

# Recomendaciones para control y alivio de inundaciones en la región denominada Cono Sur en el Estado de Yucatán

Leopoldo Espinosa Graham

## RESUMEN

El problema de las inundaciones tanto en zonas urbanas como en terrenos agrícolas y ganaderos en el denominado Cono Sur del Estado de Yucatán afecta directamente a la población rural y al sector productivo de esa parte del estado. Con el objetivo de lograr recomendaciones que permitan aliviar las consecuencias del problema señalado, se efectuó un estudio que inició con la recopilación de información bibliográfica y oral con la ayuda de funcionarios municipales, estatales y federales, y el testimonio de pobladores directamente afectados, para lo cual se efectuaron visitas de reconocimiento a esa región, trabajos de prospección y obtención de muestras de suelo. Como segunda fase del estudio se efectuaron ensayos de laboratorio con las muestras de suelo y se organizó y analizó toda la información obtenida. Finalmente, se formularon las conclusiones y recomendaciones con atención al objetivo principal mencionado. Al término del estudio puede expresarse que las áreas inundables, en la región estudiada, son zonas bajas, planas y cubiertas de suelos impermeables. En toda la región el nivel freático está a una profundidad variable entre 80 y 120 m. La zona insaturada, entre la superficie del terreno y el nivel freático es altamente cárstica. El diseño y construcción de obras superficiales para la retención, conducción y desvío de escurrimientos para aliviar las inundaciones es factible, por lo cual se proporcionan algunos ejemplos describiendo el tipo, así como las dimensiones, de las obras necesarias para la protección de las poblaciones asentadas y terrenos de cultivo en una cuenca típica de la región. Sin embargo, las obras superficiales sólo deberán considerarse como una solución después de un análisis económico comparativo de estas mismas obras y el traslado parcial o total, temporal o definitivo de los pobladores afectados.

**Palabras clave:** Inundaciones, prevención, alivio, obras hidráulicas, carsticidad.

---

## INTRODUCCIÓN

A raíz de la constitución del fideicomiso denominado “Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica CONACYT – Gobierno del Estado de Yucatán” para el apoyo a proyectos de investigación que entre otros temas u objetivos atiendan problemas, necesidades u oportunidades de los sectores académico y productivo del estado, a fines del 2002 fue emitida la Convocatoria 2002 – 2003 “Impacto del Isidoro”, con llamado especial a grupos de investigación a presentar propuestas de proyectos de investigación, para

desarrollar en siete meses, que respondieran a alguna de las cuarenta y cinco demandas específicas agrupadas en seis grandes áreas susceptibles de investigación científica y tecnológica. Nuestro grupo académico seleccionó la demanda “Diseño de un programa para mitigar los efectos de las inundaciones sobre los drenes y tierras del Cono Sur del Estado”, formulando un proyecto que fue aceptado y financiado por el fideicomiso. Este artículo presenta dicho proyecto, incluyendo la descripción de los antecedentes, las actividades desarrolladas y las conclusiones del mismo.

La Península de Yucatán es una unidad geológica constituida por sedimentos calcáreos marinos con rasgos de erosión cárstica que van desde pequeños poros hasta cavernas muy grandes. Esta carsticidad, que se manifiesta en toda la península, en términos geológicos y geomorfológicos, corresponde a un estado de erosión intermedio. A estos poros y cavidades se debe la alta permeabilidad de las formaciones rocosas en casi toda la península. Sin embargo, existen depresiones del terreno cubiertas de capas de suelo poco permeables que han dado lugar a lagunas someras como Chankanab, Yalahau, Cobá,

etc., y existen, además, las zonas que se inundan periódicamente. Estas últimas, son también ligeramente más bajas que la superficie del terreno que las rodea. Los espesores variables de limos y arcillas que existen siempre bajo estas zonas provienen del arrastre y transporte de la capa vegetal de suelo que se genera en las partes más altas circundantes. Debe hacerse notar que los niveles del agua, tanto de las lagunas como de las áreas que se inundan están muy cerca de la superficie del terreno. El nivel freático regional se ubica a profundidades siempre mayores.

