25	0	.25	0	0	0
FI-04	0	0	0	0	0	0
EO-05						
GB-06						
EC-07						
LH-08						

ALARMAS POR LLUVIA EN LAS ESTACIONES

CUENCA	San Martín	Las Mitras	C. U.	Fierro
ACTIVADA				

ALARMAS POR ESCURRIMIENTO

CUENCA	Topo chico	El Seco	La Silla	Snt. Cata
ACTIVADA				

GASTOS

CUENCA	Topo chico	El Seco	La Silla	Snt. Cata
GASTO	1.7			
UMBRAL	90	0	0	0

b) Monterrey

Figura 2.13 Ventana principal del programa

También se muestra una tabla con el estado de las lluvias en las 10 estaciones, las cuales se identifican con una clave; después está la lluvia acumulada en todo el día (hay que recordar que el “día” inicia a las 8:00 h de la mañana), la lluvia en el intervalo actual, la lluvia acumulada en los 60 minutos anteriores (lluvia acumulada en una hora o en los 6 últimos intervalos), y finalmente las lluvias correspondientes a los tres intervalos anteriores, respectivamente, para recuperar la información que no se pudo enviar en un intervalo anterior.

Debajo de la tabla de lluvias se encuentra una tabla de gastos o escurrimientos en los principales arroyos en las subcuencas de interés. Las estimaciones de los gastos se hacen con base en las lluvias registradas y en el modelo hidrológico de lluvia-escurrimiento, el cual utiliza las características físicas de las cuencas, tales como pendiente, longitud y orden de los arroyos, tipo de suelo y de cubierta vegetal.

Para cada una de las cuencas se determinó un umbral, que si es rebasado por el gasto calculado se activa una alarma; los flujos de cada una de las cuencas estudiadas se comparan constantemente con el umbral de gasto que le corresponde.

Se pueden guardar o imprimir las lluvias registradas, del día o de otro día, mediante los botones de *Guardar lluvias* o *Imprimir lluvias*. Cuando se activa el primer botón aparece un mensaje como el de la figura 2.14, en donde se pueden guardar las lluvias del día hasta el momento en que se solicite, o bien, las lluvias de algún día en particular; si se escoge esto último aparecerá un cuadro como el de la figura 2.15, en el que se seleccionará el archivo correspondiente a la fecha deseada. El formato del nombre de estos archivos es el siguiente, dpmmdd.aaa, donde dp es un prefijo que indica archivos resúmenes diarios de lluvia, mm el mes, dd, el día, y aaa el año. Normalmente se guardarán los archivos en el subdirectorío c:\programas\varios, pero si se desea se podrán grabar en un disquete de 3½”.



Figura 2.14 Opción para almacenar información de las lluvias

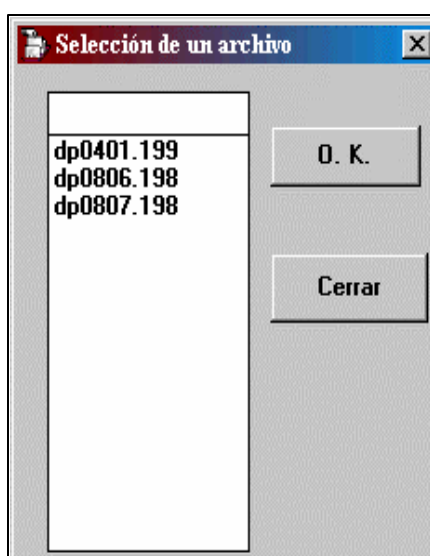


Figura 2.15 Selección de archivo a almacenar

Si lo que se quiere es imprimir la información aparecerán cuadros de diálogo similares a los anteriores.

El botón *Imprimir gráfica de lluvias* sirve, como su nombre lo indica, para imprimir una gráfica sencilla de las lluvias acumuladas en las 15 estaciones hasta ese momento. Al mismo tiempo se dibuja la misma gráfica en pantalla. Para realizar cualquiera de las operaciones de impresión debe estar conectada una impresora a la computadora de *Hidráulica*.

Cuando se realiza una interrogación aparece un mensaje en la parte inferior de la pantalla (figura 2.16) en el que se avisa de que se está tratando de leer el intervalo siguiente y los valores de precipitación se borran, hasta que se consigue leer la información de las estaciones de la computadora *Telemetría*.

Estas interrogaciones se hacen cada 30 segundos hasta que se lee la información. Si no se consigue leer se vuelve a intentar en los siguientes 30 segundos y así hasta que se termina el intervalo de 10 minutos; a la derecha del número de intervalo en la esquina

superior derecha aparece el número de intentos en rojo. Si no se puede leer durante los intentos que dura el intervalo de 10 minutos entonces aparecen números negativos en lugar de las precipitaciones.

SISTEMA DE ALERTAMIENTO HIDROMETEOROLÓGICO DE ACAPULCO Ver. 2.1 **CENAPRED - II - CNA**

Fecha: **06-17-1999** Hora: **11:31:26** Intervalo de muestreo: **21** **1**

LLUVIAS

ESTACIÓN	Hp24 (mm)	Hp18 (mm)	Hp60M (mm)	Hp10 (mm)	Hp120 (mm)	Hp130 (mm)
PC-01	13	---	---	---	---	---
MA-02	13	---	---	---	---	---
JA-03	13	---	---	---	---	---
GS-04	0	---	---	---	---	---
CA-05	0	---	---	---	---	---
MG-06	0	---	---	---	---	---
PR-07	18	---	---	---	---	---
LL-08	18	---	---	---	---	---
CR-09	18	---	---	---	---	---
CB-10	8	---	---	---	---	---
RV-11	8	---	---	---	---	---
CO-12	8	---	---	---	---	---
LC-13	3	---	---	---	---	---
SB-14	3	---	---	---	---	---
AP-15	3	---	---	---	---	---

ALARMAS - Anfiteatro

CUENCA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ACTIVADA													

ALARMAS - Pie de la Cuesta

CUENCA	1	2	3	4	5
ACTIVADA					

ALARMAS - Renacimiento y El Coloso

CUENCA	1	2	3	4
ACTIVADA				

GASTOS

CUENCA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
GASTO	0.9	0.4	2.8	6.6	5.2	7.9	0.6	0.0	0.0	0.0	0.2	0.7	3.5	2.5	0.6	1.3	1.1	1.2	0.9	0.4	0.5	0.4
UMBRAL	38	15	51	104	125	130	55	65	10	18	96	32	68	36	8	19	180	94	130	14	18	16

HIETOGRAMAS **HIDROGRAMAS** **Guardar lluvias** **Imprimir lluvias** **Imprimir gráfica de lluvias** **AYUDA**

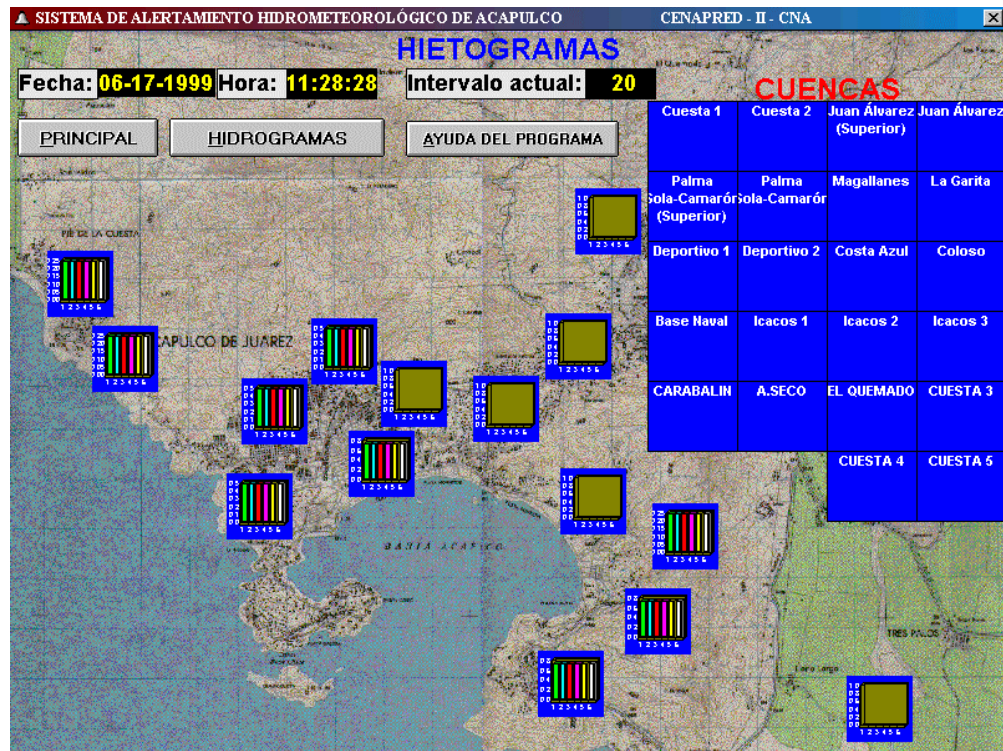
Intentando leer el intervalo: 21

Figura 2.16 Inicio de un nuevo intervalo

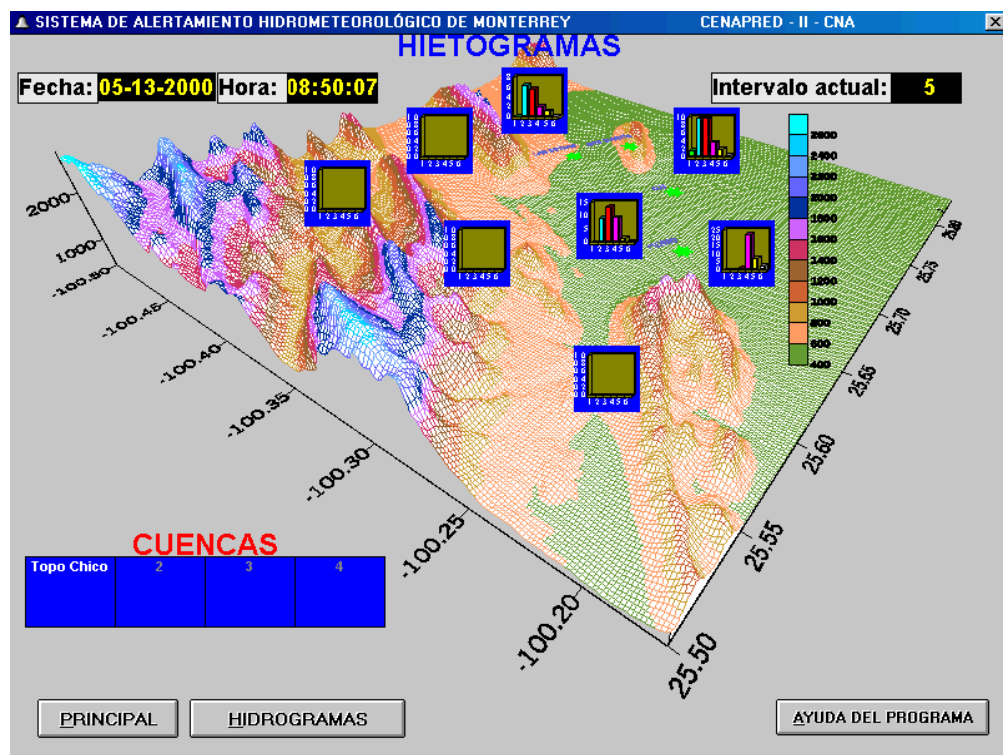
2.4.2 Hietogramas

El botón **HIETOGRAMAS** pasa a una pantalla en donde se visualiza un mapa de las regiones en estudio, y donde se muestran gráficas de barras (hietogramas) ubicadas en la posición de cada una de las estaciones medidoras de lluvia (figura 2.17). Cada una de estas gráficas indica la precipitación en el periodo de una hora, es decir, 6 intervalos o “barritas” de lluvia. Si se coloca el cursor en cada una de las gráficas aparece el nombre de la estación a la que pertenece.

Cada 10 minutos se actualiza esta pantalla, por lo que puede servir para observar el desarrollo de la tormenta en el espacio y en el tiempo. Si se hace click en alguna de las gráficas de barras se obtiene una gráfica ampliada del hietograma de una hora, de lluvia normal y acumulada, como se puede observar en la figura 2.18. Se tienen gráficas similares para cada una de las subcuencas en estudio, para las cuales se ha calculado la lluvia media con base en un promedio ponderado de la lluvia en las estaciones cercanas a cada una de ellas, por medio de polígonos de Thiessen. Esta es la lluvia que se utiliza para calcular el escurrimiento en los arroyos. La lluvia de cada cuenca se puede obtener haciendo doble click en cada uno de los nombres de las cuencas en recuadro de “CUENCAS”.



a) Acapulco



b) Monterrey

Figura 2.17 Mapas de las regiones en estudio con hietogramas

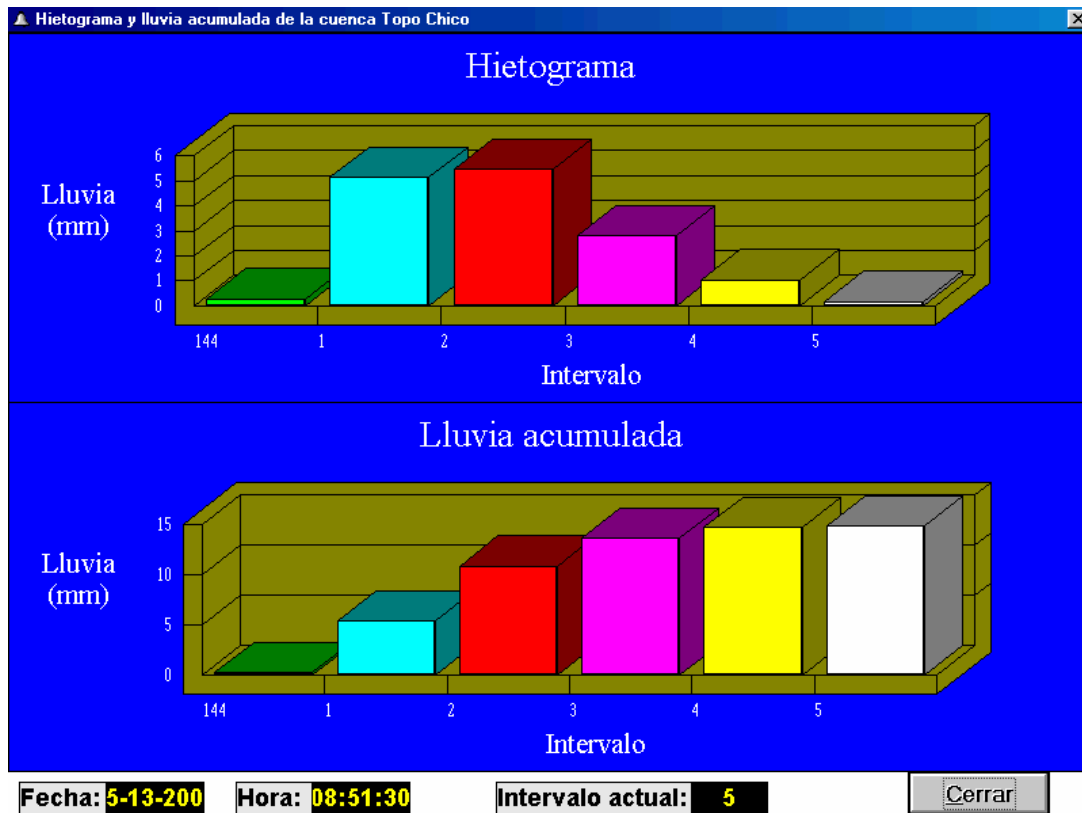


Figura 2.18 Hietogramas de una hora

2.4.3 Hidrogramas

El botón *HIDROGRAMAS* presenta una pantalla similar a la de *HIETOGRAMAS*, sólo que las gráficas que presenta son de escurrimientos en los arroyos de las subcuencas analizadas (figura 2.19). Si se coloca el cursor en cada una de las gráficas aparece el nombre de la subcuenca a la que pertenece.

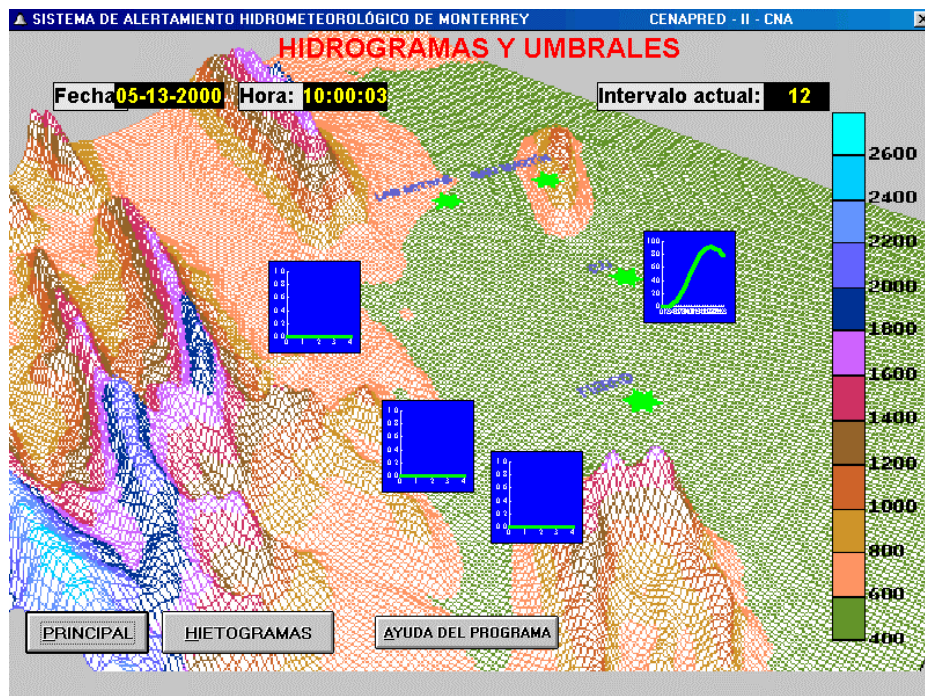
Estas gráficas indican el escurrimiento estimado con base en la lluvia en las subcuencas estudiadas. Al calibrarse posteriormente el modelo lluvia-escurrimiento mediante estaciones de aforo en los arroyos, estas gráficas podrán representar los niveles de agua en dichos arroyos, a medida que se desarrolle la tormenta, por lo que las alarmas estarán definidas por estos valores al rebasarse un umbral fijado con anterioridad. Por lo pronto los escurrimientos son una aproximación de lo que escurre por los arroyos, expresados en m^3/s . Al hacer click en cada una de estas gráficas pequeñas se obtiene una ampliación de ellas, en donde se observa que el modelo anticipa un posible escurrimiento futuro, gracias al modelo lluvia-escurrimiento que se utiliza (figura 2.20).

En la parte superior está el hietograma de lluvia efectiva, es decir, la lluvia calculada en las subcuencas menos las pérdidas. En la parte de abajo se ubica el hidrograma de la cuenca seleccionada, con línea continua la parte que ha escurrido en el arroyo, y discontinua la que se pronosticó. Esta gráfica es para el intervalo actual y cubre un intervalo de 12 horas, en el eje horizontal se muestran los intervalos correspondientes a los valores que forman el hidrograma.

Todas estas gráficas pueden incorporarse a un informe capturándolas a través de la combinación de teclas Alt-ImprPant, y después salvándolas en Paint de Microsoft, por ejemplo, a través del Clipboard o Portapapeles.



a) Acapulco



b) Monterrey

Figura 2.19 Mapa con hidrogramas para las ciudades de Acapulco y Monterrey

Adicionalmente se puede revisar un archivo de ayuda en línea que puede consultarse mientras se está usando el programa, tecleando F1 o el botón AYUDA.

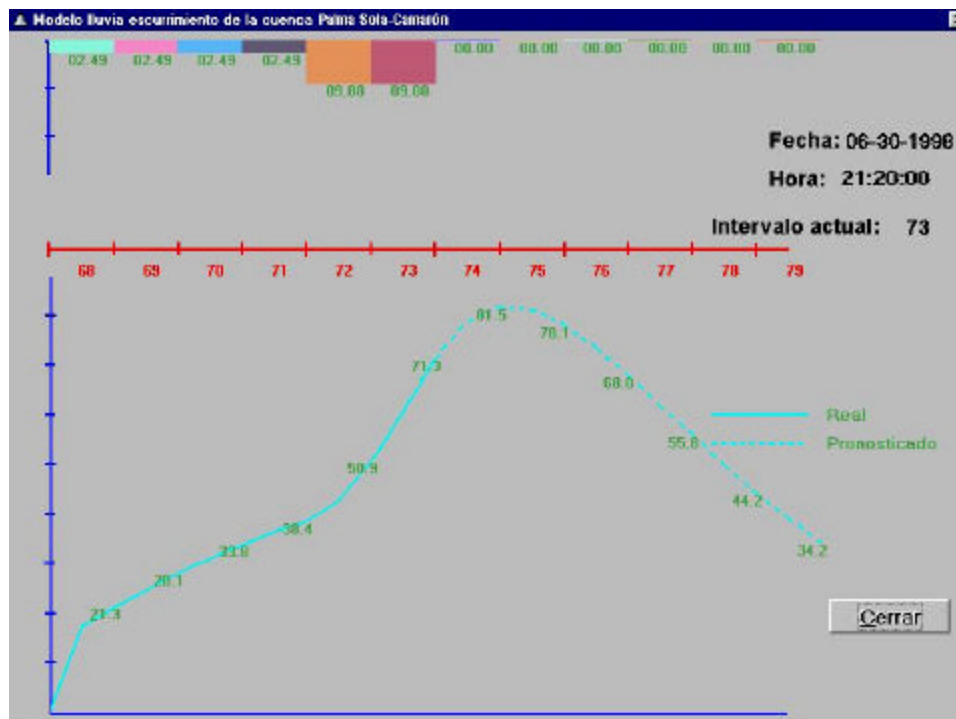


Figura 2.20 Modelo lluvia escurrimiento de la cuenca Palma Sola – Camarón, Sistema de Alerta Hidrometeorológica de Acapulco

A diferencia de los otros cuatro sistemas de alerta descritos en este informe, en el de Monterrey la cuenca del río Topo Chico es de respuesta rápida, produce escurrimientos súbitos de los cuales a veces es difícil advertir. Por esta razón se ha incorporado al sistema una alarma por intensidad de lluvia, con los siguientes umbrales para las estaciones de medición de lluvia: 5 mm en diez minutos y 20 mm en 40 minutos. De esta manera el sistema revisa continuamente si estos valores son excedidos. Cuando esto ocurre se activa una alarma visual y sonora.

Esta alarma es independiente de las alarmas por escurrimiento, así que puede activarse antes la alarma por intensidad de lluvia que la de escurrimiento, como es el caso que se muestra en la figura 2.21. Cuando la intensidad por lluvia se supera e inmediatamente se detectan escurrimientos que rebasan sus propios umbrales, entonces se activan simultáneamente ambas alarmas (figura 2.22).

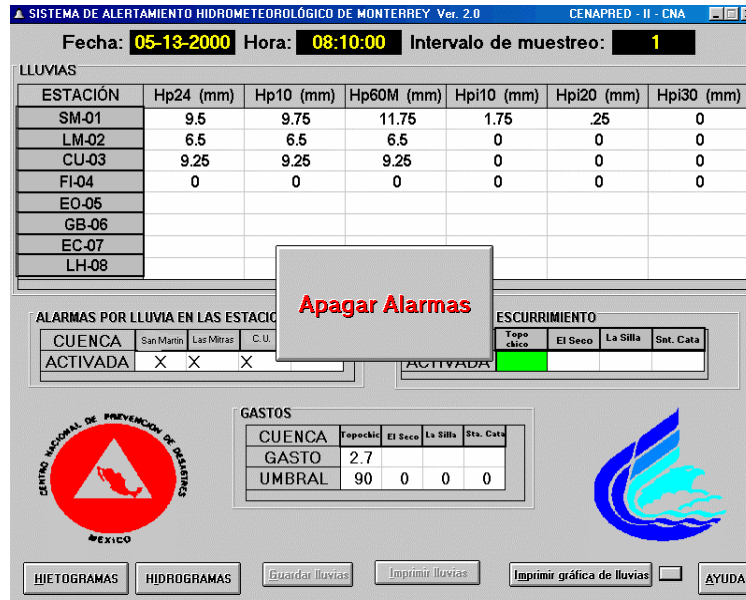


Figura 2.21 Alarmas por intensidad de lluvia

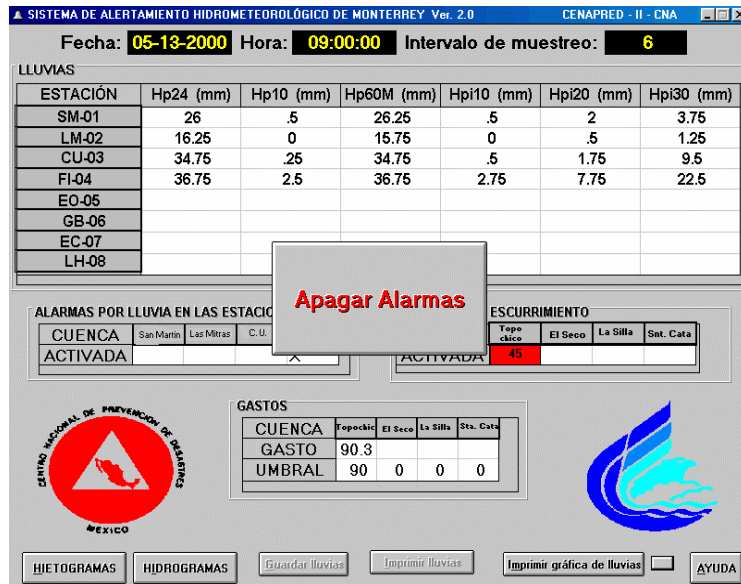


Figura 2.22 Alarmas por escurrimiento

III SISTEMA DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA DE ACAPULCO

3.1 Instrumentación

El Sistema de Alerta de Acapulco, Guerrero, se compone de 15 estaciones remotas para medición de precipitación e intensidad de lluvia y dos puestos centrales de registro (figura 3.1). Las estaciones están distribuidas en la bahía del puerto y en las regiones conurbanas de Pie de la Cuesta, Ciudad Renacimiento, El Coloso y Aeropuerto. Los dos puestos de registro se localizan, uno en las instalaciones de la CNA en el edificio Roberto Posadas, 4o. Piso, en el centro de la ciudad, junto a la plaza, y el otro, en la Unidad Municipal de Protección Civil cerca del Fuerte de San Diego. En la tabla 2.1 se muestran los nombres y la ubicación de cada estación.

En este sistema fue necesario emplear 3 repetidoras: una en la estación No. 2, La Mira (MA-02), para enlazar las dos estaciones de la zona de Pie de la Cuesta; una segunda, La Cuesta, al este en la parte alta de la cadena montañosa que rodea la bahía, para comunicarse con las dos estaciones en Ciudad Renacimiento; y por último, una tercera en la estación No. 8, Llano Largo (LL-08), para enlazar las estaciones en la unidad habitacional El Coloso y el Aeropuerto Internacional, del lado de la laguna de Tres Palos. De estas tres estaciones repetidoras sólo la de La Cuesta, ubicada cerca de las estaciones de telecomunicación, fue construida exclusivamente para este fin, las otras se acondicionaron tanto como estaciones de medición como de repetición.

En las figuras 3.2 a 3.10 se presentan varias fotografías que muestran detalles de las instalaciones de los equipos.

En las figuras 3.11 a 3.15 se muestran fotografías de las instalaciones del Puesto Central de Registro PCR-1 en las oficinas de Calidad del Agua en el edificio “Roberto Posadas” de la CNA. En la figura 3.16 se puede ver el equipo de cómputo y comunicaciones en el PCR-2 en las instalaciones de Protección Civil Municipal.

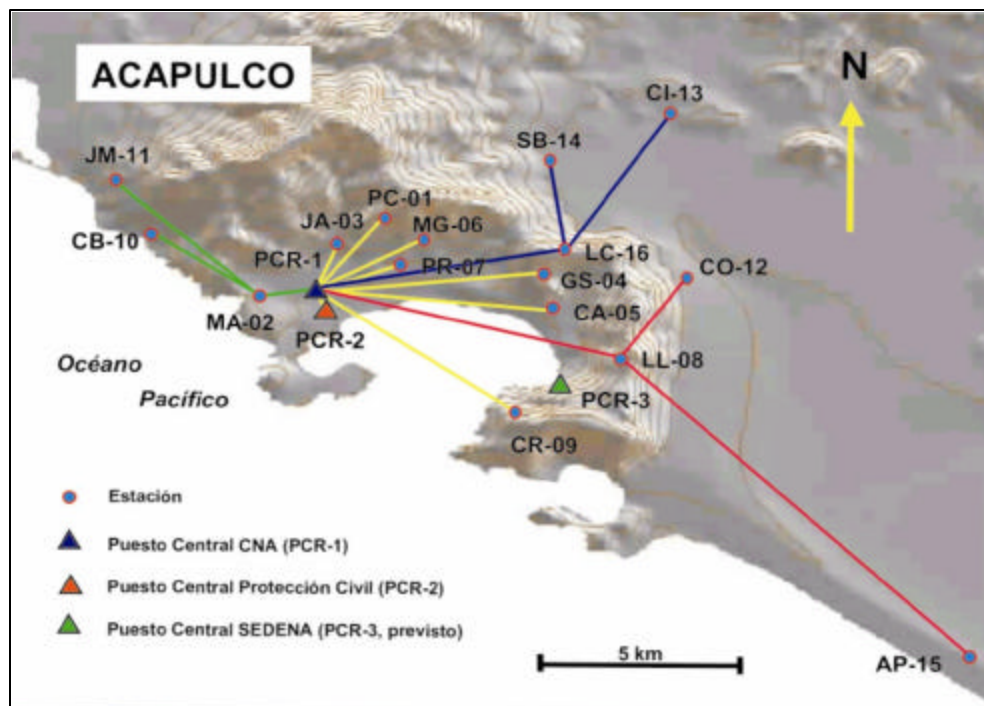


Figura 3.1 Localización de estaciones y topología del Sistema de Alerta Hidrometeorológica de Acapulco

Tabla 3.1 Estaciones del sistema de alerta hidrometeorológica de Acapulco

No.	Nombre de la estación	Código de la estación	Latitud norte	Longitud oeste	Observaciones
1	Palma Sola-Camarón	PC-01	16.88503	99.8989	En la escuela primaria Gral. Baltazar R. Leyva
2	La Mira	MA-02	16.85506	99.9190	En el Jardín de niños Antonio Nava de Catalán en la calle Rubén Mora, est. hidrológica y repetidora de estaciones hacia Pie de la Cuesta.
3	Juan Álvarez	JA-03	16.87366	99.90851	En la escuela primaria Federal "Primer Congreso de Anáhuac", calle Mártires Escudero No. 12.
4	La Garita (parte superior)	GS-04	16.87458	99.86210	En la escuela primaria Federal Urbana Nicolás Bravo, Col. Pacífico.
5	Costa Azul	CA-05	16.85508	99.84630	En la escuela Salvador Varela Reséndiz, en la calle Hilario Malpica No. 24, Col. Costa Azul.
6	Magallanes	MG-06	16.87928	99.88768	Escuela Primaria Guillermo Prieto, Cuenca Magallanes, arriba del Seguro Social.
7	Progreso	PR-07	16.863	99.898-	Escuela Primaria Bertha Von Glumer, Durango #20 Col. Progreso.
8	Llano Largo	LL-08	16.82867	99.83119	Parteaguas junto a torre de Radio ACIR, arriba de la Zona Militar. Estación hidrológica y repetidora de la estación El Coloso y Aeropuerto
9	La Cruz	CR-09	16.822	99.855	Tanque cisterna cerca de la cruz de Truyet, arriba del hotel Las Brisas.
10	CBETIS 14	CB-10	16.87821	99.93675	Escuela CBTIS 14, edificio C, camino a Pie de la Cuesta.
11	Revolución	RV-11	16.88782	99.95098	Escuela Revolución, camino a Pie de la Cuesta.
12	Coloso	CO-12	16.85568	99.8154	Escuela Primaria Justo Sierra, Unidad Hab. El Coloso.
13	Lázaro Cárdenas	LZ-13	16.91559	99.82878	Escuela Lázaro Cárdenas y albergue, Col. Industrial, Cd. Renacimiento.
14	Simón Bolívar	SB-14	16.904	99.852	Escuela "Acapulco de Juárez", Fracc. Simón Bolívar.
15	Aeropuerto	AP-15	16.751	99.862	Estación Meteorológica de CNA, a un lado del Aeropuerto Internacional de Acapulco.
16	La Cuesta (repetidora)	CU-16	16.885	99.862	Antenas en la parte alta de "La Cuesta", Estación repetidora para las estaciones de El Renacimiento.
I	Puesto Central, CNA	PCR-01	16.84929	99.90819	Edificio CNA Roberto Posada, 3 y 4º piso (junto al zócalo).
II	Puesto Central, Protección Civil	PCR-02	16.85013	99.90369	Edificio de Protección Civil Municipal, cerca del fuerte de San Diego.

Figura 3.2 Pluviómetro, celda solar y antena de radio instalados en la azotea de la estación La Mira, MA-02



Figura 3.3 Instalación y alineación de la antena de radio dirigida hacia el Puesto Central de Registro de la CNA



Figura 3.4 Instalación del gabinete en la escuela de la estación La Mira, MA-02



Figura 3.5 Vista interior del gabinete con los módulos de control y comunicación. Estación La Mira

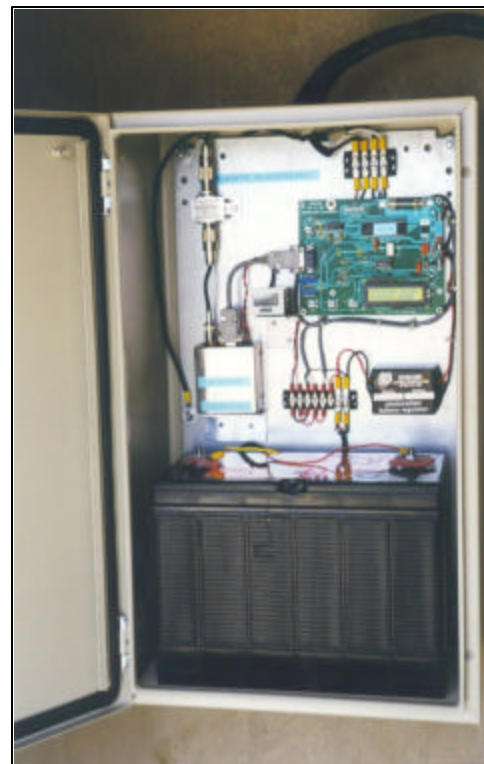


Figura 3.6 Vista interior del gabinete con los módulos de control y comunicación



Figura 3.7 Escuela Salvador Varela Reséndiz, estación Costa Azul, CA-05



Figura 3.10 Pluviómetro (Tipo 2) instalado sobre una base de concreto



Figura 3.8 Instalación del gabinete en la escuela Nicolás Bravo, estación La Garita, GS-04



Figura 3.9 Celda solar



Figura 3.11 Edificio Roberto Posadas. El Puesto Central de Registro PCR-1 de la CNA se localiza en el 4º piso



Figura 3.12 Vista del Puesto Central de Registro PCR-1 en las oficinas de la CNA



Figura 3.14 Vista de las dos computadoras Telemetría e Hidráulica en el PCR-1



Figura 3.15 Vista interior del gabinete con los módulos de control y comunicación en el Puesto Central de Registro PCR-1



Figura 3.13 Vista de las dos computadoras Telemetría e Hidráulica en el PCR-1



Figura 3.16 Vista del Puesto Central de Registro PCR-2 en Protección Civil Municipal

3.2 Medición y procesamiento hidrológico

El componente del sistema de alerta temprana municipal que se basa en la medición y procesamiento hidrológico, propuesto por el Centro Nacional de Prevención de Desastres, considera las lluvias que se están presentando en distintas partes de las cuencas de las zonas de peligro y determina los flujos de agua que se producirán tiempo después en laderas, arroyos y ríos. También señala las zonas donde los flujos de agua podrían ocasionar daños.

La forma ordenada y sistemática de cálculo de los escurrimientos se apoya en un estudio hidrológico realizado para la región de interés. En él se obtuvieron los hidrogramas unitarios instantáneos y coeficientes de infiltración. Además se requiere el cálculo hidráulico de las características de las corrientes, tales como el tirante y la velocidad, para determinar aquellas zonas donde se podría desbordar o que la magnitud de la velocidad sea muy fuerte.

Este componente del sistema de alerta temprana se encarga de calcular las lluvias medias observadas, el escurrimiento que producirá y compara la magnitud del flujo para decidir si los niveles de agua y los gastos excedieron los valores críticos (umbrales).

3.2.1 Sitios para medir lluvia y niveles de agua en ríos

Para la zona de interés se identificaron los ríos que podrían provocar mayores daños debido a su desbordamiento o por la intensidad de las velocidades de sus corrientes. Estos ríos y sus cuencas se analizaron en planos a escala 1:50,000 y fueron corroborados en visitas de campo.

Se procedió a delimitar las áreas de aportación de escurrimiento con la topografía del terreno. De este modo se determinaron las subcuencas en las que se calculará la precipitación media y los sitios de sus cauces donde convendría estimar el gasto de sus escurrimientos a partir del nivel del agua.

En una primera etapa del proyecto se consideraron 13 subcuencas dentro del Anfiteatro en una carta topográfica escala 1:50,000 de la bahía de Acapulco, Guerrero, dos en la zona de Pie de la Cuesta y una cercana a la zona habitacional El Coloso (figura 3.17).

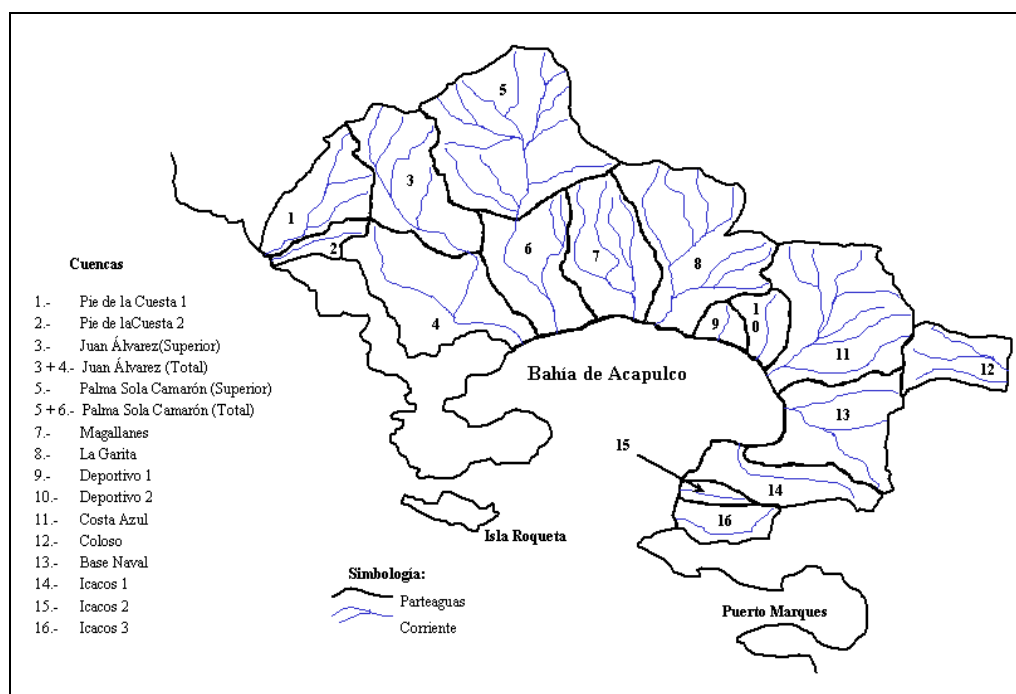


Figura 3.17 Definición de cuencas (Primera etapa)

En la segunda etapa del proyecto se añadieron 6 subcuencas, de las cuales 3 correspondieron a la zona de Pie de la Cuesta y 3 a la región de El Renacimiento (figura 3.18).

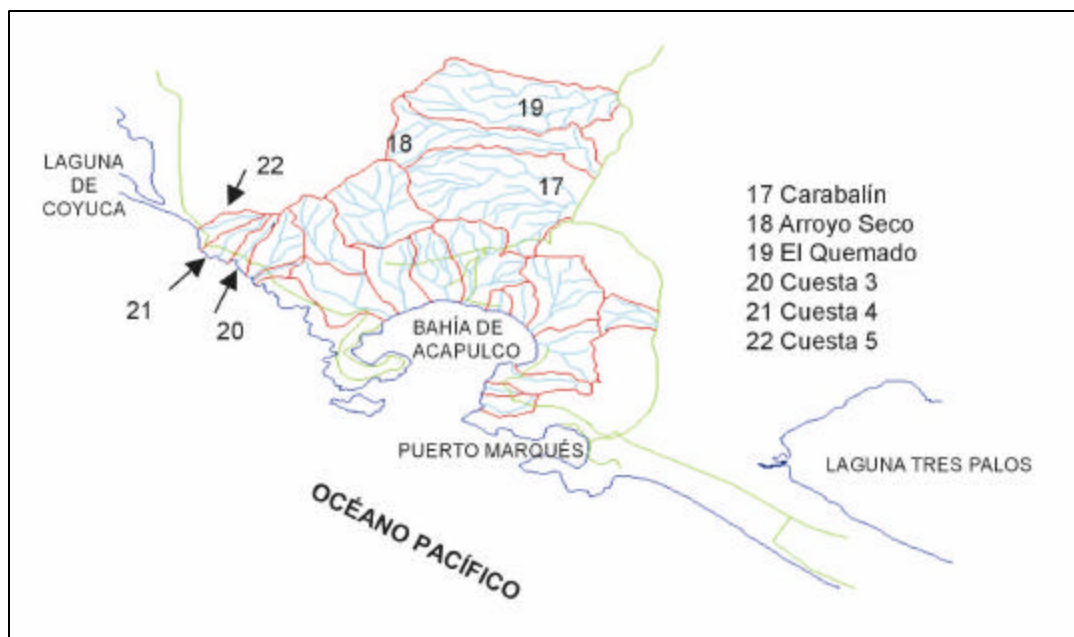


Figura 3.18 Ubicación de cuencas (segunda etapa)

En la tabla 3.2 se consignan los nombres de las subcuencas en ambas etapas y algunas de sus características fisiográficas.

Tabla 3.2 Cuencas de Acapulco, Guerrero

No.	C U E N C A	Área (km ²)	Cauce principal	
			Pendiente	Longitud (m)
Zona Pie de la Cuesta				
1	Pie de la Cuesta 1	2.811	0.1285	3 325
2	Pie de la Cuesta 2	0.721	0.1530	1 950
Zona del anfiteatro				
3	Juan Álvarez Superior	4.530	---	---
4	Juan Álvarez Total	9.750	0.0778	5 800
5	Palma Sola-Camarón (Sup)	9.180	---	---
6	Palma Sola-Camarón (Total)	12.570	0.1136	5 700
7	Magallanes	4.075	0.1490	3 250
8	La Garita	6.675	0.1502	3 350
9	Deportivo 1	0.746	0.3420	800
10	Deportivo 2	1.244	0.1790	1 700
11	Costa Azul	7.089	0.0540	3 450
12	Base Naval	4.826	0.1220	2 400
13	Icacos 1	2.587	0.1570	2 800
14	Icacos 2	0.572	0.2470	1 150
15	Icacos 3	1.345	0.1680	2 100
Zona del Coloso				
16	Coloso	2.264	0.0860	2 350
Zona del Renacimiento				
17	Carabalín	17.523	0.0497	7550
18	Arroyo Seco	9.11905	0.0521	9250
19	El Quemado	12.7619	0.0252	7900
Zona de Pie de la Cuesta				
20	Cuesta 3	1.14286	0.2074	2400
21	Cuesta 4	1.45238	0.1644	2700
22	Cuesta 5	1.30952	0.1749	2550

3.2.1.1 Selección de los sitios para medir lluvia

Se determinó que para las cuencas consideradas en la primera etapa del estudio era necesario instalar cinco pluviómetros para conocer la precipitación en distintos sitios.

Los cinco pluviómetros no están muy alejados entre sí para tener redundancia en algunas áreas y poder prever el caso de falla de algunos de ellos. Cabe mencionar que en Acapulco se pueden presentar ciclones tropicales con vientos que llegan a alcanzar los 200 km/h y que son capaces de derribar palmeras y algunas estructuras importantes.

En los cálculos que realiza el subsistema de medición y procesamiento hidrológico se tiene contemplado la posible falla en la transmisión de la información de algunos pluviómetros durante algunos lapsos y la subsiguiente recuperación de datos a través del subsistema de telemetría.

La selección de los sitios para la instalación de los pluviómetros se realizó procurando tener una configuración uniforme, es decir, que cada uno de los pluviómetros tuviera un área de cobertura casi igual. Se determinaron sus coordenadas en el plano y se procedió a una visita en el campo para su ubicación definitiva.

Se tomó en cuenta que los sitios tuvieran buena comunicación vía radio con el puesto central y hubiese protección contra el vandalismo, por lo que se trató de ubicarlos en edificios públicos, en el caso de Acapulco se localizaron en escuelas, cerca de las coordenadas antes determinadas. En algunos casos no fue posible encontrar tal infraestructura, y se construyeron casetas.

En la figura 3.19 se muestra la ubicación de los cinco pluviómetros de la red de medición y las subcuencas de la bahía de Acapulco que presentaron mayores daños por inundación y flujo de agua con piedras, arena y escombros, durante la ocurrencia del huracán Pauline: Juan Álvarez, Palma Sola - Camarón, La Garita, Magallanes y Costa Azul, las cuales son cubiertas por las áreas de influencia de los pluviómetros.

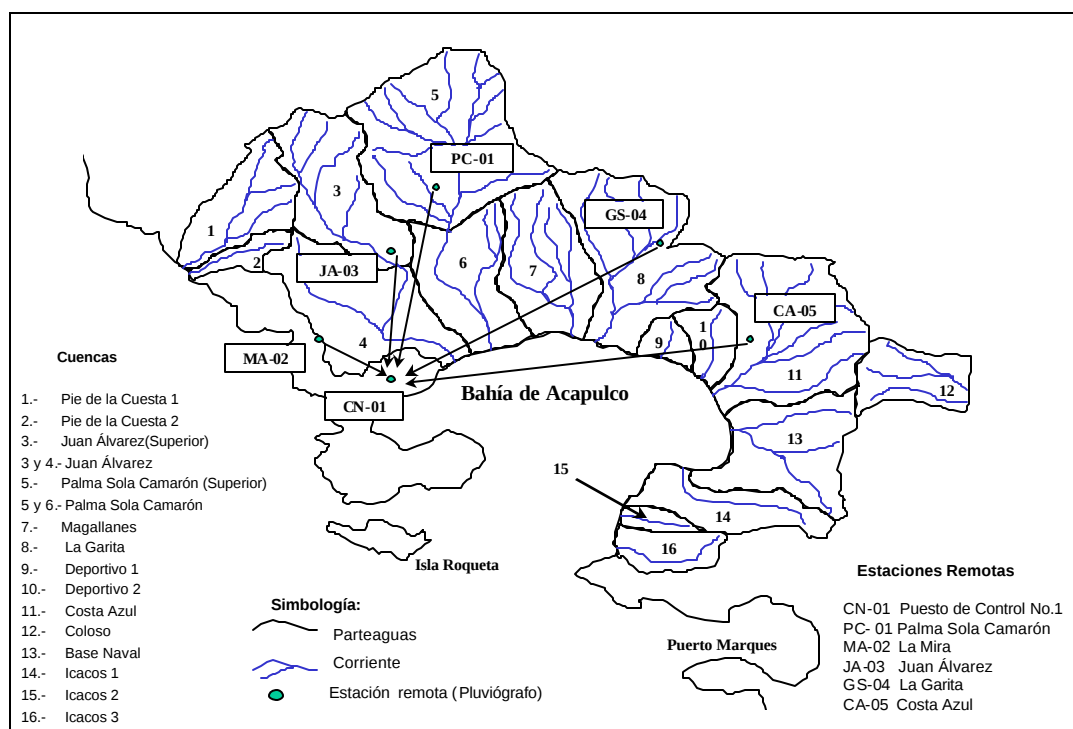


Figura 3.19 Ubicación de pluviómetros (primera etapa)

En la segunda etapa, considerando los planteamientos antes mencionados, se instalaron 10 pluviómetros más; cuatro dentro del anfiteatro, dos en la zona de "Pie de la Cuesta", una en la zona de "El Coloso", dos en la zona de "El Renacimiento" y uno en el observatorio meteorológico de CNA que se encuentra a un costado del aeropuerto internacional de Acapulco; este último pluviómetro tiene como objetivo comparar sus registros contra los del observatorio para correlacionar sus mediciones. Cabe mencionar que por las características fisiográficas las precipitaciones que ocurren en la zona del aeropuerto son diferentes a las que se presentan dentro del anfiteatro del puerto de Acapulco.

En la figura 3.20 se muestra la ubicación final de los 15 pluviómetros de la red de medición. En la tabla 3.1 se consigna la ubicación de los sitios donde se instalaron las estaciones de medición de lluvia, su nombre y el código de identificación; los cinco primeros de la tabla se instalaron en la primera etapa junto con el PCR-1, mientras que en la segunda etapa se instalaron los pluviómetros restantes y el segundo puesto central.

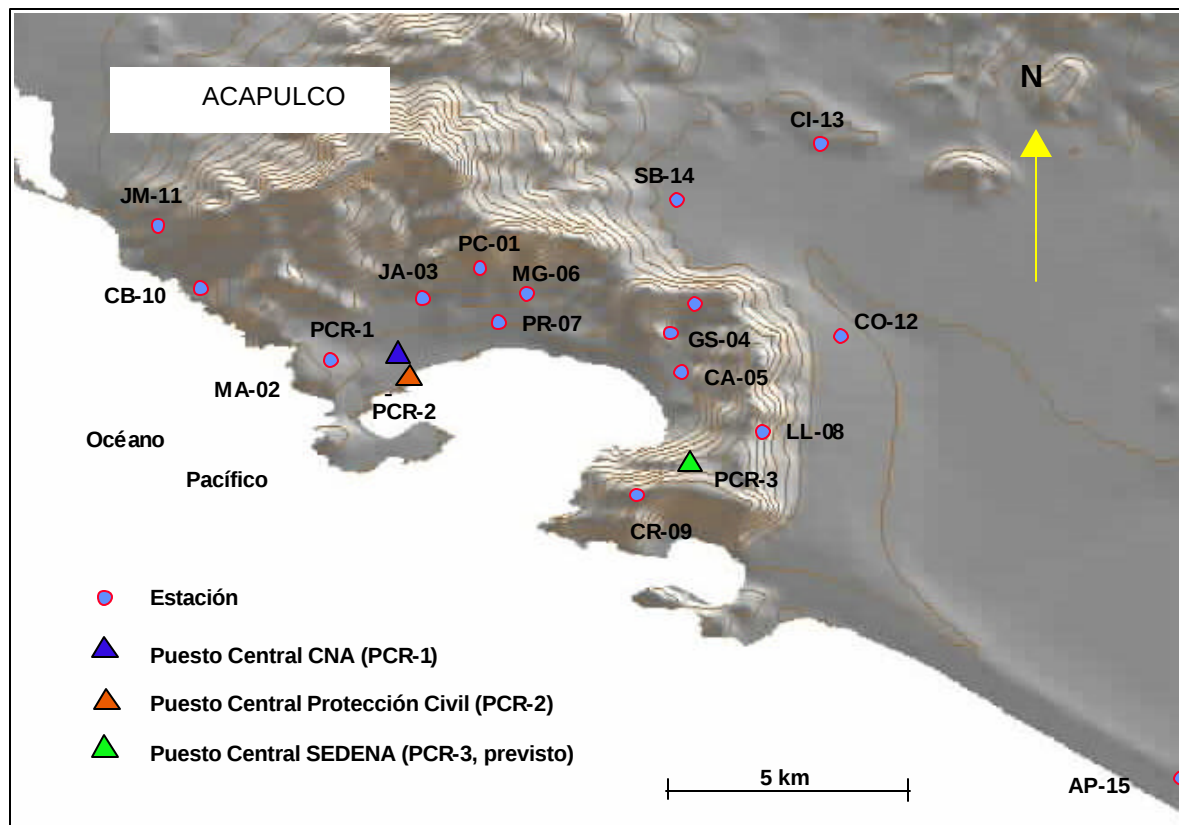


Figura 3.20 Ubicación de pluviómetros (segunda etapa)

3.2.1.2 Selección de los sitios para medir niveles

En la aplicación de los modelos matemáticos lluvia - escurrimiento se consideró un valor del coeficiente de escurrimiento, el cual posteriormente puede ser modificado de acuerdo con las mediciones de lluvia. Sin embargo, para escoger su valor es conveniente medir el gasto en algunos sitios y asociarlo con la lluvia que se presentó. Estas maniobras implican una instalación temporal de instrumentos para estimar dichos gastos.

En el cauce del arroyo "Palma Sola - Camarón" se seleccionó una sección que se encuentra en un tramo casi recto que se ubica aguas arriba del cruce con la avenida Adolfo Ruíz Cortínez (figura 3.21). Cabe mencionar que durante la entrada del huracán "Pauline" al anfiteatro, inmediatamente aguas abajo de este cruce fue destruida en su totalidad una iglesia por el flujo de agua con piedras, arena y escombros. Por tal motivo la cuenca de este arroyo en la tabla 3.2 se observa que es analizada en su parte alta (No. 5) y en su totalidad (No. 6).



**Figura 3.21 Sección del arroyo
Palma Sola Camarón**

Otro de los cauces importantes es el arroyo "Aguas Blancas" (Juan Álvarez), en el cual se escogió una sección que se ubica en un tramo ya revestido de forma rectangular (figura 3.22), aguas abajo de la planta de tratamiento de aguas negras municipales. También en la tabla 3.2 se observa que es analizada en su parte alta (No. 3) y en su totalidad (No. 4).

En los sitios antes descritos se instalará temporalmente una escala que será vigilada durante las tormentas intensas que lleguen a ocurrir dentro del anfiteatro; la persona encargada llevará una bitácora en la cual indicará el día, la hora y la lectura de la escala. Con los datos anteriores se estimarán los gastos que pasen por la sección y se compararán con los gastos estimados por el procesamiento hidrológico del subsistema. Mediante dicha comparación se podrá calibrar el modelo lluvia -escurrimiento.



**Figura 3.22 Sección del arroyo
Aguas Blancas**

3.2.1.3 Determinación de los escurrimientos en las cuencas

Para determinar los escurrimientos en las cuencas debidos a una tormenta se analizaron los hidrogramas unitarios de las 22 cuencas en estudio, utilizando los modelos lluvia-escurrimiento “Hidrograma unitario instantáneo geomorfológico” y el “Hidrograma unitario adimensional”.

3.2.1.4 Aplicación del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico

Para definir el orden de las redes de drenaje de las cuencas en estudio, de acuerdo con Horton-Strahler, y aplicar las leyes de Horton para obtener sus parámetros geomorfológicos, se utilizaron planos de INEGI a escala 1:50,000. En estos planos se identificó y se trazó el parteaguas de las cuencas, así como todas las corrientes apreciables. Posteriormente se determinaron la longitud y el área tributaria de todas las corrientes.

En la tabla 3.3 se muestran los valores de los parámetros requeridos para el cálculo de los hidrogramas unitarios geomorfológicos.

Tabla 3.3

Cuenca	R_b	R_L	R_A
Palma Sola – Camarón (Superior)	3.46	1.50	4.20
Palma Sola – Camarón	3.46	2.12	5.13
Juan Álvarez (Superior)	5.00	2.63	3.00
Juan Álvarez	5.00	3.00	5.87
La Garita	3.00	1.76	3.67
Pie de la Cuesta 1	3.00	1.71	5.47

Con los parámetros anteriores se calcularon los hidrogramas unitarios para cada cuenca para una duración de la lluvia en exceso de 10 minutos. Dichos hidrogramas se presentan en la figura 3.23.

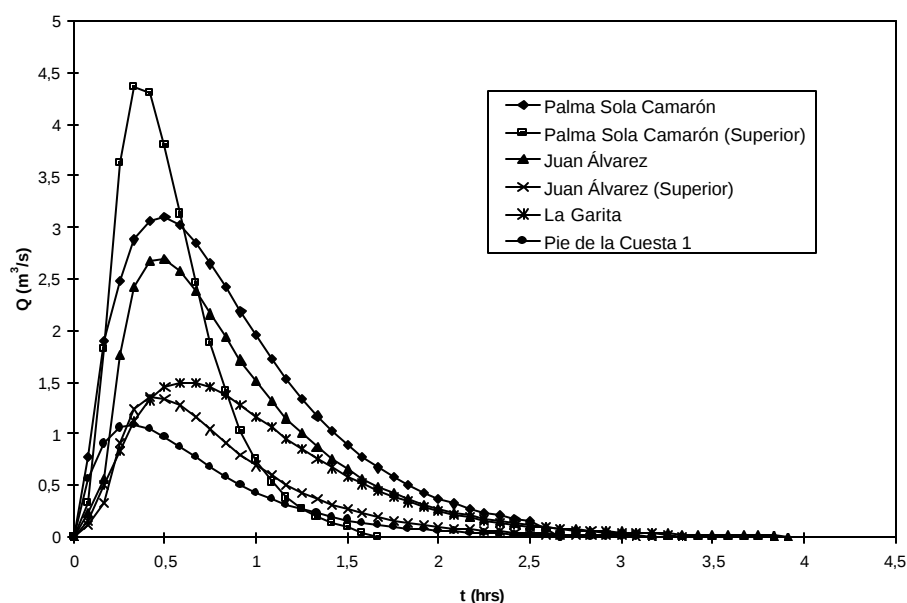


Figura 3.23 Hidrogramas Unitarios Instantáneos Geomorfológicos

3.2.1.5 Aplicación del hidrograma unitario adimensional

Para aplicar la metodología del hidrograma unitario adimensional fue necesario obtener algunas de las características fisiográficas de las cuencas en estudio. Por lo que en un plano de INEGI a escala 1:50,000 se identificó y trazó el parteaguas de las cuencas, así como todas las corrientes apreciables. Posteriormente se obtuvieron las características que se muestran en la tabla 3.4.

Con estas características fisiográficas y considerando que la duración de la lluvia en exceso es de 10 minutos, se calcularon los hidrogramas unitarios de las cuencas en estudio. Dichos hidrogramas se presentan en la figura 3.24.

Tabla 3.4 Características fisiográficas de las cuencas

Cuenca	Area (km ²)	Cauce principal	
		Pendiente	Longitud (m)
Pie de la Cuesta 2	0.721	0.1530	1,950
Magallanes	4.075	0.1490	3,250
Deportivo 1	0.746	0.3420	800
Deportivo 2	1.244	0.1790	1,700
Costa Azul	7.089	0.0540	3,450
Coloso	2.264	0.0860	2,350
Base Naval	4.826	0.1220	2,400
Icacos 1	2.587	0.1570	2,800
Icacos 2	0.572	0.2470	1,150
Icacos 3	1.345	0.1680	2,100
Carabalán	17.523	0.0497	7550
Arroyo Seco	9.11905	0.0521	9250
El Quemado	12.7619	0.0252	7900
Cuesta 3	1.14286	0.2074	2400
Cuesta 4	1.45238	0.1644	2700
Cuesta 5	1.30952	0.1749	2550

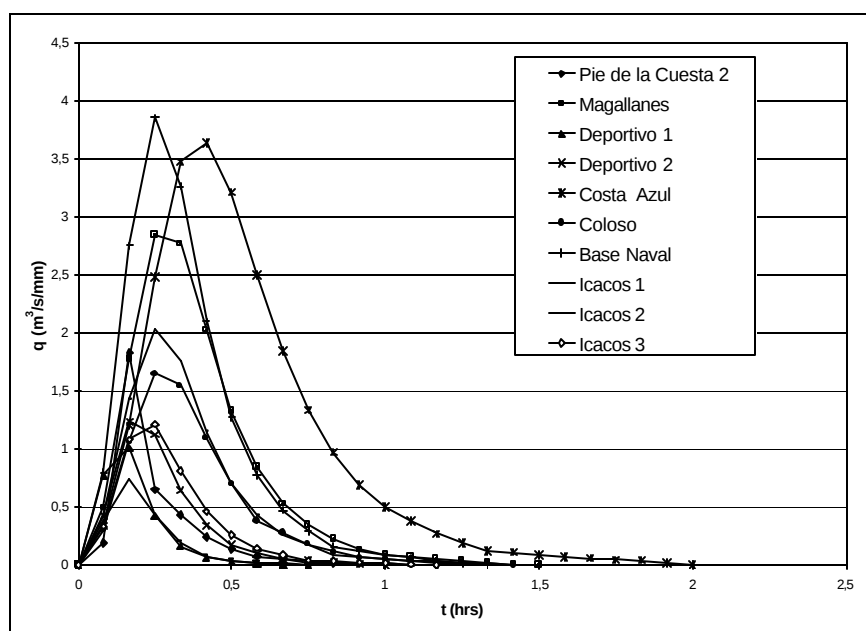


Figura 3.24 Hidrogramas Unitarios Instantáneos (Adimensionales)

3.2.1.6 Cálculo del escurrimiento directo

Para calcular los escurrimientos directos de las cuencas en estudio durante una tormenta es necesario determinar la precipitación media dentro de cada cuenca y obtener los hidrogramas unitarios de éstas.

La precipitación media dentro de cada una de las cuencas se obtiene considerando la información de cada una de las estaciones y su área de influencia.

El área de influencia de cada estación fue calculada con un método de Thiessen. Este método consiste en asignar áreas de influencia de las estaciones. El cociente del área de influencia entre el área total de la cuenca se denomina “factor de peso”. En este proyecto se determinaron varias tablas con valores de estos factores para prever que una o más estaciones no puedan transmitir las alturas de precipitación medidas. Con los factores de peso para cada estación y los datos de lluvia de éstas se forman los hietogramas de lluvias medias de cada cuenca.

Con la altura media de lluvia de cada cuenca, en cada intervalo de tiempo Δt , se obtiene el hidrograma del escurrimiento directo que produce; éste se agrega a los calculados en los lapsos de 10 minutos anteriores.

Como la información de la precipitación en las estaciones es actualizada cada diez minutos se puede analizar el comportamiento del escurrimiento directo en el tiempo considerado y en tiempos anteriores.

El subsistema considera que la altura media de precipitación puede calcularse con adecuada precisión aún en el caso que no se reciba en el puesto central la información de cuatro estaciones. En caso de que en los siguientes 3 periodos de 10 minutos sí llegue esta información se corregirían los valores calculados de escurrimiento.

Cuando fallen más de cuatro estaciones se realiza una estimación de la lluvia media menos exacta y no se dejan de estimar los flujos de agua.

3.3 Resultados

El Sistema de Alerta Hidrometeorológica de Acapulco entró en operación, en su primera fase, en Mayo de 1998. Con este sistema se han registrado lluvias importantes durante los años que ha estado funcionando.

Los pluviómetros se instalaron en lugares convenientes para medir la precipitación media en cada una de las 22 subcuencas. Después, mediante un modelo lluvia – escurrimiento se estiman los escurrimientos de cada subcuenca; previamente se calcula la precipitación media en la subcuenca a partir de las precipitaciones puntuales de las estaciones. De esta manera el programa de la computadora de *Hidráulica* registra diariamente ambas variables en un archivo. A continuación se muestran algunos ejemplos de lluvias registradas por el sistema y los escurrimientos asociados a ellas.

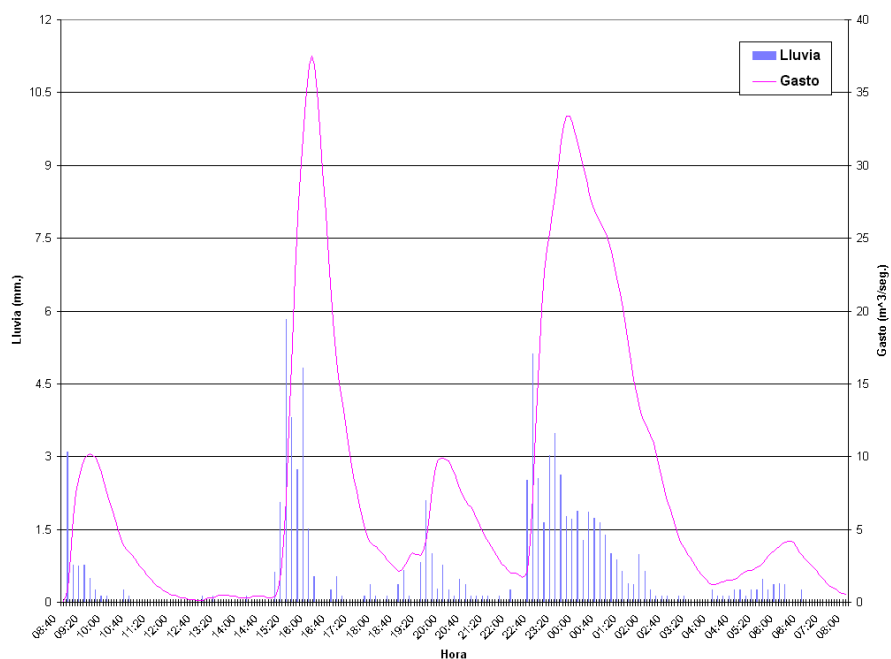


Figura 3.25 Lluvia registrada los días 5 y 6 de Septiembre de 1998 en la subcuenca del arroyo Aguas Blancas

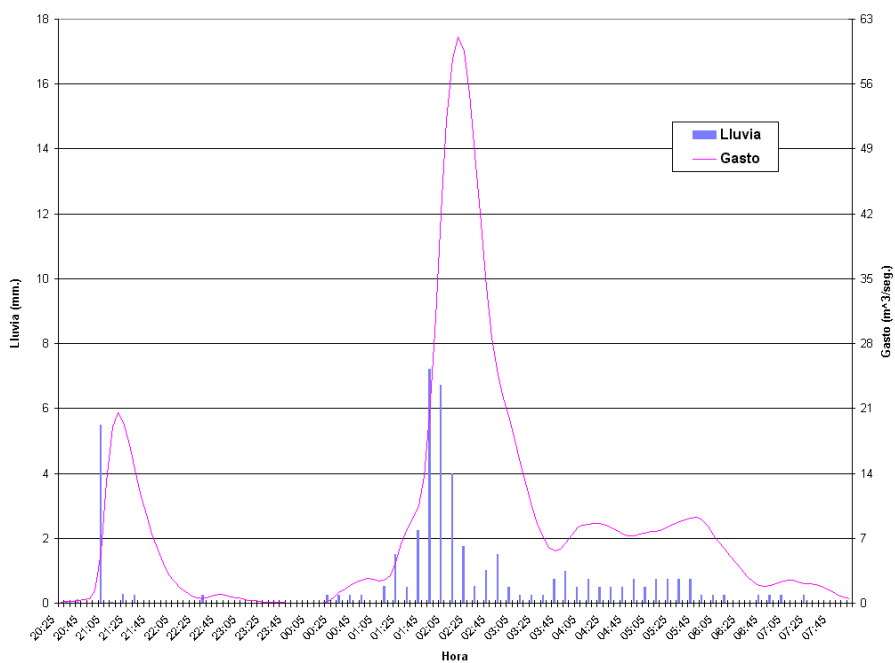


Figura 3.26 Lluvia registrada los días 1 y 2 de Julio de 1998 en la subcuenca del arroyo Palma Sola - Camarón (parte superior)

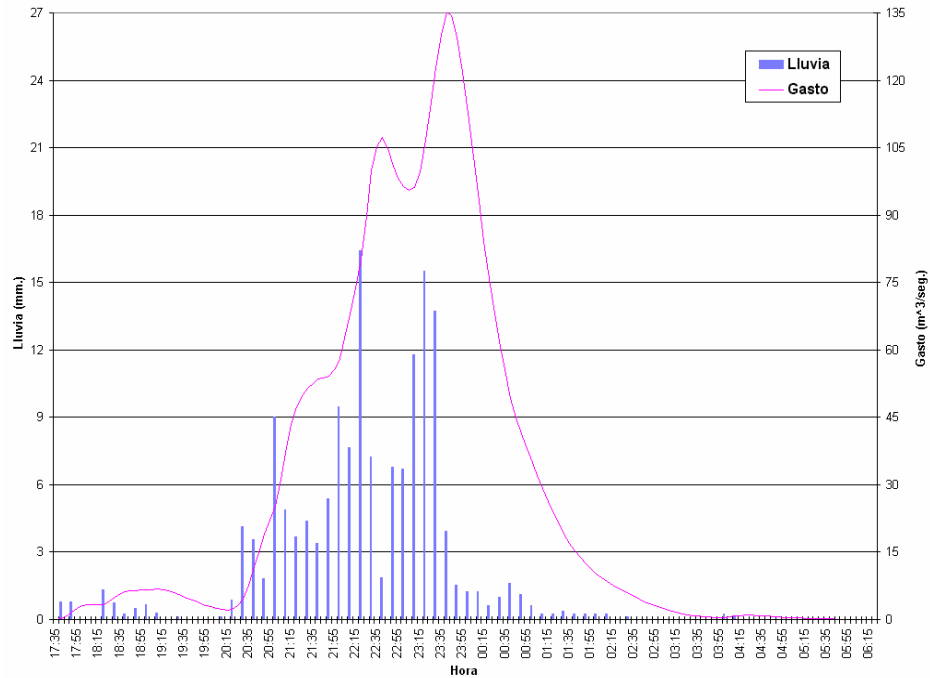


Figura 3.27 Lluvia registrada los días 9 y 10 de Julio de 1998 en la subcuenca del arroyo Aguas Blancas

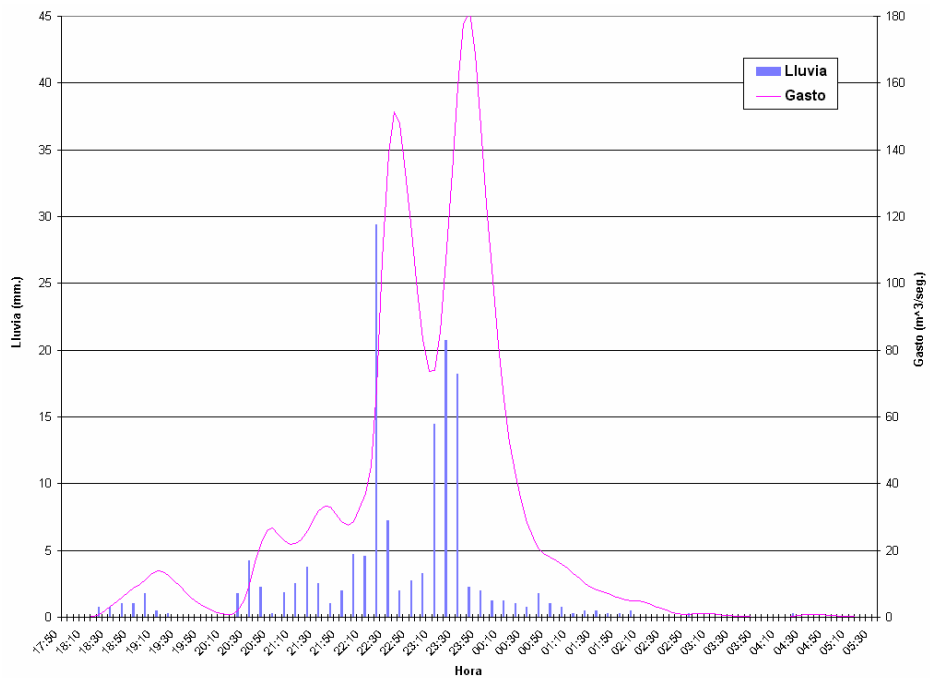


Figura 3.28 Lluvia registrada los días 9 y 10 de Julio de 1998 en la subcuenca del arroyo Palma Sola - Camarón (parte superior)

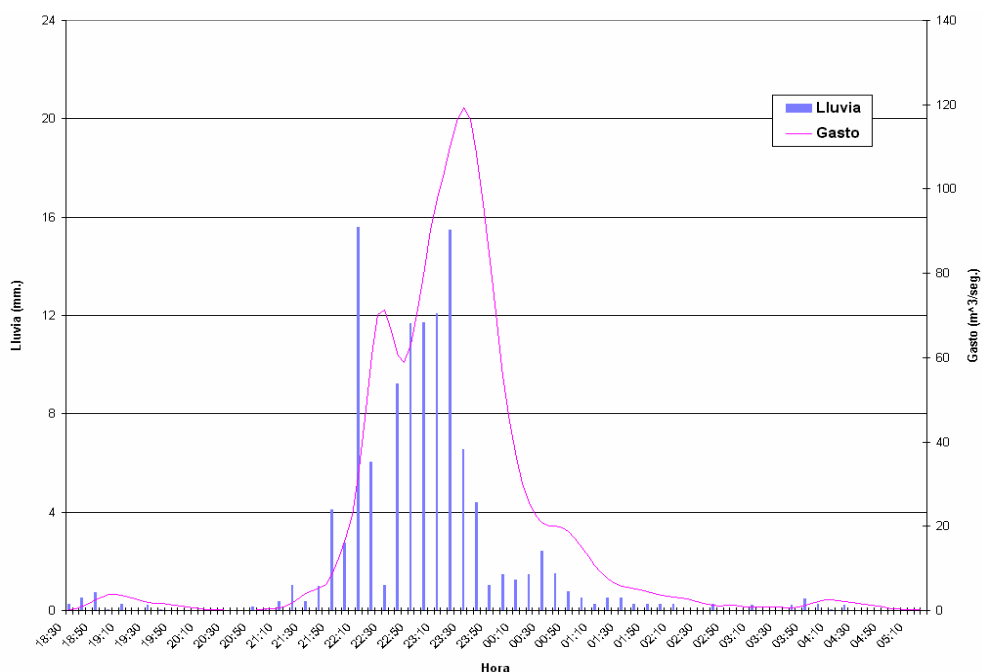


Figura 3.29 Lluvia registrada los días 9 y 10 de Julio de 1998 en la subcuenca del arroyo Costa Azul

Las tormentas de los días 9 y 10 de Julio de 1998 activaron las alarmas del sistema, con lo que se iniciaron los operativos tanto de Protección Civil como de la CNA de Guerrero, para prevenir cualquier contingencia que se derivara de las fuertes precipitaciones registradas (figura 3.30).

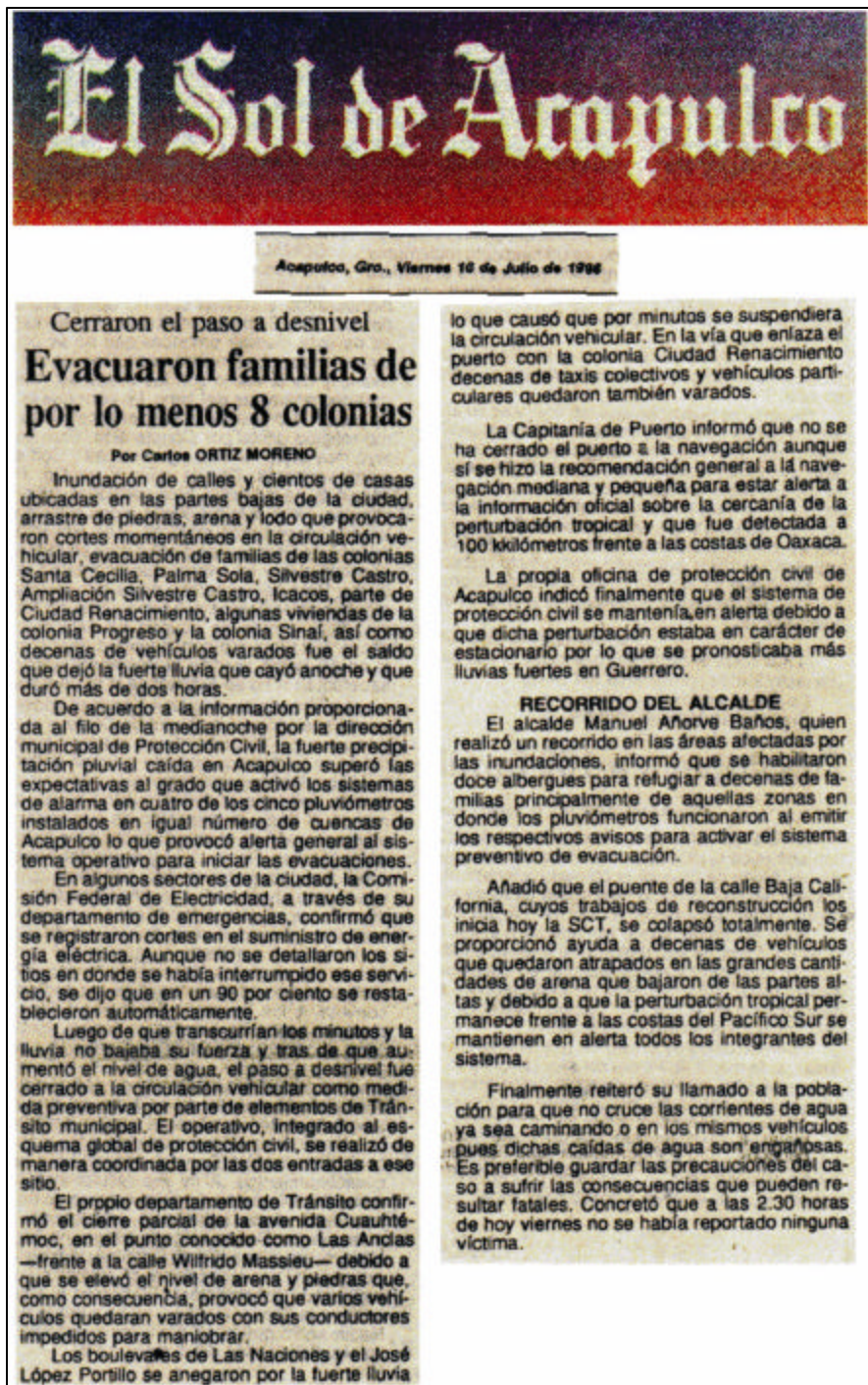


Figura 3.30 Información periodística de las tormentas del 9 y 10 de julio de 1998

IV SISTEMA DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA DE TIJUANA

4.1 Instrumentación

El Sistema de Alerta de Tijuana, Baja California, se compone de 10 estaciones remotas y dos puestos centrales de registro (figura 4.1). Las estaciones están distribuidas por toda la ciudad y monitorean las cuencas de los arroyos principales. Los dos puestos de registro se localizan, uno en las instalaciones de la Dirección Estatal de Protección Civil del Gobierno del Estado de Baja California y, el otro, en la Unidad Municipal de Protección Civil de Tijuana, en el centro de esta ciudad. En la tabla 4.1 se muestran los nombres y la ubicación de cada estación.

Las 10 estaciones hasta ahora instaladas en Tijuana son exclusivamente para medición de precipitación e intensidad de lluvia. La mayoría de ellas se instalaron sobre tanques de almacenamiento de agua y fue necesario construir una caseta de concreto para proteger los equipos de registro electrónico y comunicaciones. En algunas estaciones se aprovechó la existencia de la caseta del personal encargado del tanque para colocar dicho equipo.

Para este sistema fue necesario emplear una repetidora en la estación No. 3, El Lago (LA-03), para enlazar la estación 10 (PM-10) y el PCR-2, las cuales se encuentran en las instalaciones de la Unidad Municipal de Protección Civil de Tijuana. La estación LA-03 está acondicionada para operar tanto como estación de medición como de repetición.

En marzo de 2000 la Dirección Estatal de Protección Civil de Baja California cambió sus instalaciones ubicadas cerca del aeropuerto internacional de Tijuana a otro edificio ubicado en el centro de la ciudad. Debido a lo anterior el PCR-1 tuvo que reinstalarse en este sitio y, por tanto, la configuración original de la red de comunicaciones tuvo que ser modificada para adaptarla a estas condiciones (figura 4.2) antes del inicio de la temporada de lluvias 2000-2001. Bajo este nuevo esquema, la mayoría de las antenas de las estaciones fueron reorientadas hacia la Dirección Estatal de Protección Civil para establecer los enlaces de comunicación. El repetidor que se encuentra en la estación El Lago continúa funcionando para la estación PM-10 y el PCR-2, agregándose una estación más, La Presa (PR-05), la cual no tiene línea de vista hacia el nuevo punto donde se localiza el PCR-1.

En las figuras 4.3 a 4.19 se presentan varias fotografías que muestran detalles de las instalaciones de los equipos.

En las figuras 4.20 a 4.24 se muestran fotografías de las instalaciones del Puesto Central de Registro PCR-1 en las oficinas de la Dirección Estatal de Protección Civil de Baja California, tanto en las nuevas como en las anteriores.

En la figura 4.25 se puede ver el equipo de cómputo y comunicaciones en el PCR-2 que está en la Unidad Municipal de Protección Civil. Cabe mencionar que el equipo electrónico de registro de lluvia de la estación PM-10 se encuentra en el mismo gabinete de comunicaciones del PCR-2.

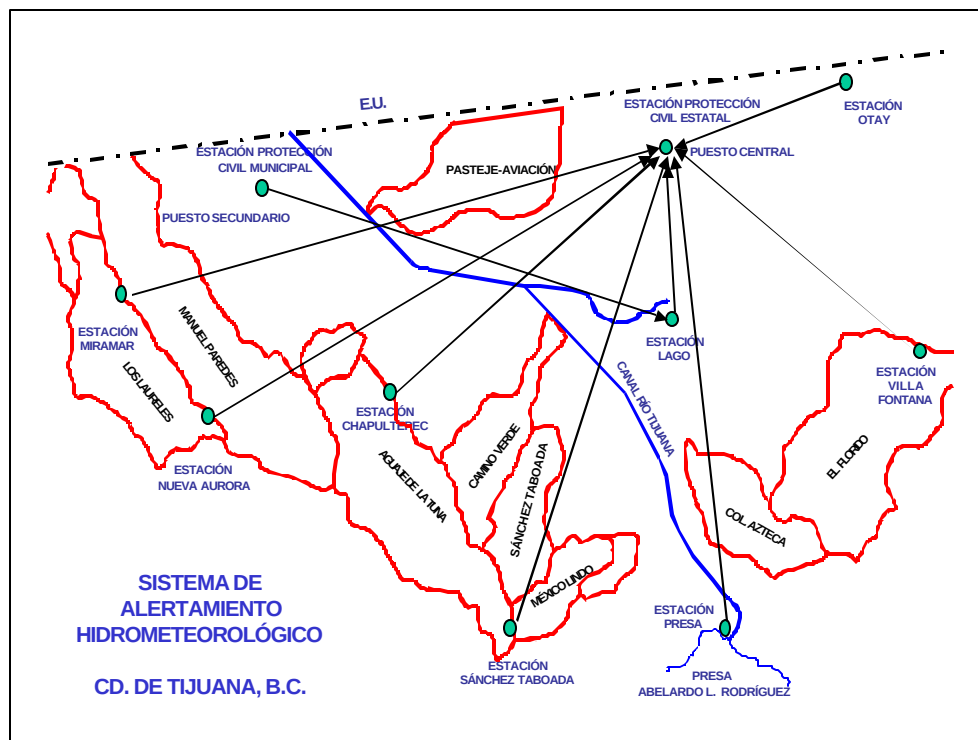


Figura 4.1 Configuración original de la red de comunicaciones

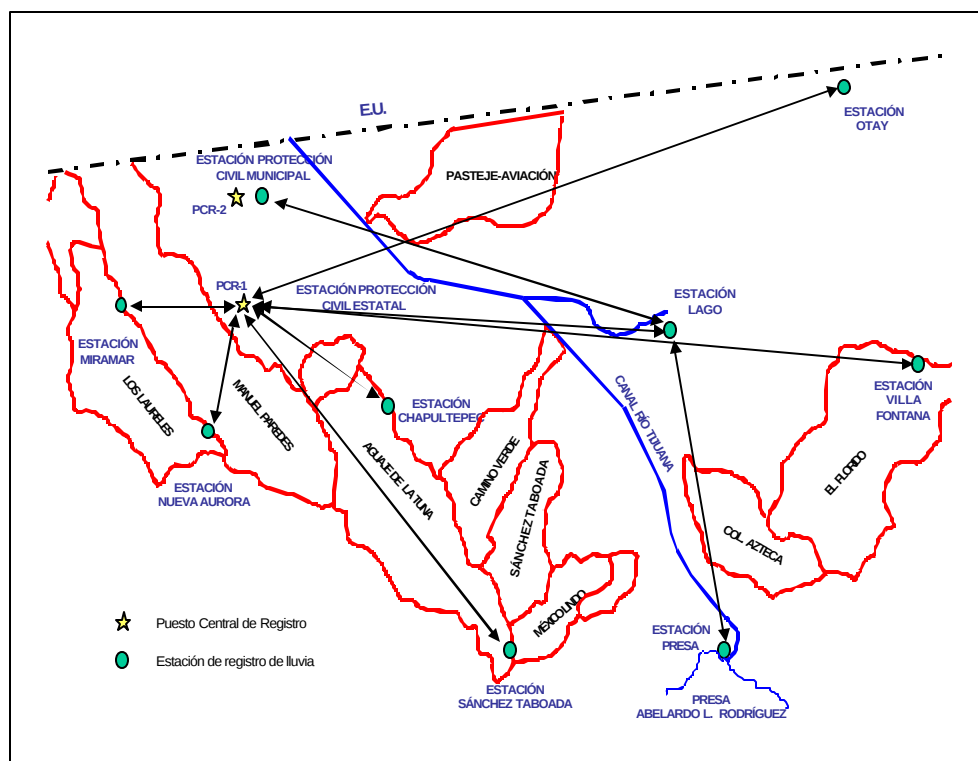


Figura 4.2 Configuración actual de la red de comunicaciones

Tabla 4.1 Estaciones del sistema de alerta hidrometeorológica de Tijuana, Baja California

No.	Nombre de la Estación	Código de la Estación	Latitud norte	Longitud oeste	Observaciones
1	Protección Civil Estatal	PC-01	32°32.446'	116°56.762'	La estación está conectada directamente al sistema del puesto central.
2	Otay	OT-02	32°33.161'	116°53.353'	Es un tanque de agua, ubicado en la Col. Nido de águilas. Cuenta con seguridad.
3	Lago	LA-03	32°30.226'	116°55.888'	Es un tanque de agua de forma cilíndrica, ubicado en la Col. Lago.
4	Villa Fontana	VF-04	32°30.300'	116°51.206'	Es tanque de agua donde hay poca protección, aunque está rodeado de casas.
5	Presa	PR-05	32°32.446'	116°56.762'	Son instalaciones de vigilancia de la presa Abelardo L. Rodríguez.
6	Sánchez Taboada	ST-06	32°27.213'	116°58.427'	Es un tanque de agua donde hay una antena, pero carece de protección.
7	Chapultepec	CH-07	32°29.787'	117°00.603'	Es un tanque de agua de forma cilíndrica, ubicado en la Col. Chapultepec.
8	Nueva Aurora	NA-08	32°29.120'	117°02.996'	Es un tanque de agua, ubicado en la Col. Nueva Aurora. Cuenta con seguridad.
9	Miramar	MI-09	32°30.595'	117°04.713'	Es un tanque para agua, ubicado en la Col. Miramar. Cuenta con seguridad.
10	Protección Civil Municipal	PM-10	32°31.912'	117°01.150'	Son las instalaciones de Protección Civil Municipal, en la zona centro de Tijuana.



Figura 4.3 Caseta construida sobre tanque de almacenamiento de agua. Estación 3 “El Lago”, LA-03



Figura 4.4 Caseta, panel solar, pluviómetro y antena. Estación El Lago, LA-03



Figura 4.5 Detalle de la estación El Lago, LA-03



Figura 4.6 Estación Villafontana, VF-04



Figura 4.7 Caseta de vigilancia en la que se instaló la estación La Presa, PR-05



Figura 4.8 Pluviómetro y celda solar, estación La Presa



Figura 4.9 Vista interior del gabinete con los módulos de control y comunicación. Estación La Presa



Figura 4.10 Detalle del interior del gabinete con los módulos de control y comunicación



Figura 4.11 Caseta de control de bombeo, tanque de almacenamiento de agua, celda solar y antena. Estación Sánchez Taboada ST-06



Figura 4.12 Celda solar



Figura 4.13 Pluviómetro y celda solar. Estación Sánchez Taboada



Figura 4.14 Gabinete con el equipo de registro y comunicaciones dentro de la caseta de control de bombeo. Estación Sánchez Taboada



Figura 4.15 Vista panorámica de la estación Chapultepec CH-07

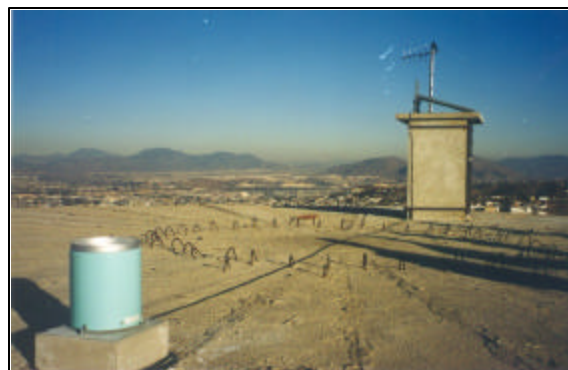


Figura 4.16 Caseta, celda solar, antena y pluviómetro. Estación Chapultepec

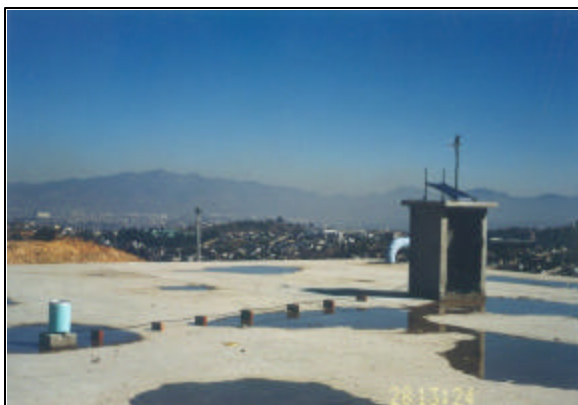


Figura 4.17 Estación Nueva Aurora NA-08



Figura 4.18 Tanque de agua donde está la estación Miramar MA-09



Figura 4.19 Vista interior de la caseta donde se encuentra el gabinete con el equipo de medición y comunicaciones. Estación Miramar



Figura 4.20 Puesto Central de Registro PCR-1 en las anteriores instalaciones de la Dirección Estatal de Protección Civil



Figura 4.21 Vista interior del gabinete con los módulos de control y comunicación en el Puesto Central de Registro PCR-1



Figura 4.22 Nuevas instalaciones de la Dirección Estatal de Protección Civil



Figura 4.23 Puesto Central de Registro PCR-1 en las nuevas instalaciones de la Dirección Estatal de Protección Civil



Figura 4.24 Pluviómetro de la estación Protección Civil Estatal PC-01



Figura 4.25 Vista del puesto central de registro PCR-2 en la Unidad Municipal de Protección Civil de Tijuana

4.2. Medición y procesamiento hidrológico

El sistema de alerta hidrometeorológica temprana municipal cuenta con un componente hidrológico basado en la medición en tiempo real de la precipitación y niveles de agua de las corrientes. Además, esta parte del sistema determina el tipo de aviso (preventivo, prealarma o alarma) para que, en caso de ser necesario, se advierta a la población del peligro a que quedará expuesta en los minutos u horas posteriores al tiempo actual. En ese momento se dispone de la información enviada desde las estaciones pluviométricas.

Con base en la medición de la precipitación acumulada en lapsos de 10 minutos en distintas partes de las subcuencas con mayor riesgo de la ciudad de Tijuana, se calculan las precipitaciones medias y los flujos de agua que genera la lluvia. También se consideran las corrientes superficiales sobre las laderas de seis colonias que han presentado mayores daños por arrastre de sedimentos o deslizamiento de masas de suelo.

La determinación de los escurrimientos se apoya en un estudio hidrológico que se realizó para las subcuencas de la ciudad de Tijuana. Toma en cuenta una estimación de los coeficientes de escurrimientos (que cambian de acuerdo con la humedad del suelo) en los resultados de la aplicación de los hidrogramas unitarios instantáneos de cuencas en estudio.

4.2.1 Sitios para medir lluvia y niveles de agua en ríos

Se identificaron los sitios en los que podría haber mayores daños debido al desbordamiento de algunos arroyos para vigilar los gastos que alcanzan a presentar a la salida de sus correspondientes subcuencas.

En el estudio hidrológico se emplearon planos de la zona a escala 1:50,000 y se precisaron algunos aspectos en campo a partir de algunos recorridos llevados a cabo por parte del personal de Cenapred de las cuencas de los arroyos de interés y de las lomas con laderas que se han afectado con las lluvias de los últimos cinco años.

Se delimitaron las diferentes subcuencas y colonias con mayor riesgo contra corrientes de agua superficial, para establecer la manera en que se obtendría la precipitación media en cada una de ellas.

En una carta topográfica de la ciudad de Tijuana se identificaron 9 subcuencas. (figura 4.25), de las cuales tres de ellas se dividieron en cuenca alta y cuenca total.

En la tabla 4.2 se consignan los nombres de las cuencas y algunas de sus características fisiográficas.

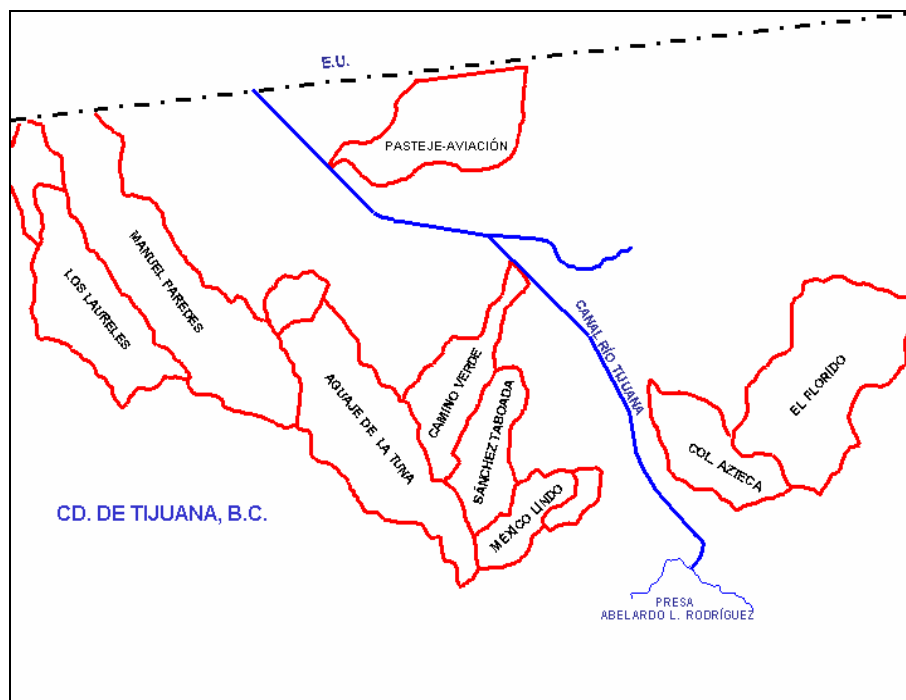


Figura 4.25 Cuencas de la ciudad de Tijuana consideradas en el sistema de alerta

Tabla 4.2 Características de las cuencas con mayor riesgo de sufrir daños

No.	Cuenca	Área (km ²)	Cauce principal	
			Pendiente	Longitud (m)
1	Laureles – Total	6.068	0.033276	6,030.00
2	Laureles – Superior	2.400	0.036273	3,970.00
3	Aguaje de La Tuna – Total	14.035	0.041447	9,120.00
4	Aguaje de La Tuna – Superior	12.625	0.045000	8,220.00
5	Sanchez Taboada	4.794	0.048685	3,710.00
6	México Lindo – Total	3.985	0.049844	4,555.00
7	México Lindo – Superior	3.007	0.062937	3,255.00
8	El Florido	14.737	0.017255	8,110.00
9	Manuel Paredes	15.547	0.025752	10,300.00
10	Camino Verde	4.268	0.051501	3,410.00
11	Pasteje – Aviación	7.665	0.022427	4,440
12	Col. Azteca	-	-	-

Cabe mencionar que las subcuencas 9, 10, 11 y 12, que se presentan en la tabla 4.2, fueron seleccionadas debido a que dentro de ellas se encuentran las colonias donde se han presentado daños y que a futuro pueden presentar mayores afectaciones ya sea por un deslizamiento o por el arrastre superficial de sedimentos. Las colonias mencionadas son:

- Manuel Paredes
- Nueva Aurora Sur
- Ignacio Ramírez
- Pasteje (Lomas Taurinas)
- Camino Verde
- México Lindo (Amparo Sánchez)

4.2.1.1 Selección de los sitios para medir lluvia

Se determinó que para los cálculos de los flujos en el sistema de corrientes de las subcuencas de Tijuana eran suficientes las lecturas de 10 pluviómetros ubicados en distintos sitios para realizar la estimación de la lluvia media.

Los 10 pluviómetros no están localizados en sitios muy alejados entre sí para lograr cierta redundancia en algunas áreas, para que en caso de no recibir la información de alguno de ellos se haga una estimación de la precipitación media con las mediciones de aquellos instrumentos de los que sí se recibió información en el puesto central. Cabe mencionar que en Tijuana, Baja California, se pueden presentar fenómenos meteorológicos que podrían provocar la no recepción de los datos de alturas de lluvia, de alguno o varios de los 144 lapsos de 10 minutos que tiene un día.

La selección de los sitios para la instalación de los pluviómetros se realizó procurando tener una configuración uniforme, es decir, que cada uno de los instrumentos de medición de lluvia tuviera un área de cobertura parecida. Se fijaron sus coordenadas y se procedió a revisar su ubicación durante una visita en el campo.

Se tomó en cuenta que entre los sitios donde se ubicarían las estaciones de medición de lluvia y el puesto de recepción de la información no existieran obstáculos para asegurar una buena comunicación vía radio y que hubiese alguna protección contra daños por vandalismo. Se trató de instalarlos en edificios públicos, como son escuelas o instalaciones relacionadas con la Comisión Nacional del Agua, lo más cercano posible a los las coordenadas originalmente propuestas.

En la figura 4.26 se muestra la ubicación de los diez pluviómetros de la red de medición y los sitios donde se encuentran.

En la tabla 4.1 se consigna la ubicación de los sitios donde se instalaron las estaciones de medición de lluvia, su nombre y el código de identificación

En marzo de 2000 la Dirección Estatal de Protección Civil de Baja California cambió su domicilio, por lo que el puesto central de registro (junto con la estación No.1 PC-01) tuvo que ser reinstalado en noviembre de 2000. El nuevo domicilio tiene las coordenadas $32^{\circ}30.574' N$ y $117^{\circ}03.225' W$.

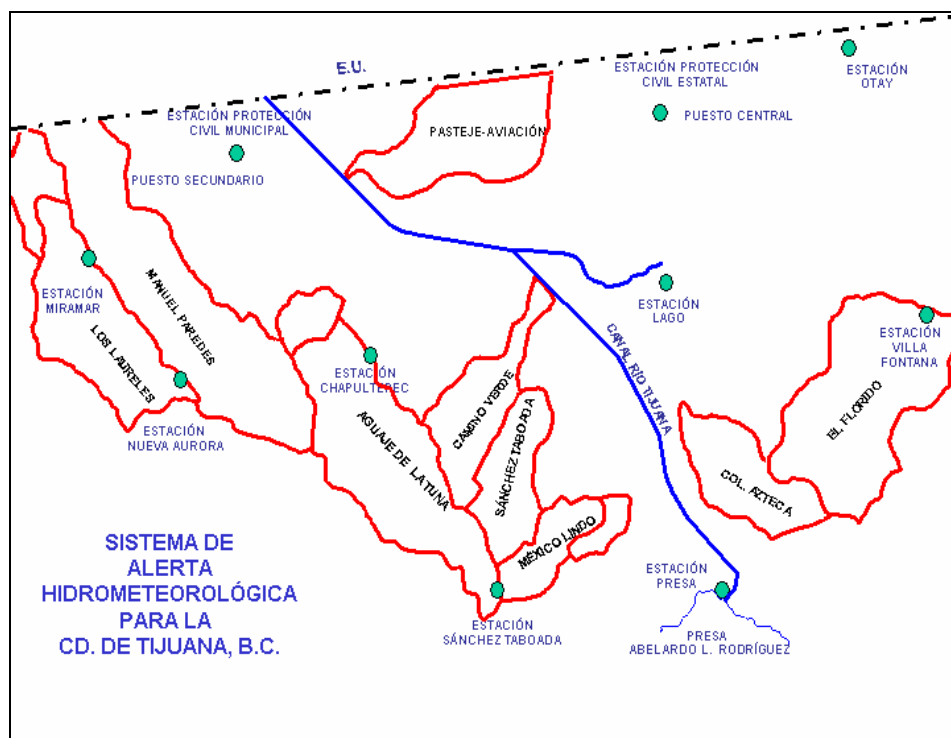


Figura 4.26 Ubicación de pluviómetros

4.2.1.2 Selección de los sitios para medir niveles temporalmente

En la aplicación de los modelos matemáticos lluvia - escurrimiento se consideró un valor del coeficiente de escurrimiento. Este valor es modificado de acuerdo con las condiciones de humedad del suelo y la lluvia que se esté presentando. Sin embargo, para precisar su valor es conveniente medir el gasto en algunos sitios y asociarlo con la lluvia que se presentó. También las mediciones son útiles para revisar algunos de los hidrogramas unitarios instantáneos. Estas maniobras implican la medición de niveles de agua durante y después de cada lluvia y a partir de ello estimar los gasto de los escurrimientos que provocó.

En el cauce del arroyo "Aguaje de la Tuna" se escogieron dos sitios para medir los tirantes del agua, el primero en el canal de llamada del tanque desarenador #1 "Hielera Barrón" (figura 4.27), donde se aprovechará la sección de control que forma la caída libre que hay entre el canal y el tanque para evaluar la magnitud de sus corrientes de agua. El segundo sitio se ubica en el canal de llamada del tanque desarenador #3 (figura 4.28), también en este sitio se aprovecha una sección de control. Por tal motivo la cuenca de este arroyo es analizada en su totalidad (No. 3) y en su parte alta (No. 4), como se muestra en la tabla 4.2.

En el arroyo "Sánchez Taboada", se escogió una sección que se ubica a la entrada del único tanque desarenador en esta corriente (figura 4.29), ésta también es una sección de control, debido al cambio de pendiente en la plantilla del cauce.

Otro de los arroyos importante es el arroyo "El Florido", en el cual se escogió una sección que se ubica en el canal de llamada del tanque desarenador de esta corriente (figura 4.30). Al igual que las anteriores secciones, ésta también es una sección de control, puesto que es una caída, del canal al tanque desarenador.



Figura 4.27 Canal de llamada del desarenador #1 en el cauce del arroyo "Aguaje de la Tuna"



Figura 4.28 Canal de llamada del desarenador #1 en el cauce del arroyo "Aguaje de la Tuna"



Figura 4.29 Entrada al canal desarenador del arroyo "Sánchez Taboada"



Figura 4.30 Canal de llamada del desarenador en el cauce del arroyo "El Florido"

En los sitios antes descritos se instalará temporalmente una escala que será vigilada durante las lluvias que lleguen a ocurrir en la ciudad; la persona encargada llevará una bitácora en la cual indicará el día, la hora y la lectura de la escala. Con los datos anteriores se estimarán los gastos que pasen por la sección y se compararán con los gastos estimados por el procesamiento hidrológico del sistema. Mediante dicha comparación se podrá calibrar el modelo lluvia - escurrimiento.

4.2.1.3 Determinación de los escurrimientos en las cuencas

Los flujos de agua que provoca la precipitación se estiman con un modelo lluvia -escurrimiento basado en hidrogramas unitarios instantáneos.

Para el caso particular de Tijuana, Baja California, no se contó con datos de lluvia y los escurrimientos que genera, por lo que se obtuvieron hidrogramas unitarios geomorfológicos o hidrogramas unitarios sintéticos. Con ellos y la lluvia medida en las estaciones pluviométricas remotas se encuentra el escurrimiento que se producirá cierto tiempo después en los cauces de los arroyos, para poder comparar sus magnitudes con respecto a los valores (umbrales de gasto) que pueden producir desbordamientos de los arroyos.

4.2.1.4 Aplicación del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico

Para definir el orden de las redes de drenaje de las cuencas en estudio de acuerdo con Horton-Strahler y aplicar las leyes de Horton (Eslava, Fuentes, 2002) para obtener sus parámetros geomorfológicos, se utilizaron planos a escala 1:100,000. En estos planos se identificó y se trazó el parteaguas de las cuencas, así como todas las corrientes apreciables. Posteriormente se determinaron la longitud y el área tributaria de todas ellas.

En la tabla 4.3 se muestran los valores de los parámetros empleados en el cálculo de los hidrogramas unitarios geomorfológicos.

Cabe mencionar que para obtener el hidrograma de la cuenca superior del arroyo "Los Laureles" se dividió ésta en dos subcuencas y se sumaron los hidrogramas unitarios de estas subcuencas.

Tabla 4.3 Parámetros para el cálculo de los hidrogramas unitarios geomorfológicos

Cuenca	Orden	R_B	R_L	R_A
Los Laureles (superior)	3	4.47	2.71	5.82
Subcuenca 1	4	3.60	2.26	4.70
Subcuenca 2	4	4.20	2.52	5.43
Los Laureles (total)	4	4.07	1.87	4.99
Aguaje de la Tuna (superior)	4	4.27	2.07	5.19
Aguaje de la Tuna (total)	3	4.12	1.89	5.20
Sánchez Taboada				

Con los parámetros anteriores se obtuvieron los hidrogramas unitarios para cada cuenca para una duración de la lluvia en exceso de 5 minutos. Dichos hidrogramas se presentan en la figura 4.31.

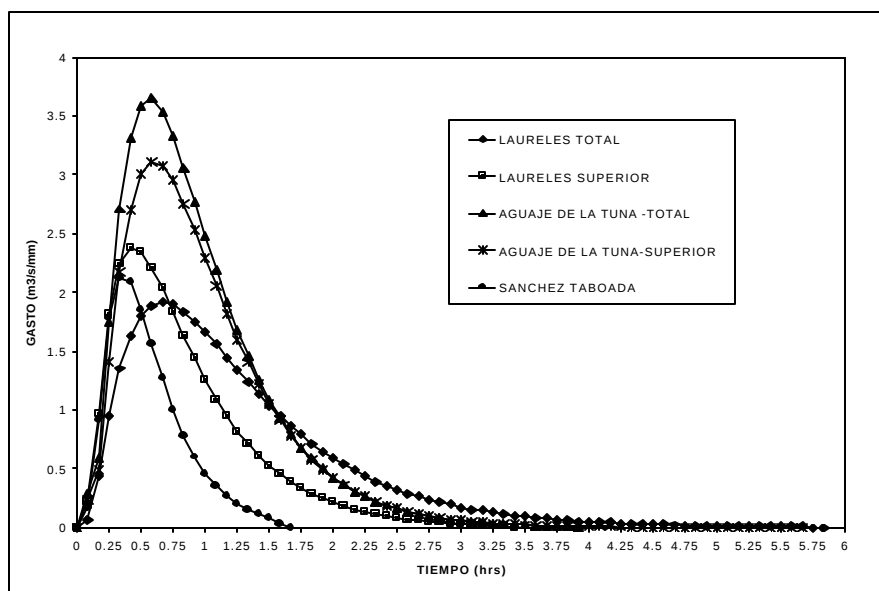


Figura 4.31 Hidrogramas Unitarios Instantáneos Geomorfológicos

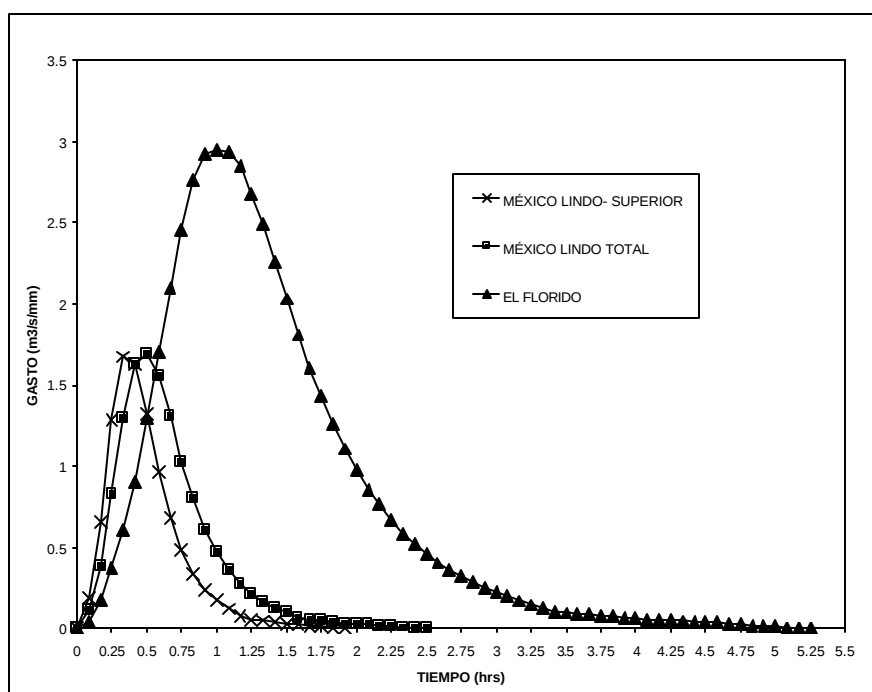
4.2.1.5 Aplicación del hidrograma unitario adimensional

Para definir los hidrogramas unitarios adimensionales fue necesario obtener algunas de las características fisiográficas de las cuencas en estudio. Por lo que en un plano a escala 1:100,000 se identificó y se trazó el parteaguas de las cuencas y se obtuvieron las características fisiográficas que se muestran en la tabla 4.4.

Con las características de las cuencas y la duración de la lluvia en exceso de 5 minutos, se calcularon los hidrogramas unitarios de algunas cuencas donde no era aplicable el hidrograma unitario geomorfológico; tales hidrogramas se muestran en la figura 4.32.

Tabla 4.4 Características fisiográficas de las cuencas

Cuenca	Área (km ²)	Cauce principal	
		Pendiente	Longitud (m)
México Lindo - Total	3.985	0.049844	4,555.00
México Lindo - Superior	3.007	0.062937	3,255.00
El Florido	14.737	0.017255	8,110.00



**Figura 4.32 Hidrogramas Unitarios Instantáneos
(basados en el hidrograma adimensional)**

4.2.1.6 Cálculo del escurrimiento

Para calcular el escurrimiento que produce la lluvia en cada una de las cuencas en estudio a partir de los datos de una tormenta, es necesario determinar su precipitación media.

La precipitación media se obtiene a partir de las láminas de lluvia acumulada en 10 minutos de aquellas estaciones cercanas o dentro de la cuenca. Para ello se aplicó el método de Thiessen. Este procedimiento consiste en obtener un promedio ponderado de las alturas de precipitación media, donde cada “factor de peso” es igual al cociente entre el área dominada (con base en cercanía de un punto la cuenca a

cada uno de los pluviómetros) por la estación pluviométrica y el área total de la cuenca. En este sistema de alerta se determinaron varias tablas con valores de estos factores para considerar que la información de una o más estaciones pluviométricas no sean recibidas en el puesto central.

Con los factores de peso para cada estación y los datos de lluvia de éstas se forman los hietogramas de lluvias medias de cada cuenca.

Con la altura media de cada cuenca se obtiene el hidrograma del escurrimiento que produce y se agregan los gastos calculados en los lapsos de 10 minutos anteriores.

Como la información de la precipitación en las estación es enviada a cada diez minutos se pueden calcular los escurrimientos en el tiempo actual y en los tiempos posteriores que considera su hidrograma unitario instantáneo.

Este subsistema considera que la altura media de precipitación puede obtenerse con adecuada precisión aún en el caso que no se reciba en el puesto central la información de cuatro estaciones. En caso de que en cualquiera de los siguientes 3 intervalos de tiempo de 10 minutos sí se reciba la información, se corregirían los valores calculados de escurrimiento.

Cuando fallen simultáneamente más de cuatro estaciones se realiza una estimación de la lluvia media menos exacta, pero no se suspende el cálculo de los flujos de agua.

4.3 Resultados

El Sistema de Alerta Hidrometeorológica entró en operación, en su primera fase, en febrero de 1999. Con este sistema se han registrado lluvias importantes en durante los dos años y medio que ha estado funcionando.

Los pluviómetros se instalaron en lugares convenientes para medir la precipitación media en cada una de las 12 subcuencas. Después, mediante un modelo lluvia – escurrimiento se estiman los escurrimientos de cada subcuenca; previamente se calcula la precipitación media en la subcuenca a partir de las precipitaciones puntuales de las estaciones. De esta manera el programa de la computadora de Hidráulica registra diariamente ambas variables en un archivo. A continuación se muestran algunos ejemplos de lluvias registradas por el sistema y los escurrimientos asociados a ellas.

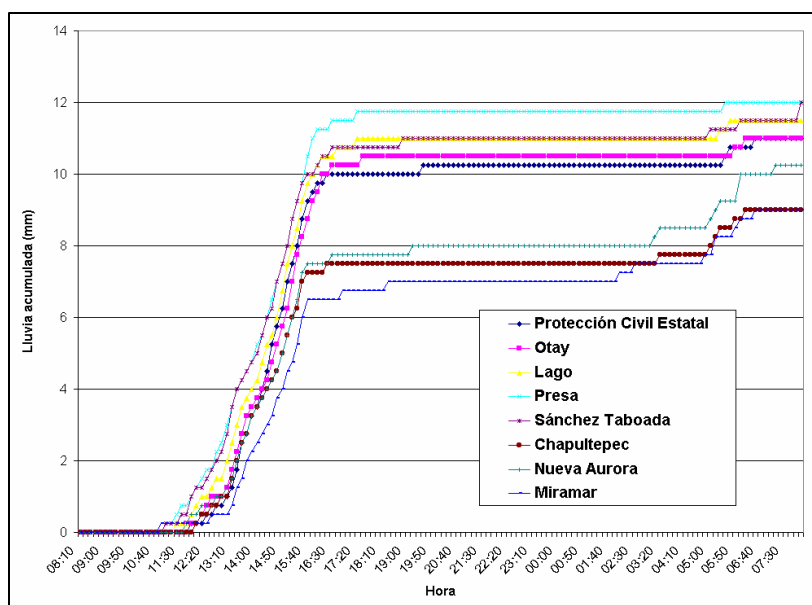


Figura 4.33 Lluvia registrada los días 4 y 5 de febrero de 1999

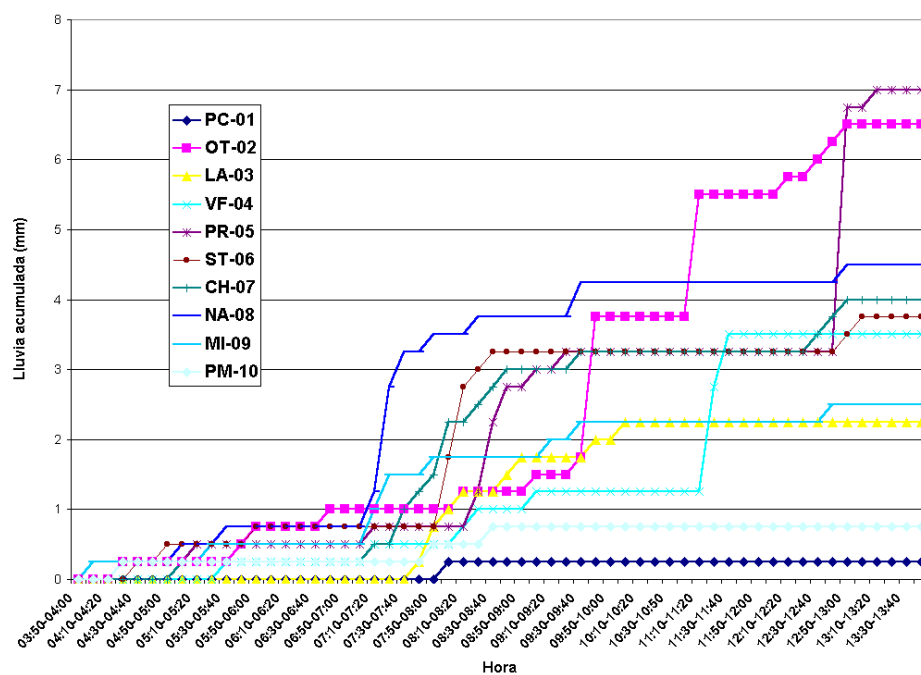


Figura 4.34 Lluvia registrada el día 10 de diciembre de 1999

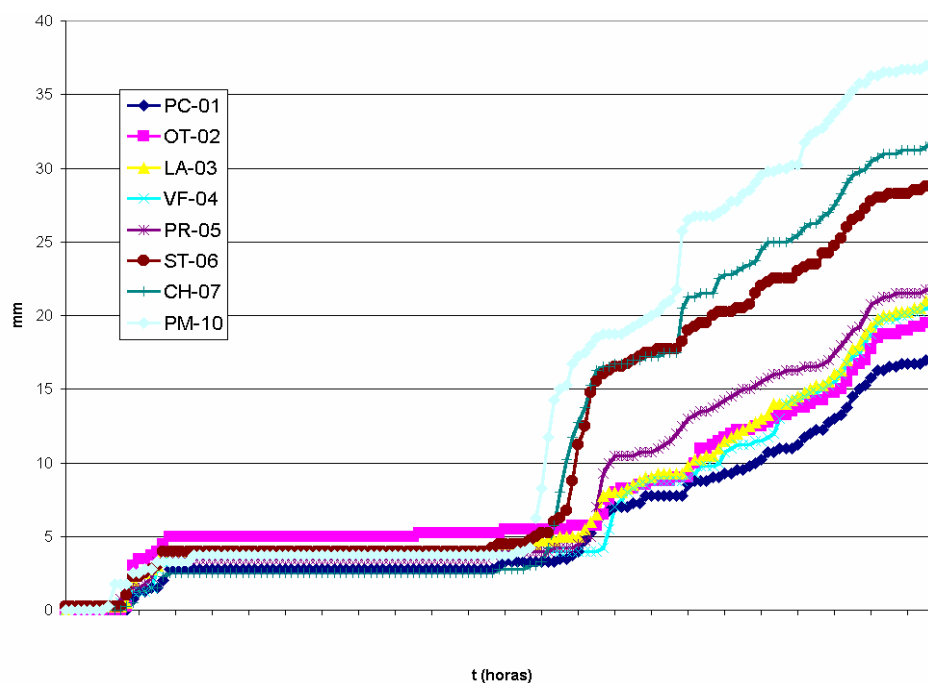


Figura 4.35 Lluvia registrada el día 21 de febrero del 2000

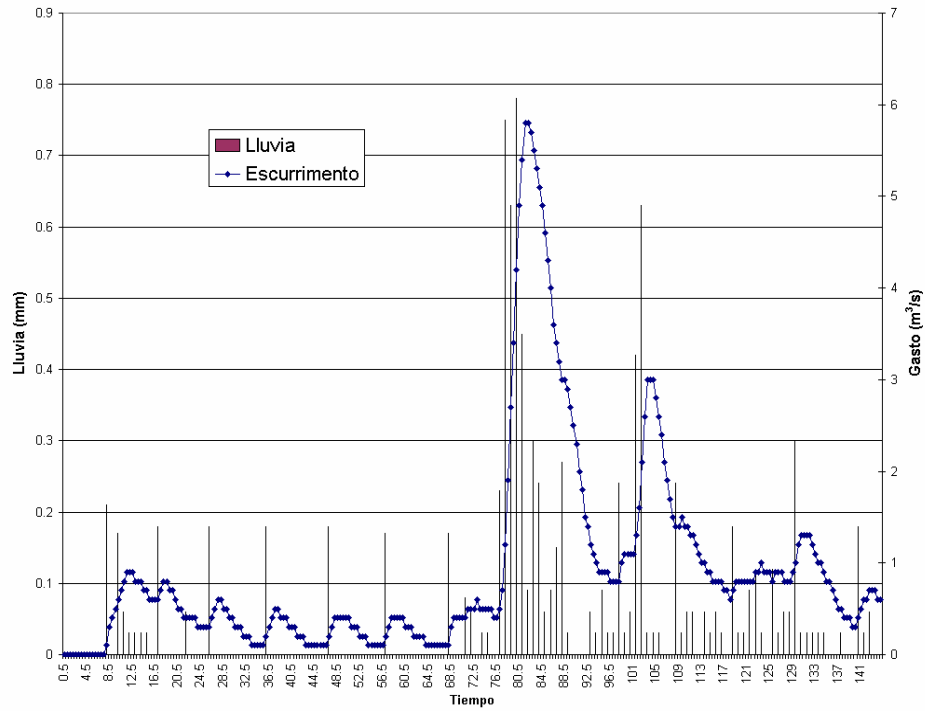


Figura 4.36 Lluvia y escurrimiento registrados el día 21 de febrero del 2000 en la subcuenca Los Laureles (parte superior)

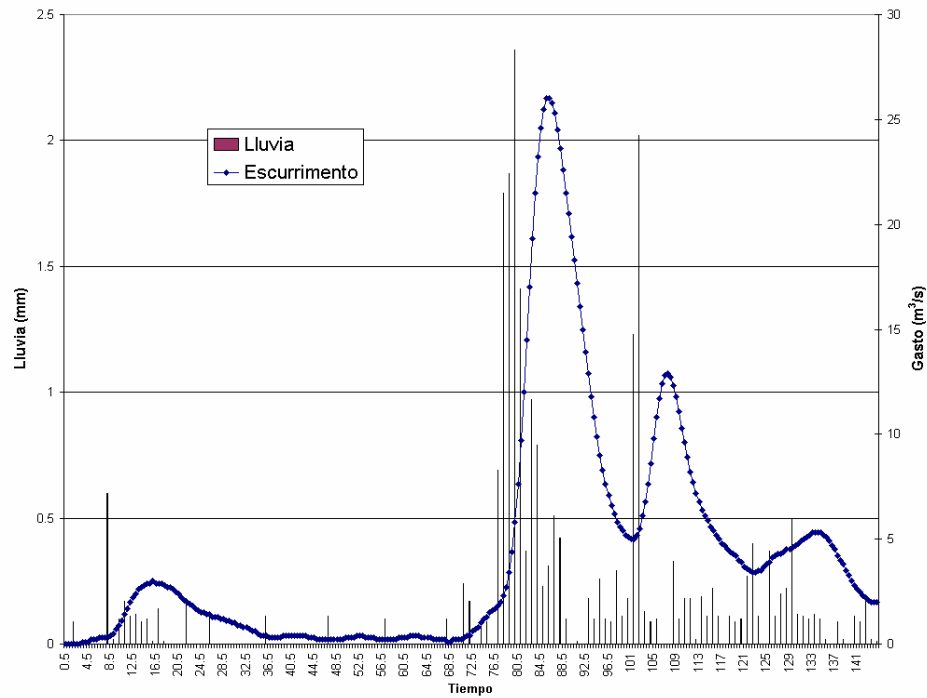


Figura 4.37 Lluvia y escurrimiento registrados el día 21 de febrero del 2000 en la subcuenca Manuel Paredes

V SISTEMA DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA DE MOTOZINTLA

5.1 Instrumentación

El Sistema de Alerta de Motozintla, Chiapas, se compone de 5 estaciones pluviométricas remotas y dos puestos centrales de registro (figura 5.1). Las estaciones están distribuidas para cubrir las cuencas del río Xelajú y de los arroyos Mina y Allende. Los dos puestos de registro se localizan, uno en la oficina de la tesorería en el Palacio Municipal, y el otro en el Observatorio Meteorológico de la CNA en Tapachula, Chiapas. En la tabla 5.1 se muestran los nombres y la ubicación de cada estación. Las 5 estaciones hasta ahora instaladas en Motozintla son exclusivamente para medición de precipitación e intensidad de lluvia.

Sólo se construyeron dos casetas de concreto para el resguardo del equipo de medición y comunicaciones de dos estaciones, ya que las otras tres se instalaron en dos escuelas y en el Palacio Municipal.

Para este sistema fue necesario emplear una sola repetidora en el cerro Mozotal, el punto más alto de la región, con objeto de establecer el enlace de comunicación entre los puestos de registro PCR-1 y PCR-2 en Motozintla y Tapachula, respectivamente. La caseta que aloja esta estación repetidora fue construida exclusivamente para este fin.

En las figuras 5.2 a 5.9 se presentan varias fotografías que muestran detalles de las instalaciones de los equipos.

En las figuras 5.10 a 5.14 se muestran fotografías de las instalaciones del Puesto Central de Registro PCR-1 en la oficina de la tesorería en el Palacio Municipal de Motozintla y de la estación repetidora en el cerro Mozotal. En la figura 5.15 se puede ver el equipo de cómputo y comunicaciones en el PCR-2 en el observatorio meteorológico de la CNA en Tapachula.

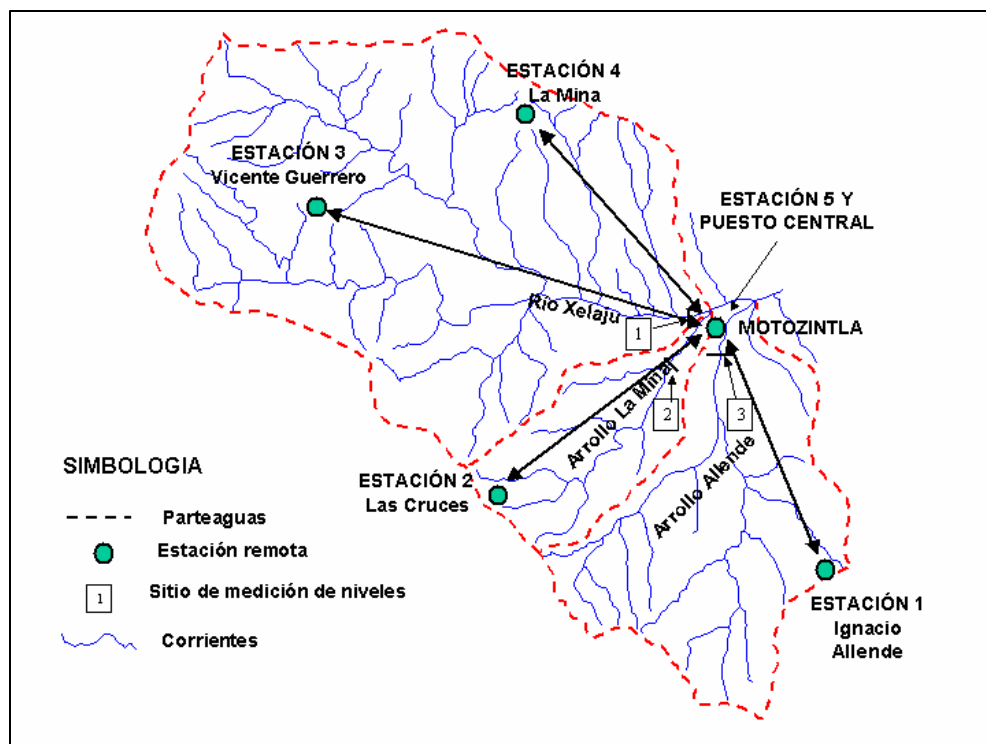


Figura 5.1 Localización de estaciones y topología del Sistema de Alerta Hidrometeorológica de Motozintla

Tabla 5.1 Estaciones del sistema de alerta hidrometeorológica de Motozintla

No.	Nombre de la Estación	Código de la Estación	Latitud norte	Longitud oeste	Observaciones
1	Ignacio Allende	IA-01	15° 19.621'	92° 13.971'	En la escuela primaria "Ignacio Allende", en el Barrio del mismo nombre.
2	Las Cruces	CR-02	15° 20.272'	92° 16.491'	En la Esc., Telesecundaria No. 306, en el Barrio "Las Cruces".
3	Vicente Guerrero	VG-03	15° 23.096'	92° 18.462'	Caseta especial junto a la esc. primaria "Juan N. Álvarez", en el Barrio "Vicente Guerrero".
4	La Mina	LM-04	15° 24.097'	92° 16.477'	Caseta especial junto a la escuela primaria "Revolución Mexicana", en el Barrio "La Mina".
5	Palacio Municipal (Puesto Central)	PM-05	15° 22.001'	92° 14.708'	En el Palacio Municipal de Motozintla. Aquí también se encuentra el Puesto Central de Registro PCR-1.
6	Mozotal	MZ-06	15° 25.738'	92° 20.294'	Estación repetidora ubicada en el cerro "El Mozotal", permite enviar los datos de lluvia del sistema de Motozintla al sistema de Tapachula, Chiapas.

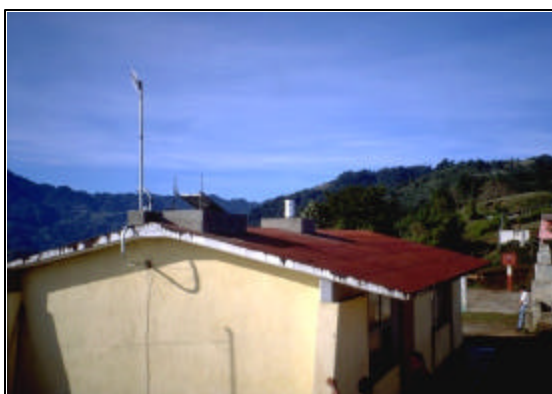
**Figura 5.2 Pluviómetro, celda solar y antena de radio instalados en la azotea de un salón de clases, estación Ignacio Allende IA-01****Figura 5.4 Pluviómetro, celda solar y antena de radio, estación Las Cruces, CR-02****Figura 5.3 Gabinete con el equipo de registro y comunicaciones dentro de un salón de clases, estación Ignacio Allende**



Figura 5.5 Vista interior del gabinete con los módulos de control y comunicación. Estación Las Cruces



Figura 5.6 Vista de la caseta que contiene a la estación La Mina MH-04



Figura 5.7 Gabinete con los equipos de control y comunicaciones, La Mina



Figura 5.8 Instalación de la estación Vicente Guerrero VG-03 en una caseta de concreto



Figura 5.9 Detalle del montaje del pluviómetro y la antena de radio sobre un poste



Figura 5.10 Palacio Municipal de Motozintla



Figura 5.11 Palacio Municipal. Equipo de comunicaciones en el Puesto Central de Registro PCR-1 y estación Palacio Municipal PM-05



Figura 5.12 Vista de la estación repetidora en Mozotal



Figura 5.13 Estación repetidora Mozotal



Figura 5.14 Vista del interior del gabinete de la estación repetidora Mozotal



Figura 5.15 Puesto Central de Registro PCR-2 en el observatorio meteorológico de la CNA en Tapachula

5.2 Medición y procesamiento hidrológico

El sistema de alerta hidrometeorológica temprana municipal cuenta con un componente hidrológico basado en la medición en tiempo real de la precipitación y niveles de agua de las corrientes. Además, esta parte del sistema determina el tipo de aviso (preventivo, prealarma o alarma) para que, en caso de ser necesario, se advierta a la población del peligro a que quedará expuesta en los minutos u horas posteriores al tiempo actual. En ese momento se dispone de la información enviada desde las estaciones pluviométricas.

Con base en la medición de la precipitación acumulada en lapsos de 10 minutos en distintas partes de las cuencas del río Xelajú y de los arroyos Mina y Allende, se calculan los flujos de agua que genera la lluvia en cuatro sitios distintos de estas corrientes naturales.

La determinación de los escurrimientos se apoya en un estudio hidrológico que se realizó para el río y arroyos citados. Toma en cuenta una estimación de coeficientes de escurrimiento (que cambian de acuerdo con la humedad del suelo) y los resultados de aplicación de hidrogramas unitarios instantáneos de cuatro subcuencas .

5.2.1 Sitios para medir lluvia y niveles de agua en ríos

Se identificaron los sitios en los que podría haber mayores daños debido al desbordamiento del río Xelajú y los arroyos Mina y Allende para vigilar los gastos que presentan estas corrientes en esos lugares.

En el estudio hidrológico se emplearon planos de la zona a escala 1:50,000 y se precisaron algunos aspectos en campo a partir de algunos recorridos llevados a cabo en la cuenca del río de interés por parte del personal de Cenapred.

Se delimitaron las diferentes subcuencas y se estableció la manera en que se obtendría la precipitación media.

En la carta topográfica de la cuenca del río Xelajú y los arroyos Mina y Allende se dibujaron las 4 subcuencas (figura 5.16).

En la tabla 5.2 se consignan con un nombre las subcuencas y algunas de sus características fisiográficas.

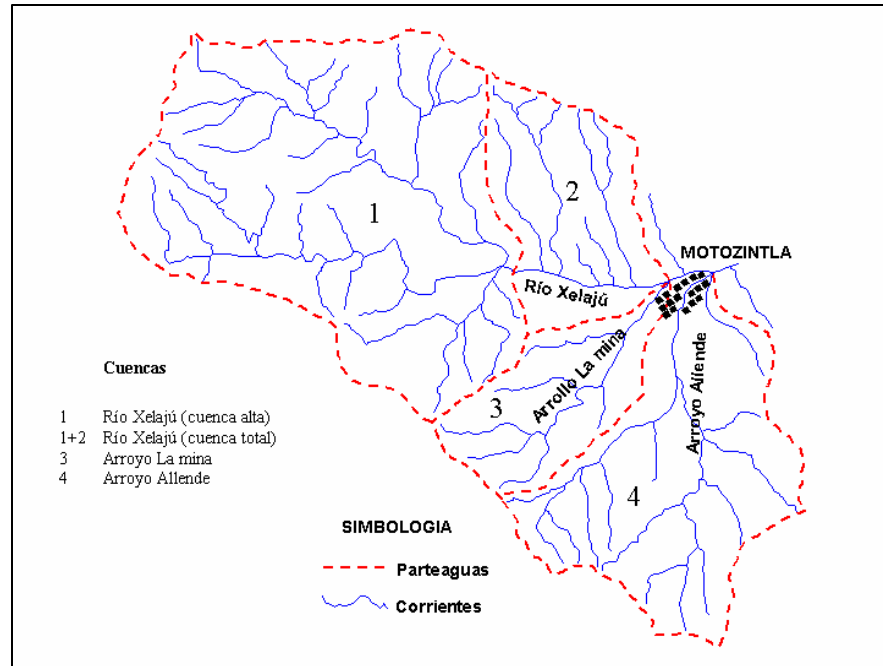


Figura 5.16 Subcuencas del río Xelajú y los arroyos Mina y Allende

Tabla 5.2 Subcuencas consideradas del río Xelajú y los arroyos Mina y Allende

No.	Cuenca	Área (km ²)	Cauce principal	
			Pendiente	Longitud (m)
1	Río Xelajú (Alta)	34.087	0.0984415	9000
2	Río Xelajú (Total)	44.237	0.07161219	12000
3	Arroyo La Mina	7.834	0.10380081	5800
4	Arroyo Allende	18.787	0.12836726	6200

5.2.1.1 Selección de los sitios para medir lluvia

Se determinó que para los cálculos de los flujos en el sistema de corrientes de la cuenca del río Xelajú y de los arroyos Mina y Allende eran suficientes 5 pluviómetros para medir la precipitación en distintos sitios y disponer de una adecuada estimación de la lluvia media.

Los 5 pluviómetros no están ubicados en sitios muy alejados entre sí para lograr cierta redundancia en algunas áreas, para que en caso de no recibir la información de alguno de ellos se haga una estimación de la precipitación media con las mediciones de aquellos instrumentos de los que sí se recibió información en el puesto central. Cabe mencionar que en Motozintla se pueden presentar fenómenos meteorológicos intensos, por lo que se prevé que no se capten los datos de alturas de lluvia en algunos de los 144 lapsos de 10 minutos que tiene un día.

La selección de los sitios para la instalación de los pluviómetros se realizó procurando tener una configuración uniforme, es decir, que cada uno de los instrumentos tuviera un área de cobertura parecida. Se fijaron sus coordenadas y se procedió a revisar su ubicación durante una visita en el campo.

Se tomó en cuenta que entre los sitios donde se ubicarían las estaciones de medición pluviométrica y el puesto de recepción de la información no existieran obstáculos para asegurar una buena comunicación vía radio y que hubiese protección contra daños por vandalismo. Se trató de ubicarlos en edificios públicos, como son escuelas o instalaciones relacionadas con la Comisión Nacional del Agua, lo más cercano posible a las coordenadas originalmente propuestas. En algunos casos no fue posible encontrar tales infraestructuras, y se construyeron casetas especiales para instalar estos instrumentos.

En la figura 5.17 se muestra la ubicación de los cinco pluviómetros de la red de medición y las subcuencas donde se localizan.

En la tabla 5.1 se consignan los sitios donde se instalaron los pluviómetros; cabe mencionar que ellos están colocados en estaciones remotas, por lo que en la tabla aparece el nombre de la estación con su código.

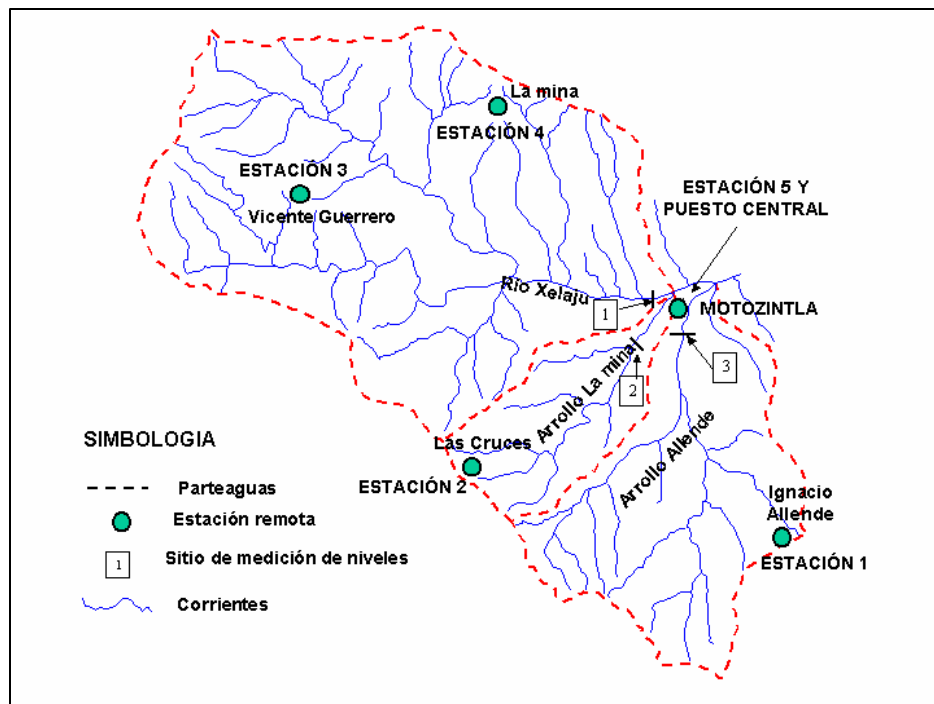


Figura 5.17 Ubicación de pluviómetros

5.2.1.2 Selección de los sitios para medir niveles

En la aplicación de los modelos matemáticos lluvia - escurrimiento se consideró un valor del coeficiente de escurrimiento. Este valor es modificado de acuerdo con las condiciones de humedad del suelo y la lluvia que se esté presentando. Sin embargo, para precisar su valor es conveniente medir el gasto en algunos sitios y asociarlo con la lluvia que se midió. Estas maniobras implican una instalación de aparatos para medir niveles de agua y a partir de ellas estimar su gasto asociado.

En cada una de los cauces del río Xelajú y de los arroyos Mina y Allende se escogió una sección, en la figura 5.17 se muestra la ubicación de éstas.

5.2.1.3 Determinación de los escurrimientos en las cuencas

Los flujos de agua que provoca la precipitación se estiman con un modelo lluvia -escurrimiento basado en hidrogramas unitarios instantáneos.

Para el caso particular de Motozintla no se contó con los datos de la lluvia y los escurrimientos que genera, por lo que se obtuvieron hidrogramas unitarios sintéticos.

Los hidrogramas unitarios calculados para las 4 subcuencas en estudio se muestran en la figura 5.18. Con ellos y la lluvia medida en las estaciones pluviométricas remotas, se encuentra el escurrimiento directo que producirá cierto tiempo después, para comparar sus magnitudes con respecto a los valores (umbrales de gasto) que pueden producir desbordamientos del río Xelajú y de los arroyos Mina y Allende.

5.2.1.4 Aplicación del hidrograma unitario adimensional

Para definir los hidrogramas unitarios adimensionales fue necesario obtener algunas de las características fisiográficas de las cuencas en estudio. Por lo que en un plano de INEGI a escala 1:50,000 se identificó y trazó el parteaguas de las cuencas y se obtuvieron las características fisiográficas que se muestran en la tabla 5.3.

Con estas características y considerando que la duración de la lluvia en exceso es de 10 minutos, se calcularon los hidrogramas de las cuencas en estudio, tales hidrogramas se muestran en la figura 5.18.

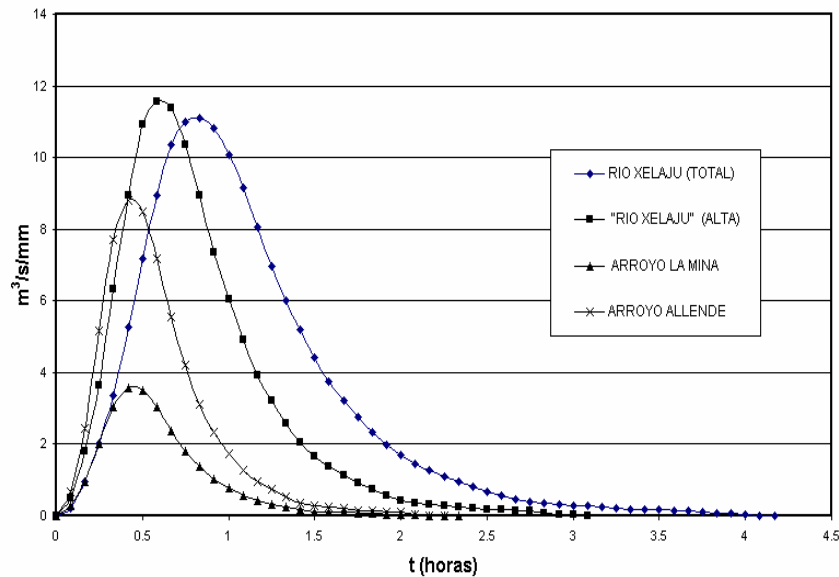


Figura 5.18 Hidrogramas Unitarios Instantáneos (Adimensional)

Tabla 5.3 Características fisiográficas de las cuencas

Cuenca	Área (km ²)	Cauce principal	
		Pendiente	Longitud (m)
Río Xelaju (Alta)	34.087	0.0984415	9000
Río Xelaju (Total)	44.237	0.07161219	12000
Arroyo La Mina	7.834	0.10380081	5800
Arroyo Allende	18.787	0.12836726	6200

5.2.1.5 Cálculo del escurrimiento

Para calcular el escurrimiento directo, (el que produce la lluvia) de cada una de las subcuencas en estudio a partir de los datos de una tormenta, es necesario determinar su precipitación media. La precipitación media se obtiene a partir de las láminas de lluvia acumulada en 10 minutos de aquellas estaciones cercanas o dentro de la subcuenca. Para ello se aplicó el método de Thiessen. Este procedimiento consiste en obtener un promedio ponderado de las alturas de precipitación media, donde cada “factor de peso” es igual al cociente entre el área dominada (con base en cercanía de un punto la subcuenca a cada uno de los pluviómetros) por la estación pluviométrica y el área total de la subcuenca. En este sistema de alerta se determinaron varias tablas con valores de estos factores para considerar que la información de una o más estaciones pluviométricas no sean recibidas en el puesto central.

Con los factores de peso para cada estación y los datos de lluvia de éstas se forman los hietogramas de lluvias medias de cada subcuenca. Con la altura media de cada subcuenca se obtiene el hidrograma del escurrimiento directo que produce y se agregan los gastos calculados en los lapsos de 10 minutos anteriores.

Como la información de la precipitación en las estación es enviada a cada diez minutos se pueden calcular los escurrimientos en el tiempo actual y en los tiempos posteriores que considera su hidrograma unitario instantáneo. Este subsistema considera que la altura media de precipitación puede obtenerse con adecuada precisión aún en el caso que no se reciba en el puesto central la información de cuatro estaciones. En caso de que en cualquiera de los siguientes 3 intervalos de tiempo de 10 minutos sí se reciba la información, se corregirían los valores calculados de escurrimiento. Cuando fallen simultáneamente más de cuatro estaciones se realiza una estimación de la lluvia media menos exacta, pero no se suspende el cálculo de los flujos de agua.

5.3 Resultados

El Sistema de Alerta Hidrometeorológica entró en operación, en su primera fase, en agosto de 1999. Con este sistema se han registrado lluvias importantes durante el tiempo que ha estado funcionando.

Los pluviómetros se instalaron en lugares convenientes para medir la precipitación media en cada una de las 4 subcuencas. Después, mediante un modelo lluvia – escurrimiento se estiman los escurrimientos de cada subcuenca; previamente se calcula la precipitación media en la subcuenca a partir de las precipitaciones puntuales de las estaciones. De esta manera el programa de la computadora de Hidráulica registra diariamente ambas variables en un archivo. A continuación se muestran algunos ejemplos de lluvias registradas por el sistema y los escurrimientos asociados a ellas.

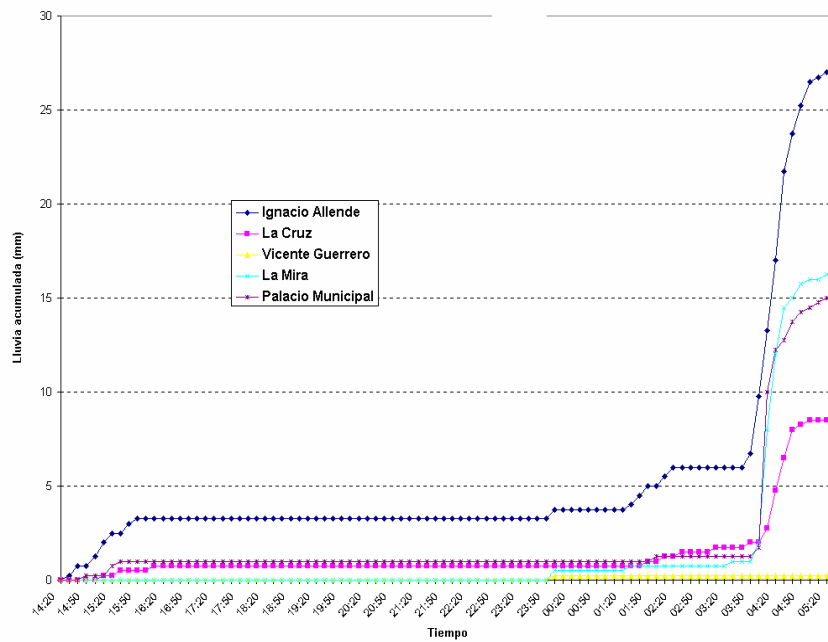


Figura 5.19 Lluvia registrada los días 10 y 11 de agosto de 1999

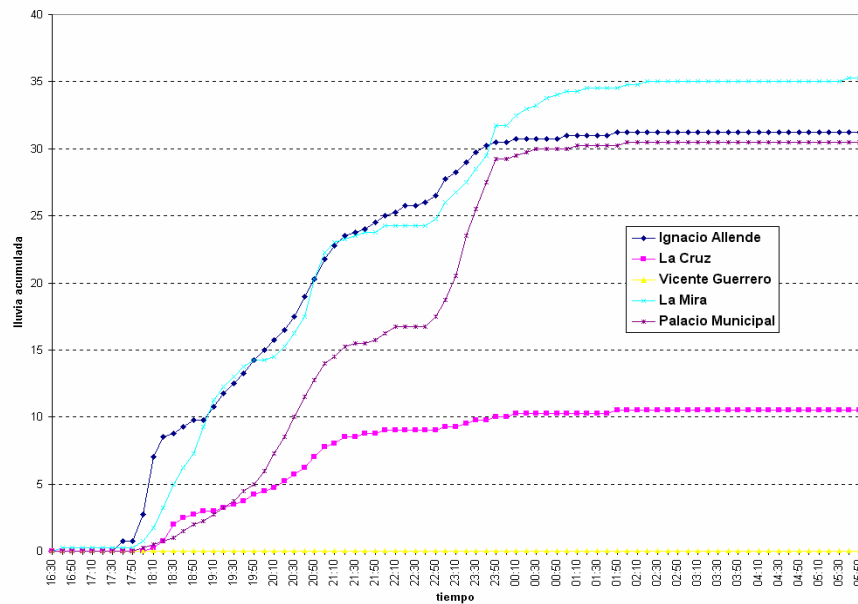


Figura 5.20 Lluvia registrada los días 11 y 12 de agosto de 1999

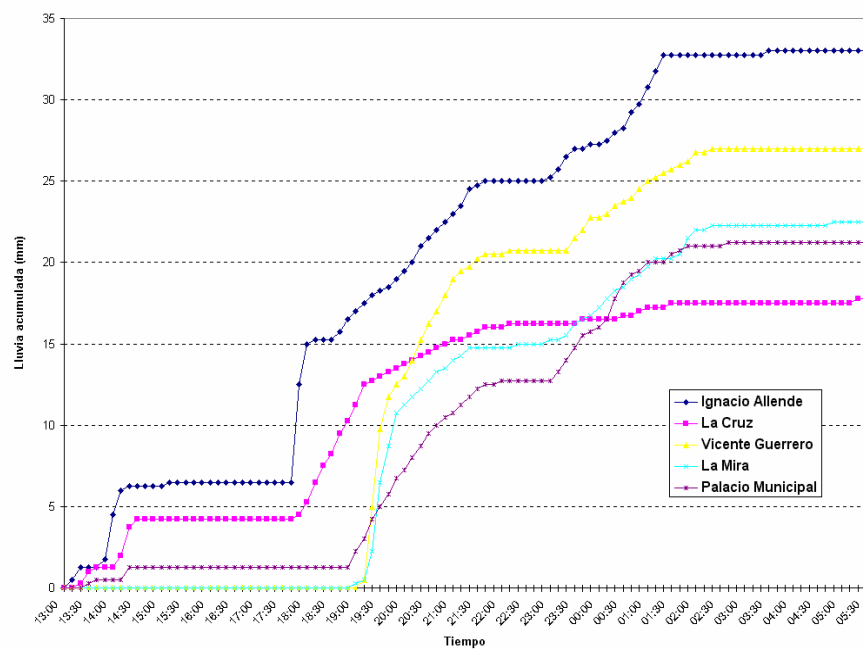


Figura 5.21 Lluvia registrada los días 16 y 17 de agosto de 1999

VI SISTEMA DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA DE TAPACHULA

6.1 Instrumentación

El Sistema de Alerta de Tapachula se compone de 7 estaciones remotas y dos puestos centrales de registro (figura 6.1). Las estaciones están distribuidas a lo largo de la cuenca del río Coatán. Los dos puestos de registro se localizan, uno en las instalaciones de la Unidad Municipal de Protección Civil y, el otro, en el Observatorio Meteorológico de la CNA en Tapachula. En la tabla 6.1 se muestran los nombres y la ubicación de cada estación.

Las 7 estaciones hasta ahora instaladas en Tapachula son exclusivamente para medición de precipitación e intensidad de lluvia. Se tiene previsto instalar 3 estaciones para medir el nivel del agua en el Río Coatán.

Para este sistema fue necesario emplear dos repetidoras: una en la estación No. 2, Pavincul (PA-02), para enlazar la estación Ignacio Zaragoza IZ-01, y una segunda, en la estación La Soledad SO-04 para comunicarse con la estación Agua Caliente AC-03. Las dos estaciones repetidoras se acondicionaron tanto como estaciones de medición como de repetición.

En las figuras 6.2 a 6.11 se presentan varias fotografías que muestran detalles de las instalaciones de los equipos.

En las figuras 6.12 a 6.14 se muestran fotografías de las instalaciones del Puesto Central de Registro PCR-1 en las oficinas de la Unidad Municipal de Protección Civil de Tapachula. En las figuras 6.15 y 6.16 se puede ver el equipo de cómputo y comunicaciones en el PCR-2 en el observatorio meteorológico de la CNA en Tapachula.

Tabla 6.1 Estaciones del sistema de alerta hidrometeorológica de Tapachula

No.	Nombre de la Estación	Código de la Estación	Latitud norte	Longitud oeste	Observaciones
1	Ignacio Zaragoza	IZ-01	15° 14'17.0"	92° 13' 52.9"	Se utiliza la infraestructura de una Escuela Preprimaria.
2	Pavincul	PA-02	15° 11'33.5"	92° 10' 37.9"	Se utiliza la infraestructura existente de una estación sismológica del volcán Tacaná.
3	Agua Caliente	AC-03	15° 10'29.19"	92° 8' 46.67"	Se utiliza la infraestructura del Centro de Salud.
4	La Soledad	SO-04	15° 10'10.06"	92° 12' 4.5"	Se utiliza un terreno de propiedad privada y se construyó una caseta para campo abierto.
5	El Manguito	MA-05	15° 8'14.1"	92° 11' 56"	Se utiliza un terreno de propiedad privada y se construyó una caseta para campo abierto.
6	La Presa (CFE)	PR-06	15° 1'28"	92° 13' 19.7"	Se utiliza la infraestructura de la Presa "Cecilio del Valle" (CFE).
7	Observatorio Meteorológico	OM-07	14° 53'25.32"	92° 17' 37.56"	Se utiliza la infraestructura del Observatorio Meteorológico de la CNA.
8	Protección Civil	PC-01	14° 54'49.5"	92°15' 47.04"	Se utiliza la infraestructura de Protección Civil Estatal del estado de Chiapas.

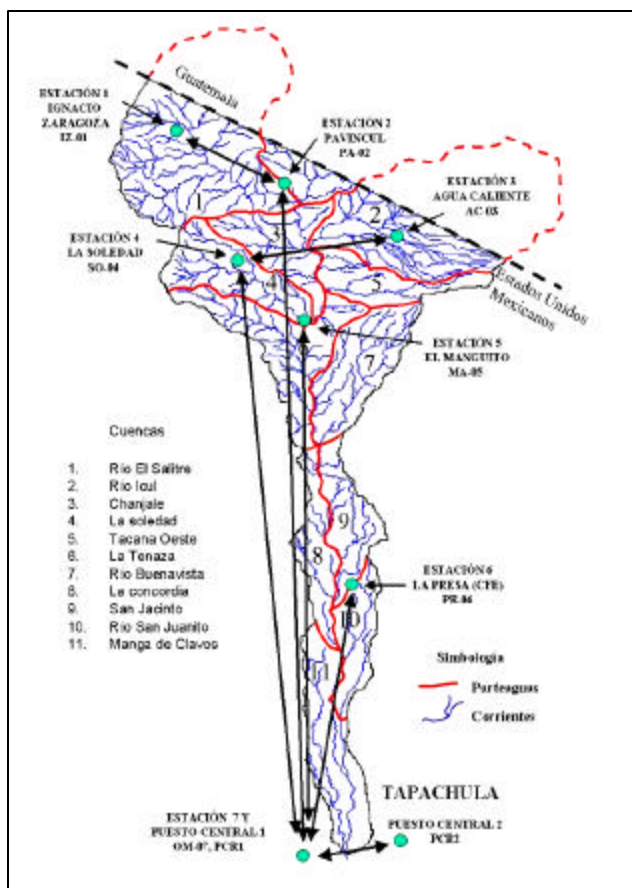


Figura 6.1 Localización de estaciones y topología del Sistema de Alerta Hidrometeorológica de Tapachula



Figura 6.2 Jardín de niños donde está la estación Ignacio Zaragoza, IZ-01



Figura 6.3 Celda solar y antena de radio, estación Ignacio Zaragoza Figura



6.4 Pluviómetro, celda solar y antena de radio sobre el techo del, centro de salud, estación Agua Caliente AC-03



Figura 6.5 Vista interior del gabinete con los módulos de control y comunicación. Estación Agua Caliente



Figura 6.6 Caseta de concreto que contiene en su totalidad a la estación La Soledad SO-04



Figura 6.7 Vista interior del gabinete con los módulos de control y comunicación, estación La Soledad



Figura 6.8 Estación El Manguito, MA-05



Figura 6.9 Estación La Presa PR-06



Figura 6.10 Pluviómetro y celda solar, estación La Presa



Figura 6.11 Caseta de concreto donde está alojado el equipo de registro y comunicaciones, estación La Presa



Figura 6.12 Vista del Puesto Central de Registro PCR-1 en las oficinas de la Unidad Municipal de Protección Civil de Tapachula



Figura 6.13 Equipo de comunicaciones en el PCR-1



Figura 6.14 Vista de las dos computadoras Telemetría e Hidráulica en el PCR-1



Figura 6.15 Equipo de cómputo en el Puesto Central de Registro PCR-2



Figura 6.16 Vista de la estación Observatorio Meteorológico y del equipo de comunicaciones del Puesto Central de Registro PCR-2 en el observatorio meteorológico de la CNA en Tapachula

6.2. Medición y procesamiento hidrológico

El sistema de alerta hidrometeorológica temprana municipal cuenta con un componente hidrológico basado en la medición en tiempo real de la precipitación y niveles de agua de las corrientes. Además, esta parte del sistema determina el tipo de aviso (preventivo, prealarma o alarma) para que, en caso de ser necesario, se advierta a la población del peligro a que quedará expuesta en los minutos u horas posteriores al tiempo actual. En ese momento se dispone de la información enviada desde las estaciones pluviométricas o de nivel de agua en algunos sitios de las corrientes principales.

Con base en la medición de la precipitación acumulada en lapsos de 10 minutos en distintas partes de la cuenca del río Coatán y la de niveles de la superficie libre del agua de sus corrientes, se calculan los flujos de agua que genera la lluvia en tres sitios distintos del río mencionado.

La determinación de los escurrimientos se apoya en un estudio hidrológico que se realizó para la cuenca del río Coatán. Toma en cuenta una estimación de coeficientes de escurrimiento (que cambian de acuerdo con la humedad del suelo), los resultados de aplicación de hidrogramas unitarios instantáneos de once subcuencas y varios tránsitos de avenidas en cauces.

Se calculó de modo aproximado el flujo del agua para conocer los tiempos de recorrido de las aportaciones de los influentes al río Coatán y el escurrimiento que proviene de la parte de la cuenca que está en Guatemala.

6.2.1 Sitios para medir lluvia y niveles de agua en ríos

Se identificaron los sitios en los que podría haber mayores daños debido al desbordamiento del río Coatán para vigilar los gastos que presenta este río en esos lugares.

En el estudio hidrológico se emplearon planos de la zona a escala 1:50,000 y se precisaron algunos aspectos en campo a partir de algunos recorridos llevados a cabo en la cuenca del río de interés por parte del personal de Cenapred.

Se delimitaron las diferentes subcuencas y se estableció la manera en que se obtendría la precipitación media.

En la carta topográfica de la cuenca del río Coatán se dibujaron las 11 subcuencas. De ellas 7 están en la parte alta de la cuenca, 3 en la zona de intermedia y 1 en la parte baja (figura 6.17).

En la tabla 6.2 se consignan con un nombre las subcuencas y algunas de sus características fisiográficas.

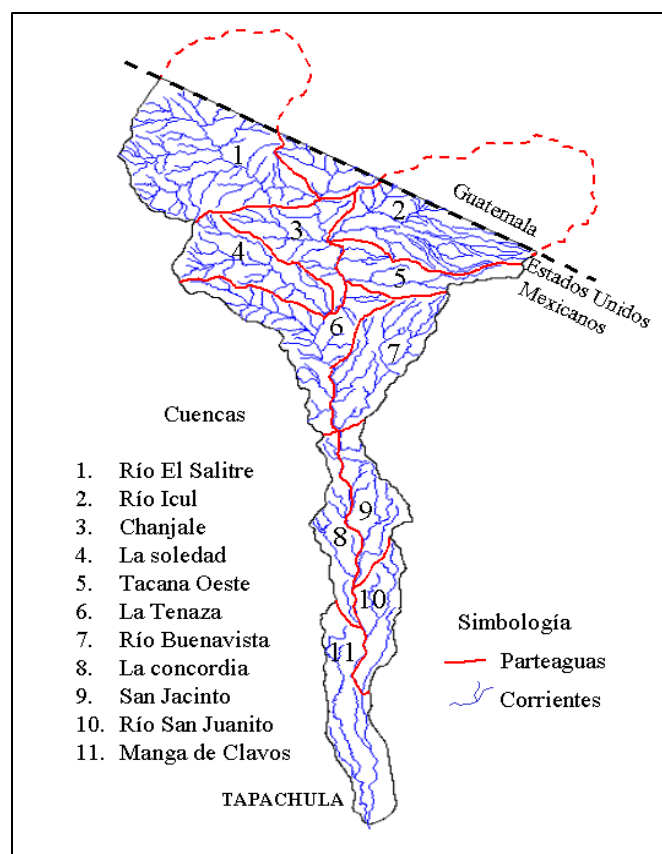


Figura 6.17 Subcuencas del río Coatlán dentro del territorio de México

Tabla 6.2 Subcuencas consideradas del río Coatlán

No.	Cuenca	Área (km ²)	Cauce principal	
			Pendiente	Longitud (m)
1	Río El Salitre	55.519	0.11371	16580
2	Río Icul	53.528	0.10820	11190
3	Chanjale	13.257	0.03680	5400
4	La Soledad	17.187	0.02678	7530
5	Tacaná Oeste	11.161	0.02283	8450
6	La Tenaza	21.959	0.02022	8800
7	Río Buenavista	15.432	0.02177	9320
8	La Concordia	10.965	0.02869	4200
9	San Jacinto	11.947	0.03537	4450
10	Río San Juanito	9.406	0.01499	8250
11	Manga de Clavo	18.838	0.01010	12400

6.2.1.1 Selección de los sitios para medir lluvia

Se determinó que para los cálculos de los flujos en el sistema de corrientes de la cuenca del río Coatlán eran suficientes 7 pluviómetros para medir la precipitación en distintos sitios y disponer de una adecuada estimación de la lluvia media.

Los 7 pluviómetros no están ubicados en sitios muy alejados entre sí para lograr cierta redundancia en algunas áreas, para que en caso de no recibir la información de alguno de ellos se haga una estimación de la precipitación media con las mediciones de aquellos instrumentos de los que sí se recibió información en el puesto central. Cabe mencionar que en Tapachula se pueden presentar fenómenos meteorológicos con vientos fuertes que son capaces de afectar a edificaciones y estructuras altas, por lo que se prevé que no se capten los datos de alturas de lluvia, en algunos de los 144 lapsos de 10 minutos que tiene un día.

La selección de los sitios para la instalación de los pluviómetros se realizó procurando tener una configuración uniforme, es decir, que cada uno de estos instrumentos tuviera un área de cobertura parecida. Se fijaron sus coordenadas y se procedió a revisar su ubicación durante una visita en el campo.

Se tomó en cuenta que entre los sitios donde se ubicarían las estaciones de medición (pluviométricas y de nivel de agua) y el puesto de recepción de la información no existieran obstáculos para asegurar una buena comunicación vía radio y que hubiese protección contra daños por vandalismo. Se trató de ubicarlos en edificios públicos, como son escuelas o instalaciones relacionadas con la Comisión Nacional del Agua, lo más cercano posible a las coordenadas originalmente propuestas. En algunos casos no fue posible encontrar tales infraestructuras, y se construyeron casetas especiales para instalar estos instrumentos.

En la figura 6.18 se muestra la ubicación de los siete pluviómetros de la red de medición y las subcuencas donde se localizan.



Figura 6.18 Ubicación de pluviómetros

En la tabla 6.1 se consignan los sitios donde se instalaron los pluviómetros; cabe mencionar que ellos están colocados en estaciones remotas, por lo que en la tabla aparece el nombre de la estación y un código.

6.2.1.2 Selección de los sitios para medir niveles

En la aplicación de los modelos matemáticos lluvia - escurrimiento se consideró un valor del coeficiente de escurrimiento. Este valor es modificado de acuerdo con las condiciones de humedad del suelo y la lluvia que se esté presentando. Sin embargo, para precisar su valor es conveniente medir el gasto en algunos sitios y asociarlo con la lluvia que se presentó. Estas maniobras implican la instalación de instrumentos para medir niveles de agua y a partir de ellos estimar su gasto asociado.

En el cauce del río Coatán se escogieron tres secciones transversales de este río. La primera se encuentra cerca de la frontera de Guatemala y México; la segunda y la tercera, aguas abajo de la zona alta y la intermedia, respectivamente, en que se ha dividido la cuenca de esta corriente natural.

6.2.1.3 Determinación de los escurrimientos en las cuencas

Los flujos de agua que provoca la precipitación se estiman con un modelo lluvia-escurrimiento basado en hidrogramas unitarios instantáneos.

Para el caso particular de Tapachula, no se contó con los datos de la lluvia y los escurrimientos que genera, por lo que se obtuvieron hidrogramas unitarios sintéticos.

Los hidrogramas unitarios calculados para las 11 subcuencas en estudio se muestran en la figura 6.19. Con ellos y la lluvia medida en las estaciones pluviométricas remotas, se encuentra el escurrimiento directo que producirá cierto tiempo después, para comparar sus magnitudes con respecto a los valores (umbrales de gasto) que pueden producir desbordamientos del río Coatán.

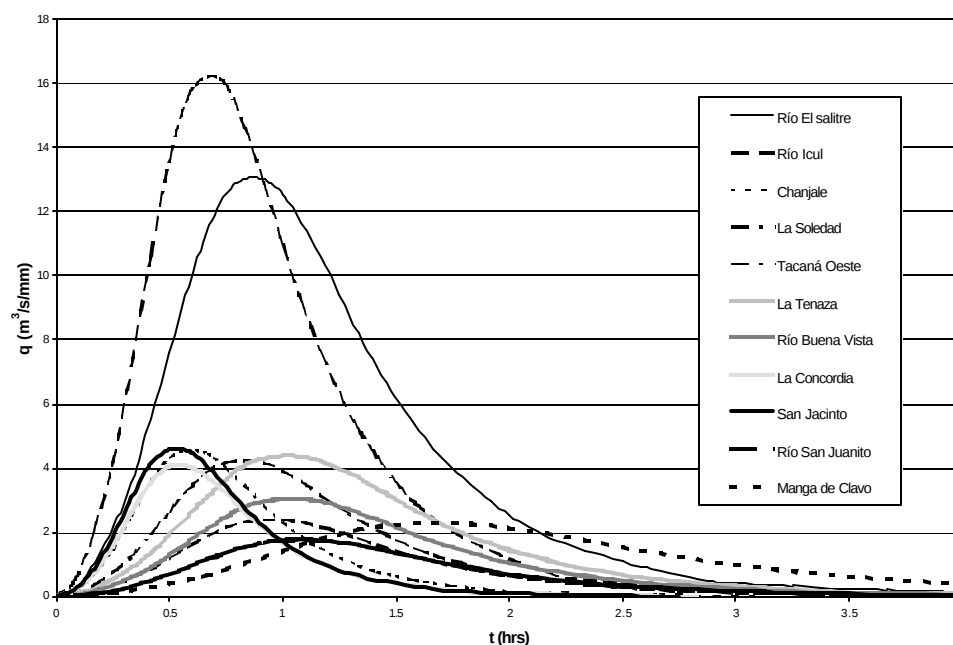


Figura 6.19 Hidrogramas Unitarios Instantáneos (basados en el hidrograma adimensional)

6.2.1.4 Aplicación del hidrograma unitario adimensional

Para definir los hidrogramas unitarios adimensionales fue necesario obtener algunas de las características fisiográficas de las cuencas en estudio. Por lo que en un plano de INEGI a escala 1:50,000 se identificó y trazó el parteaguas de las subcuencas y se obtuvieron las características fisiográficas que se muestran en la tabla 6.2.

Con estas características y para la duración de la lluvia en exceso es de 10 minutos, se calcularon los hidrogramas unitarios de las subcuencas en estudio, tales hidrogramas se muestran en la figura 6.19.

6.2.1.5 Cálculo del escurrimiento

Para calcular el escurrimiento (directo, el que produce la lluvia) de cada una de las subcuencas en estudio a partir de los datos de una tormenta, es necesario determinar su precipitación media.

La precipitación media se obtiene a partir de las láminas de lluvia acumulada en 10 minutos de aquellas estaciones cercanas o dentro de la subcuenca. Para ello se aplicó el método de Thiessen. Este procedimiento consiste en obtener un promedio ponderado de las alturas de precipitación media, donde cada “factor de peso” es igual al cociente entre el área dominada (con base en cercanía de un punto la subcuenca a cada uno de los pluviómetros) por la estación pluviométrica y el área total de la subcuenca. En este sistema de alerta se determinaron varias tablas con valores de estos factores para considerar que la información de una o más estaciones pluviométricas no sean recibidas en el puesto central.

Con los factores de peso para cada estación y los datos de lluvia de éstas se forman los hietogramas de lluvias medias de cada subcuenca. Con la altura media de cada subcuenca se obtiene el hidrograma del escurrimiento directo que produce y se agregan los gastos calculados en los lapsos de 10 minutos anteriores.

Como la información de la precipitación en las estaciones es actualizada cada diez minutos se pueden calcular los escurrimientos en el tiempo actual y en los tiempos posteriores que considera su hidrograma unitario instantáneo. Este subsistema considera que la altura media de precipitación puede obtenerse con adecuada precisión aún en el caso que no se reciba en el puesto central la información de cuatro estaciones. En caso de que en cualquiera de los siguientes 3 intervalos de tiempo de 10 minutos si se reciba la información, se corregirían los valores calculados de escurrimiento. Cuando fallen simultáneamente más de cuatro estaciones se realiza una estimación de la lluvia media menos exacta, pero no se suspende el cálculo de los flujos de agua.

6.3. Resultados

El Sistema de Alerta Hidrometeorológica entró en operación, en su primera fase, en Agosto de 1999. Con este sistema se han registrado lluvias importantes durante año y medio que ha estado funcionando.

Los pluviómetros se instalaron en lugares convenientes para medir la precipitación media en cada una de las 11 subcuencas. Después, mediante un modelo lluvia – escurrimiento se estiman los escurrimientos de cada subcuenca; previamente se calcula la precipitación media en la subcuenca a partir de las precipitaciones puntuales de las estaciones. De esta manera el programa de la computadora de Hidráulica registra diariamente ambas variables en un archivo. A continuación se muestran algunos ejemplos de lluvias registradas por el sistema y los escurrimientos asociados a ellas.

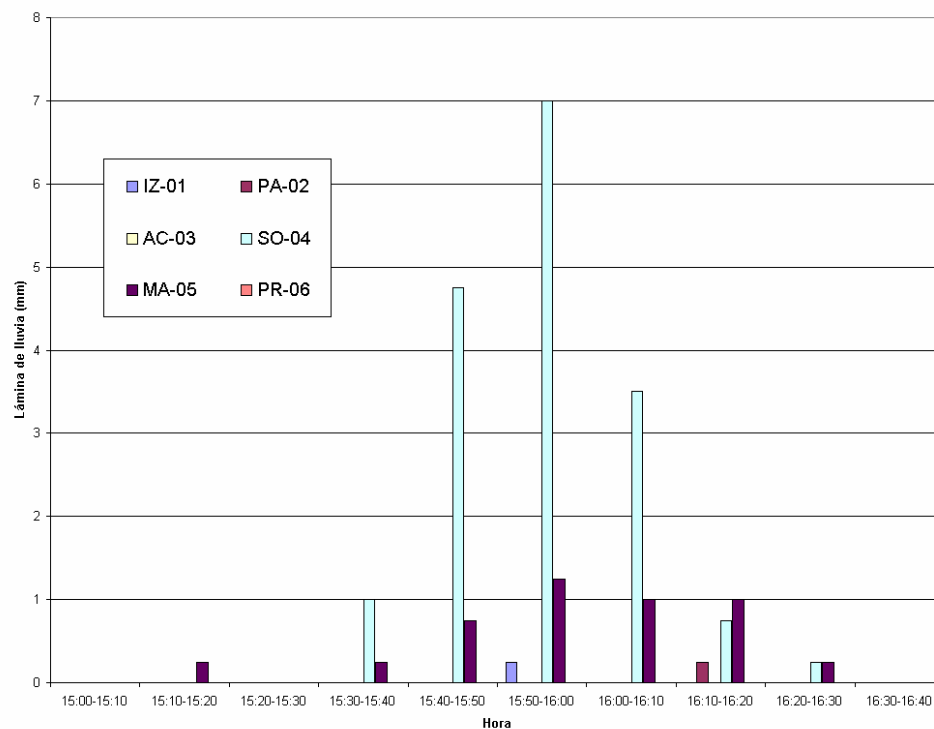


Figura 6.20 Lluvia registrada el día 10 de mayo del 2000

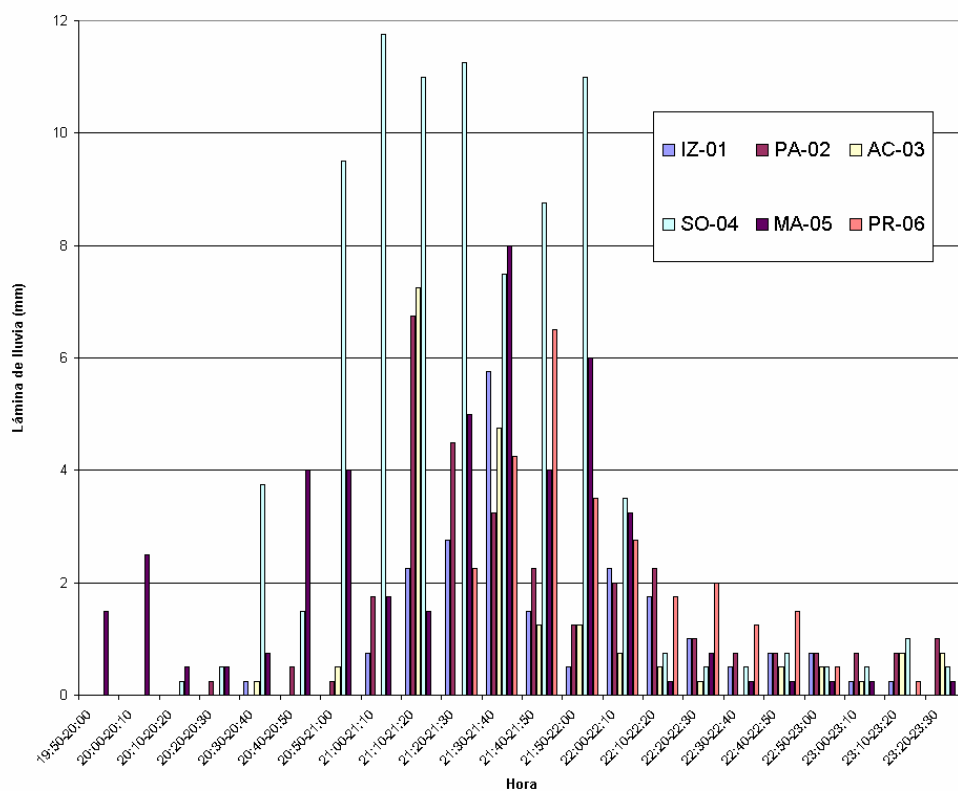


Figura 6.21 Lluvia registrada el día 29 de mayo del 2000

VII SISTEMA DE ALERTA HIDROMETEOROLÓGICA DE MONTERREY

7.1 Instrumentación

El Sistema de Alerta de Monterrey se compone de 4 estaciones remotas y un puesto central de registro (figura 7.1). Las estaciones están distribuidas en la ciudad pero principalmente cubren la cuenca del río Topo Chico. El puesto de registro se localiza en las instalaciones de la Dirección Estatal de Protección Civil de Nuevo León, al sur de la ciudad. En la tabla 7.1 se muestran los nombres y la ubicación de cada estación.

Las 4 estaciones hasta ahora instaladas en Monterrey son exclusivamente para medición de precipitación e intensidad de lluvia. No se requirieron casetas de concreto ya que se aprovechó la infraestructura existente: dos de las estaciones se ubicaron en escuelas, una más en el observatorio meteorológico de la CNA cercano a la Ciudad Universitaria y la última se encuentra en las oficinas de la Subgerencia Regional Río Bravo de la CNA. Para esta etapa del sistema no fue necesario emplear ninguna estación repetidora.

Se tiene previsto instalar un segundo puesto de registro en el Observatorio Meteorológico cercano a la Ciudad Universitaria y 4 estaciones pluviométricas más, a fin de cubrir las cuencas de otros tres arroyos que afectan a la ciudad: Arroyo Seco, Cerro de la Silla y El Obispo.

En las figuras 7.2 a 7.9 se presentan varias fotografías que muestran detalles de las instalaciones de los equipos.

En las figuras 7.10 a 7.12 se muestran fotografías de las instalaciones del Puesto Central de Registro PCR-1 en las instalaciones de la Dirección Estatal de Protección Civil.

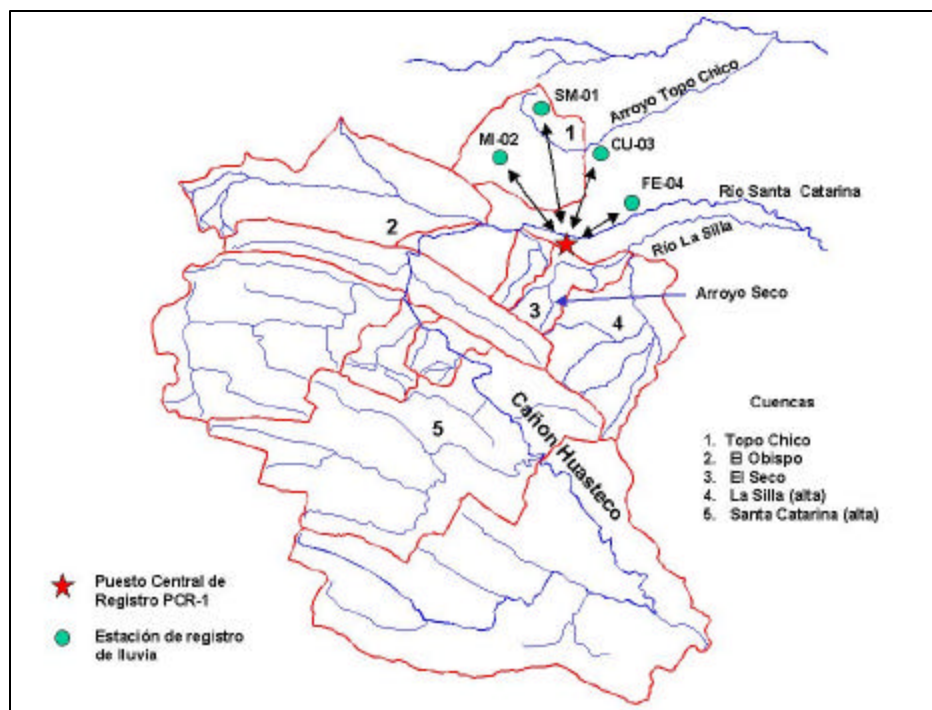


Figura 7.1 Configuración de la red de estaciones del sistema de Alerta Hidrometeorológica de Monterrey

Tabla 7.1 Estaciones del sistema de alerta hidrometeorológica de Monterrey

No.	Nombre de la Estación	Código de la Estación	Latitud norte	Longitud oeste	Observaciones
1	San Martín	SM - 01	25.75653°	100.34695°	En la Esc. Prim. "Salvador Várela Resendiz" ubicada en la esquina de las calles 25 de abril y María de la Paz, en la Col. Lomas de San Martín.
2	Las Mitras	MI - 02	25.73525°	100.37526°	En la Esc. Prim. "Año del Federalismo" ubicada en Av. Unidad y 9° Retorno, Col. Valle del INFONAVIT.
3	C.U.	CU - 03	25.73719°	100.30255°	En el Observatorio Meteorológico de la C.N.A., ubicado en Av. Universidad, al norte de C.U.
4	Fierro	FE - 04	25.68618°	100.26775°	En las oficinas de la C.N.A. en Av. Constituyentes 4103 ote. Col. Fierro.
I	Puesto Central, Protección Civil	PCR-01	--	--	En las instalaciones de la Dirección de Protección Civil del Estado de Nuevo León.
II	Puesto Central, CNA	PCR-02	25.73719°	100.30255°	En el Observatorio Meteorológico de la CNA, ubicado en Av. Universidad.



Figura 7.2 Pluviómetro, celda solar y antena de radio instalados en la azotea de la estación San Martín, SM-01



Figura 7.3 Gabinete con el equipo electrónico de registro y comunicaciones dentro de la estación San Martín, SM-01



Figura 7.4 Escuela donde se colocó la estación San Martín



Figura 7.5 Escuela en la que se encuentra la estación Las Mitras, MI-02



Figura 7.6 Observatorio meteorológico de la CNA en Monterrey, estación CU-03



Figura 7.7 Pluviómetro, celda solar y antena de radio, estación Ciudad Universitaria, CU-03



Figura 7.8 Pluviómetro, celda solar y antena, estación Fierro, FE-04



Figura 7.10 Instalaciones de la Dirección Estatal de Protección Civil



Figura 7.9 Vista del equipo de registro y comunicaciones, estación Fierro



Figura 7.11 Vista del Puesto Central de Registro PCR-1 en la Dirección Estatal de Protección Civil



Figura 7.12 Equipo de cómputo y comunicaciones en el PCR-1

7.2 Medición y procesamiento hidrológico

El sistema de alerta hidrometeorológica temprana municipal cuenta con un componente hidrológico basado en la medición en tiempo real de la precipitación y niveles de agua. Además, esta parte del sistema señala un tipo de aviso (preventivo, prealarma o alarma) para que, en caso de ser necesario, se advierta a la población del peligro a que quedará expuesta un cierto tiempo después.

Con base en la medición de la precipitación acumulada en lapsos de 10 minutos en distintas partes de la cuenca del arroyo Topo Chico, se calculan los flujos de agua que genera la lluvia en los cauces de estas corrientes. Posteriormente con la instalación de otras tres estaciones pluviométricas, se podrán calcular los flujos de agua que genera la lluvia en las cuencas de los arroyos El Seco, La Silla y El Obispo.

La determinación de los flujos de agua se apoya en un estudio hidrológico. Toma en cuenta una estimación de coeficientes de escurrimiento (que cambian de acuerdo con la humedad del suelo cuando no es impermeable), los resultados de aplicación de hidrogramas unitarios instantáneos de una de las cuencas y tránsitos de avenidas en cauces.

7.2.1 Sitios para medir lluvia y niveles de agua en ríos

Se identificaron los sitios en los que podría haber mayores daños debido al desbordamiento tanto del río Santa Catarina, como del arroyo Topo Chico y los ríos Seco y La Silla para vigilar los gastos que se presentan a la salida de sus correspondientes subcuencas.

Este sistema de alerta tiene implantado un criterio para que a partir de la precipitación que esté ocurriendo se dé un aviso preventivo con la intención de disponer de mayor tiempo para advertir del peligro y emprender ciertas acciones de protección. Sin embargo, se considera necesario confirmarlo con los escurrimientos.

En el estudio hidrológico se emplearon planos de la zona a escala 1:50,000 y se precisaron algunos aspectos en campo a partir de algunos recorridos de campo llevados a cabo por parte del personal de CENAPRED.

Se delimitaron las diferentes cuencas y se estableció la manera en que se obtendría la precipitación media en cada una de ellas.

En la carta topográfica de la cuenca del río Santa Catarina, arroyo Topo Chico, río Seco y río La Silla se identificaron y trazaron sus parteaguas (figura 7.13).

En la tabla 7.2 se consignan con un nombre las cuencas y algunas de sus características fisiográficas.

Tabla 7.2 Cuencas consideradas del río Santa Catarina, arroyo Topo Chico, río Seco y río La Silla

No.	Cuenca	Área (km ²)	Cauce principal	
			Pendiente	Longitud (m)
1	Topo Chico	64.51	0.02251	13,630
2	El Obispo	149.54	0.02020	24,150
3	El Seco	30.89	0.02043	13,300
4	La Silla (Alta)	97.00	0.02292	17,200
5	Santa Catarina (Alta)	-	-	-

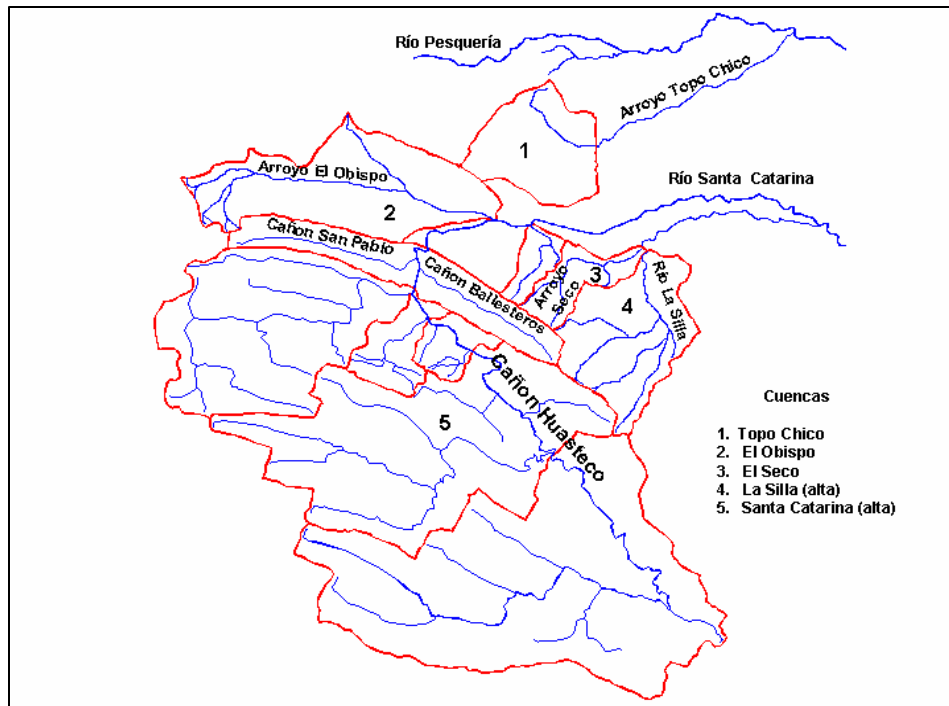


Figura 7.13 Cuencas del río Santa Catarina, arroyo Topo Chico y ríos Seco y La Silla

7.2.1.1 Selección de los sitios para medir lluvia

Se consideró que para los cálculos de los flujos en el sistema de corrientes de la cuenca del Río Santa Catarina y los arroyos El Seco, La Silla y Topo Chico eran suficientes 8 pluviómetros para medir la precipitación en distintos sitios y disponer de una adecuada estimación de la lluvia media.

Los 8 pluviómetros no están ubicados en sitios muy alejados entre sí para lograr cierta redundancia en algunas áreas, para que en caso de no recibir la información de alguno de ellos se haga una estimación de la precipitación media con las mediciones de aquellos instrumentos de los que sí se recibió información en el puesto central. Lo anterior se debe a que en Monterrey se pueden presentar fenómenos meteorológicos intensos que podrían afectar temporalmente una estación y no se captarían sus datos en algunos de los 144 intervalos de 10 minutos que tiene un día.

La selección de los sitios para la instalación de los pluviómetros se realizó procurando tener una configuración uniforme, es decir, que cada uno de estos instrumentos tuviera un área de cobertura parecida. Se fijaron sus coordenadas y se procedió a revisar su ubicación durante una visita en el campo.

Se tomó en cuenta que entre los sitios donde se ubicarían las estaciones de medición (pluviométricas y de nivel de agua) y el puesto de recepción de la información no existieran obstáculos para asegurar una buena comunicación vía radio y que hubiese cierta protección contra daños por vandalismo. Se trató de ubicarlos en edificios públicos, como son escuelas o instalaciones relacionadas con la Comisión Nacional del Agua, lo más cercano posible a los las coordenadas originalmente propuestas.

En la figura 7.14 se muestra la ubicación de los siete pluviómetros de la red de medición y las cuencas donde se localizan.

En la tabla 7.1 se consignan los sitios donde se instalaron los primeros cuatro pluviómetros; cabe mencionar que ellos están colocados en estaciones remotas, por lo que en la tabla aparece el nombre de la estación y un código.

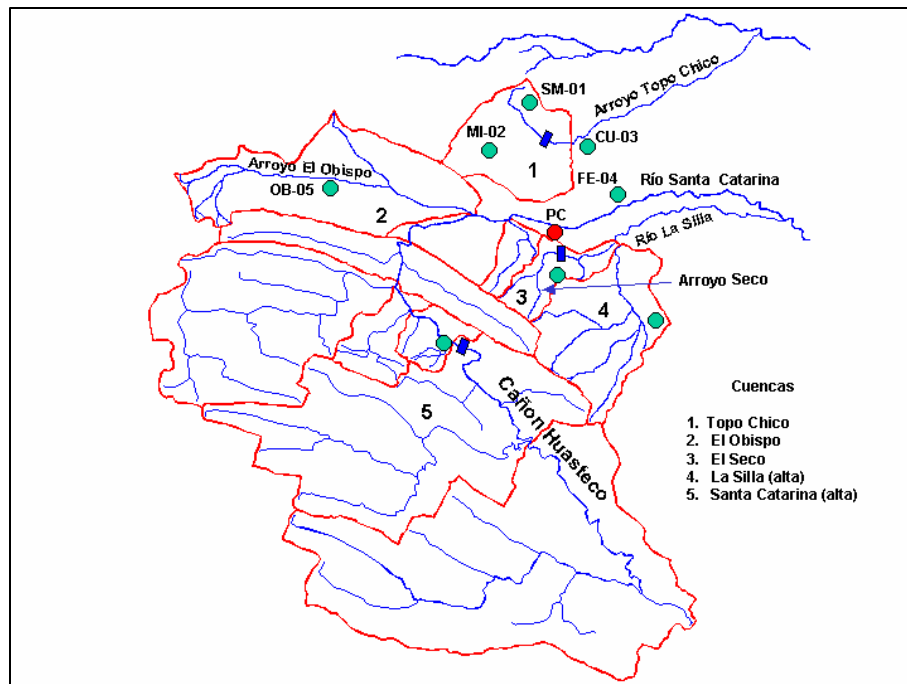


Figura 7.14 Ubicación de pluviómetros

7.2.1.2 Selección de los sitios para medir niveles

En la aplicación de los modelos matemáticos lluvia - escurrimiento se consideró un valor del coeficiente de escurrimiento y se supusieron algunos parámetros de los hidrogramas unitarios instantáneos. Para precisar su valor es conveniente disponer de mediciones de gasto en algunos sitios y asociarlas con la lluvia que se presentó.

En una segunda etapa se seleccionarán los sitios idóneos para ubicar las secciones de control con la finalidad de calibrar los hidrogramas unitarios instantáneos sintéticos usados dentro de la simulación del proceso lluvia-escurrimiento.

7.2.1.3 Determinación de los escurrimientos en las cuencas

Los flujos de agua que provoca la precipitación se estiman con un modelo lluvia -escurrimiento basado en hidrogramas unitarios instantáneos.

Para el caso particular de Monterrey, no se contó con los datos de la lluvia y los escurrimientos que genera, por lo que se obtuvieron hidrogramas unitarios sintéticos.

Los hidrogramas unitarios calculados para las 4 cuencas en estudio se muestran en la figura 7.15. Con ellos y la lluvia medida en las estaciones pluviométricas remotas, se encuentra el escurrimiento directo que se producirá cierto tiempo después, para comparar sus magnitudes con respecto a los valores (umbrales de gasto) que pueden producir desbordamientos de los arroyos El Seco, La Silla, El Obispo y el Topo Chico.

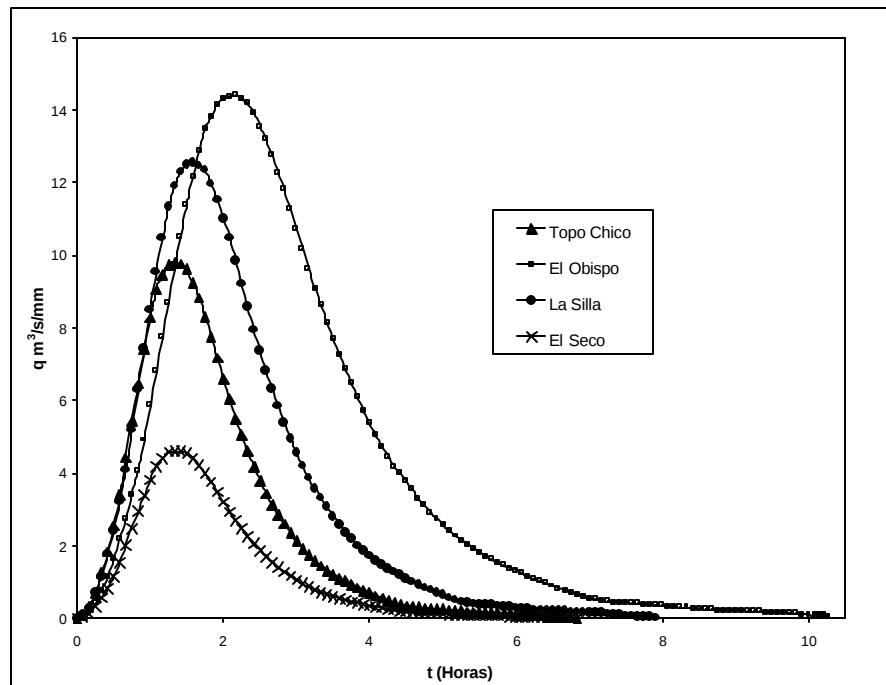


Figura 7.15 Hidrogramas Unitarios Instantáneos (Adimensional)

7.2.1.4 Aplicación del hidrograma unitario adimensional

Para definir los hidrogramas unitarios adimensionales fue necesario obtener algunas de las características fisiográficas de las cuencas en estudio. Por lo que en un plano de INEGI a escala 1:50,000 se identificó y trazó el parteaguas de las cuencas y se obtuvieron las características fisiográficas que se muestran en la tabla 7.3.

Con estas características y considerando que la duración de la lluvia en exceso es de 10 minutos, se calcularon los hidrogramas unitarios de algunas cuencas donde no era aplicable el hidrograma unitario geomorfológico, tales hidrogramas se muestran en la figura 7.15.

Tabla 7.3 Características fisiográficas de las cuencas

Cuenca	Área (km ²)	Cauce principal	
		Pendiente	Longitud (m)
Topo Chico	64.51	0.02251	13,630
El Obispo	149.54	0.02020	24,150
El Seco	30.89	0.02043	13,300
La Silla (Alta)	97.00	0.02292	17,200
Sta Catarina (Alta)	-	-	-

7.2.1.5 Cálculo del escurrimiento

Para calcular el escurrimiento (directo, el que produce la lluvia) de cada una de las cuencas en estudio a partir de los datos de una tormenta, es necesario determinar su precipitación media.

La precipitación media se obtiene a partir de las láminas de lluvia acumuladas en 10 minutos de aquellas estaciones cercanas o dentro de la cuenca. Para ello se aplicó el método de Thiessen. Este procedimiento consiste en obtener un promedio ponderado de las alturas de precipitación media, donde cada “factor de peso” es igual al cociente entre el área dominada (con base en cercanía de un punto la cuenca a cada uno de los pluviómetros) por la estación pluviométrica y el área total de la cuenca. En este sistema de alerta se determinaron varias tablas con valores de estos factores para considerar que la información de una o más estaciones pluviométricas no sean recibidas en el puesto central. Con los factores de peso para cada estación y los datos de lluvia de éstas se forman los hietogramas de lluvias medias de cada cuenca.

Con la altura media de cada cuenca se obtiene el hidrograma del escurrimiento directo que produce y se agregan los gastos calculados en los lapsos de 10 minutos anteriores.

Como la información de la precipitación en la estación es actualizada cada diez minutos se pueden calcular los escurrimientos en el tiempo actual y en los tiempos posteriores que considera su hidrograma unitario instantáneo. Este subsistema considera que la altura media de precipitación puede obtenerse con adecuada precisión aún en el caso que no se reciba en el puesto central la información de cuatro estaciones. En caso de que en cualquiera de los siguientes 3 intervalos de tiempo de 10 minutos sí se reciba la información, se corregirían los valores calculados de escurrimiento.

Cuando fallen simultáneamente tres estaciones se realiza una estimación de la lluvia media menos exacta, pero no se suspende el cálculo de los flujos de agua.

7.3. Resultados

El Sistema de Alerta Hidrometeorológica entró en operación, en su primera fase, en septiembre de 1999. Con este sistema se han registrado lluvias importantes durante el año y tres meses que ha estado funcionando.

Los pluviómetros se instalaron en lugares convenientes para medir la precipitación media en la cuenca del arroyo Topo Chico. Después, mediante un modelo lluvia – escurrimiento se estiman los escurrimientos en la cuenca; previamente se calcula la precipitación media en la cuenca a partir de las precipitaciones puntuales de las estaciones. De esta manera el programa de la computadora de Hidráulica registra diariamente ambas variables en un archivo. A continuación se muestran algunos ejemplos de lluvias registradas por el sistema y los escurrimientos asociados a ellas.

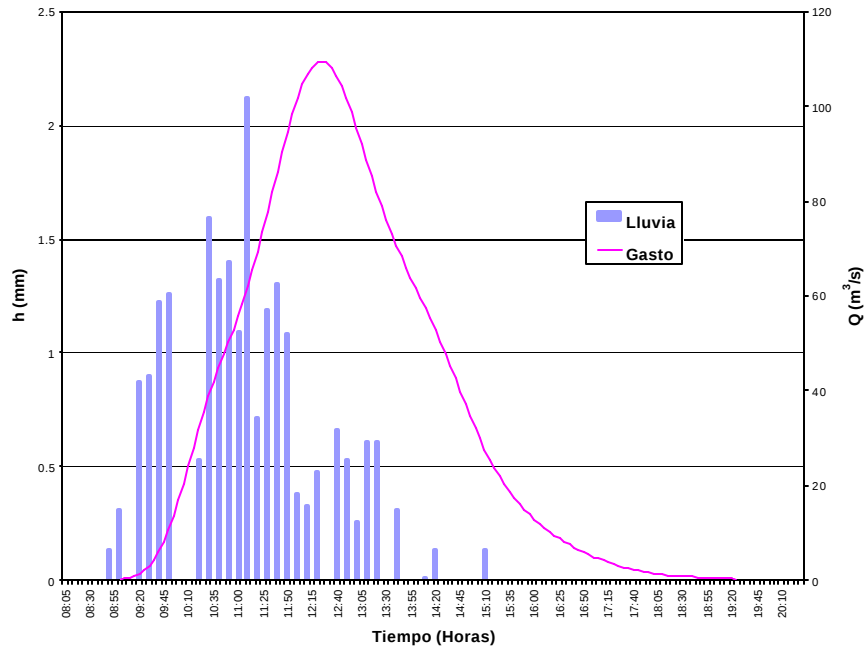


Figura 7.16 Lluvia registrada el día 29 de Septiembre de 1999 en la subcuenca del arroyo Topo Chico

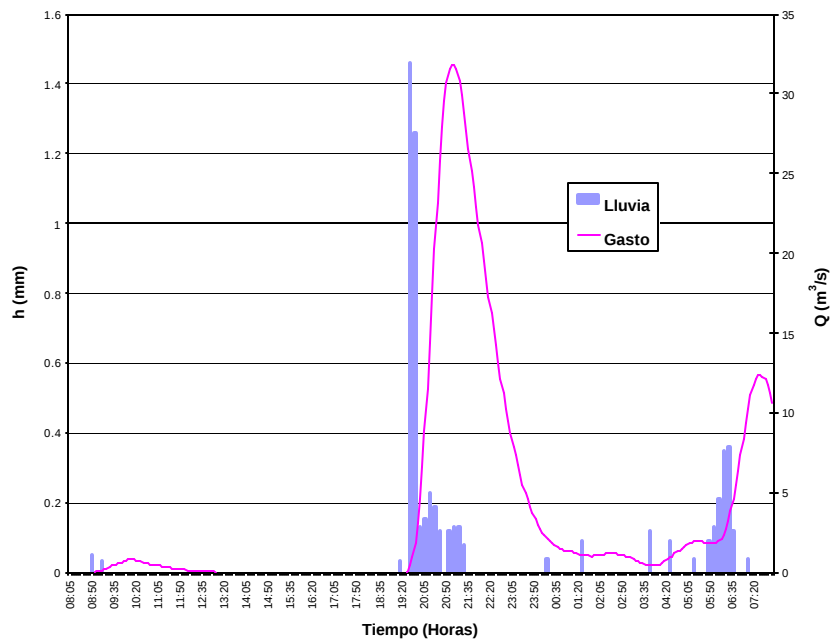


Figura 7.17 Lluvia registrada los días 17 y 18 de noviembre de 1999 en la subcuenca del arroyo Topo Chico

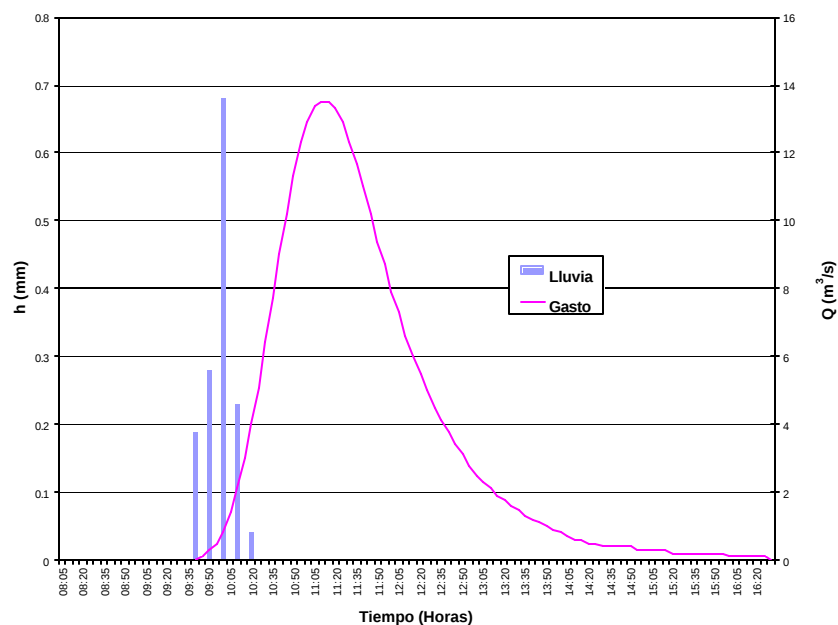


Figura 7.18 Lluvia registrada los días 18 y 19 de noviembre de 1999 en la subcuenca del arroyo Topo Chico

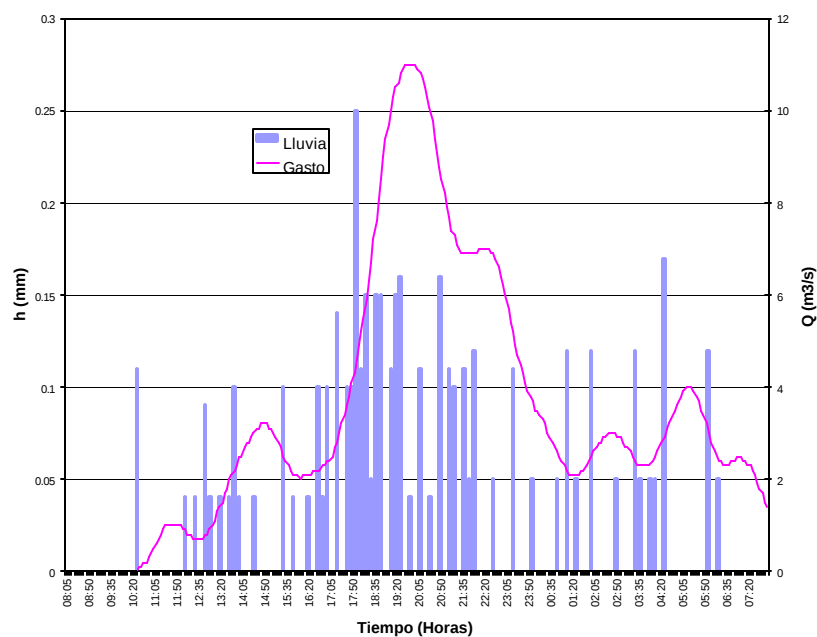


Figura 7.19 Lluvia registrada los días 23 y 24 de noviembre de 1999 en la subcuenca del arroyo Topo Chico

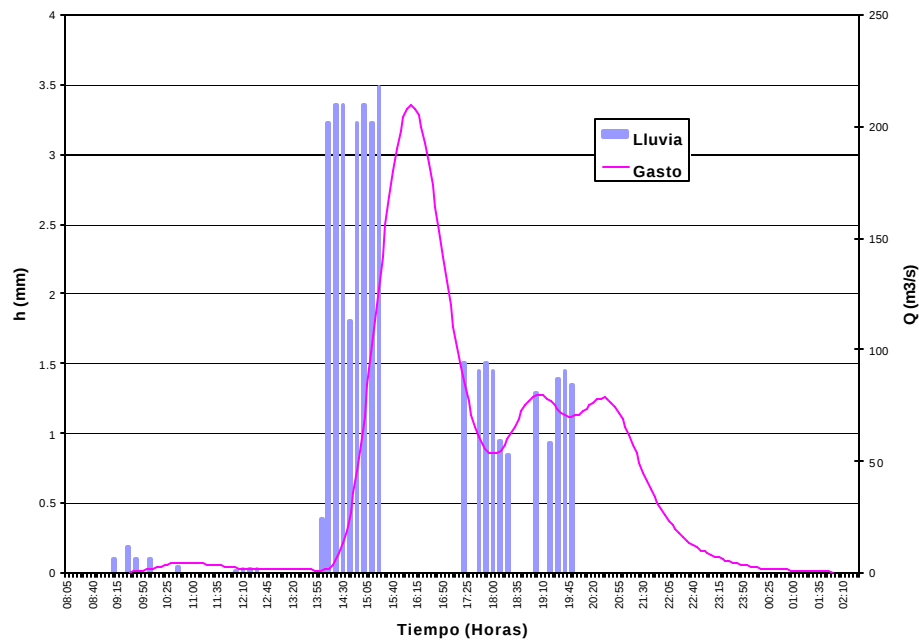


Figura 7.20 Lluvia registrada los días 26 y 27 de abril del 2000 en la subcuenca del Topo Chico

La tormenta del día 26 de abril, específicamente, activó la alarma por gasto del sistema, dado que se rebasó el umbral de $90\text{m}^3/\text{s}$.

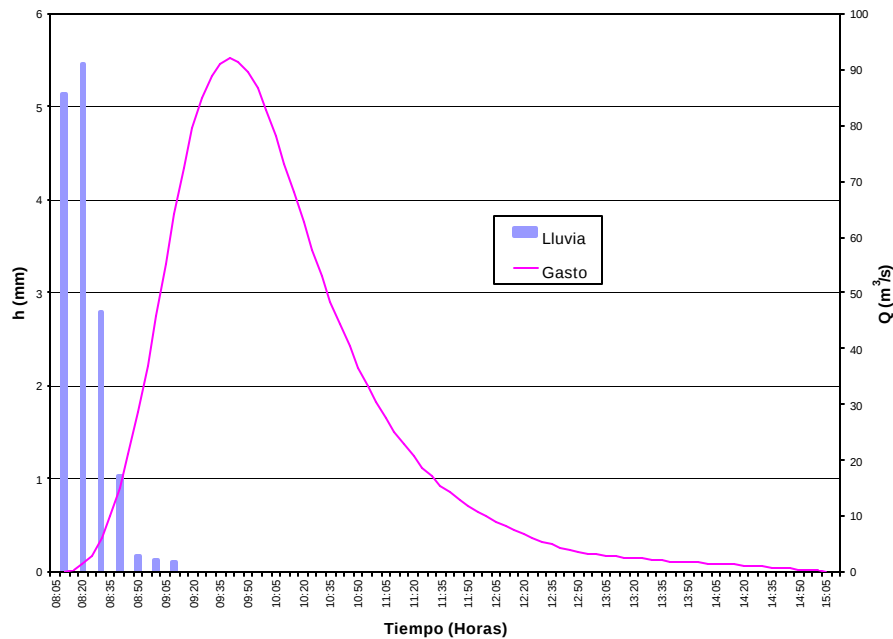


Figura 7.21 Lluvia registrada el día 13 de mayo del 2000 en la subcuenca del Topo Chico

La tormenta del día 13 de mayo del 2000 activó las alarmas de sistema, con lo que se iniciaron los operativos en Protección Civil, para prevenir cualquier contingencia que se derivara de la fuerte precipitación registrada. En las figuras siguientes muestran las pantallas de la computadora "hidráulica" donde se pueden observar las alarmas activadas en el día antes mencionado.

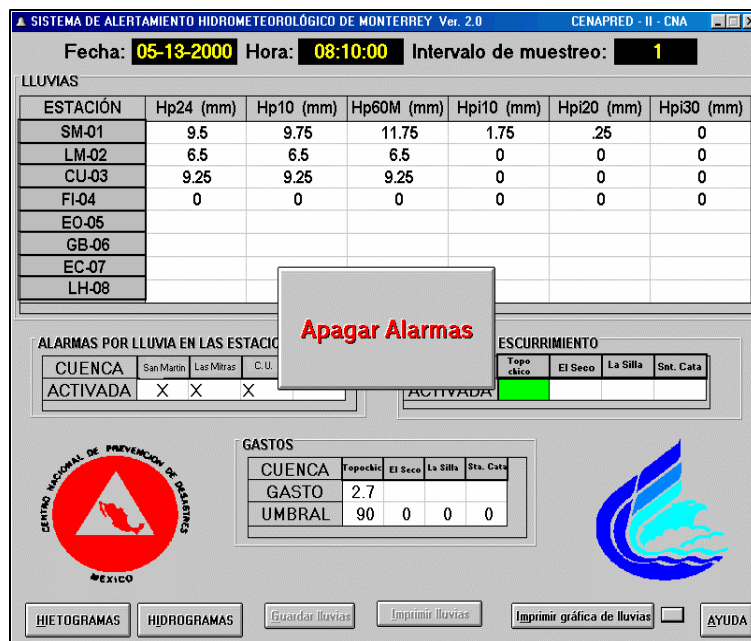


Figura 7.22 Las alarma de precipitación en las estaciones son activadas por la precipitación a las 8:00 h.

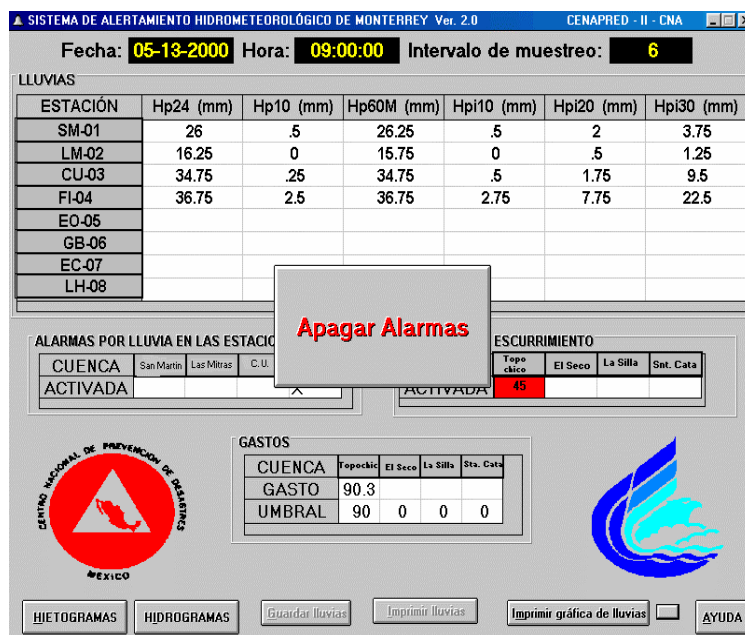


Figura 7.23 La alarma por gastos es activada al excederse el umbral de 90 m³/s en el arroyo Topo Chico

VIII CONCLUSIONES

Los sistemas de alerta hidrometeorológica descritos en este documento, son los primeros de su tipo utilizados en México y fueron desarrollados específicamente para apoyar a las Unidades de Protección Civil de los municipios en la detección temprana de condiciones que pudieran propiciar súbitas avenidas y daños por inundaciones derivadas de intensas lluvias.

Los sistemas de medición remota, de comunicación y de procesamiento fueron diseñados en el CENAPRED por personal del Área de Instrumentación Hidrometeorológica de la Coordinación de Instrumentación y del Área de Riesgos Hidrometeorológicos de la Coordinación de Investigación de este Centro. Ello permitió no sólo desarrollar esta nueva herramienta tecnológica de bajo costo, sino también diseñarla a la medida de las necesidades particulares de las cuencas de interés. Considerando el impacto socio-económico que fenómenos como el huracán Paulin tuvo en Acapulco en 1997, los sistemas de alerta desarrollados ofrecen una relación costo-beneficio muy favorable, pudiendo salvar vidas y cuantiosos daños.

Las mediciones obtenidas por las estaciones pluviométricas han ayudado a comprender la hidrología superficial de varias de las cuencas y a identificar las de mayor riesgo de inundación y escurrimientos. La confiabilidad en los pronósticos del sistema aumentará a medida que se cuente con más datos de lluvia y de niveles en los ríos, ya que ello permitirá afinar la calibración de las pérdidas debidas a infiltración y algunos parámetros de los hidrogramas unitarios instantáneos geomorfológicos. Para mejorar los pronósticos del sistema, es necesario hacer una campaña de mediciones de gastos, o escurrimientos, durante un cierto tiempo en algunas secciones transversales de los ríos para calibrar los métodos empleados para estimar dichos gastos.

No obstante que el modelo lluvia - escurrimiento en que están basados los sistemas descritos es de tipo hidrológico, en particular del tipo de parámetros concentrados, su implantación resulta adecuada, ya que requiere menos información que un modelo del tipo distribuido, el cual resulta todavía un tanto complicado de aplicar en forma operativa en protección civil. Los modelos lluvia - escurrimiento de parámetros concentrados estiman la lluvia media para una subcuenca en especial. A partir de estas precipitaciones se calculan las lluvias efectivas, por medio de un coeficiente de escurrimiento, que varía de acuerdo con la precipitación antecedente, por lo que se infiltra menos cuando el suelo se humedece; sin embargo, como se han dividido algunas de las cuencas hidrológicas por el tamaño de éstas, y se ha aplicado el método anterior a cada una de las subcuencas, se puede decir que en los sistemas se ha utilizado un modelo semidistribuido.

Con base en esta lluvia, y a través de los hidrogramas unitarios, se estima el escurrimiento asociado a la tormenta que cae en cada subcuenca. Al comparar los escurrimientos con los umbrales fijados previamente, si estos son rebasados es posible que se presente una situación de peligro, por lo que el color del semáforo de aviso cambia de verde, a amarillo o a rojo. Como no se dispuso de registros simultáneos de escurrimiento y precipitaciones, se emplearon hidrogramas unitarios geomorfológicos, y en cuencas pequeñas con corrientes de orden inferior, se utilizó un hidrograma unitario sintético.

El funcionamiento de los sistemas ha sido, en general, satisfactorio hasta ahora, y sólo se han presentado aislados problemas de operación en algunas estaciones. Algunos de estos problemas se han presentado por pluviómetros atascados en su mecanismo de balancín o porque sus conos de captación se encontraron tapados por basura. También fallas por interferencias en las bandas de radiocomunicación, vandalismo de equipos o descargas eléctricas han provocado ocasionalmente pérdida de datos. Muchos de estos problemas están directamente asociados a la falta de supervisión y mantenimiento preventivo por parte del personal de protección civil encargado de operar los sistemas.

Los sistemas instalados hasta ahora han demostrado ser muy útiles en la toma de decisiones de las autoridades de protección civil ya que les han permitido conocer el comportamiento hidrológico de las cuencas en estudio e inferir con anticipación el momento y la cantidad de agua que escurrió en un determinado sitio.

Basado en la experiencia adquirida con los cinco sistemas descritos, se contempla próximamente instalar nuevos sistemas de alerta en otras cuencas de alto riesgo en el País y continuar con el desarrollo de estas tecnologías para incorporar también parámetros climatológicos a las estaciones de medición de lluvia.

IX RECONOCIMIENTOS

Los recursos materiales para el desarrollo de los sistemas de alerta hidrometeorológica descritos fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua. Asimismo se recibió apoyo por parte del Instituto de Ingeniería de la UNAM para la realización de estos proyectos.

Además de estas instituciones, participaron en la instalación y operación de los sistemas las Unidades Municipales de Protección Civil de Acapulco, Monterrey, Tijuana, Tapachula y Motozintla.



SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN
COORDINACIÓN NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

Av. Delfín Madrigal No.665,
Col. Pedregal de Sto. Domingo,
Del. Coyoacán,
México D.F., C.P. 04360

www.cenapred.gob.mx
www.proteccioncivil.gob.mx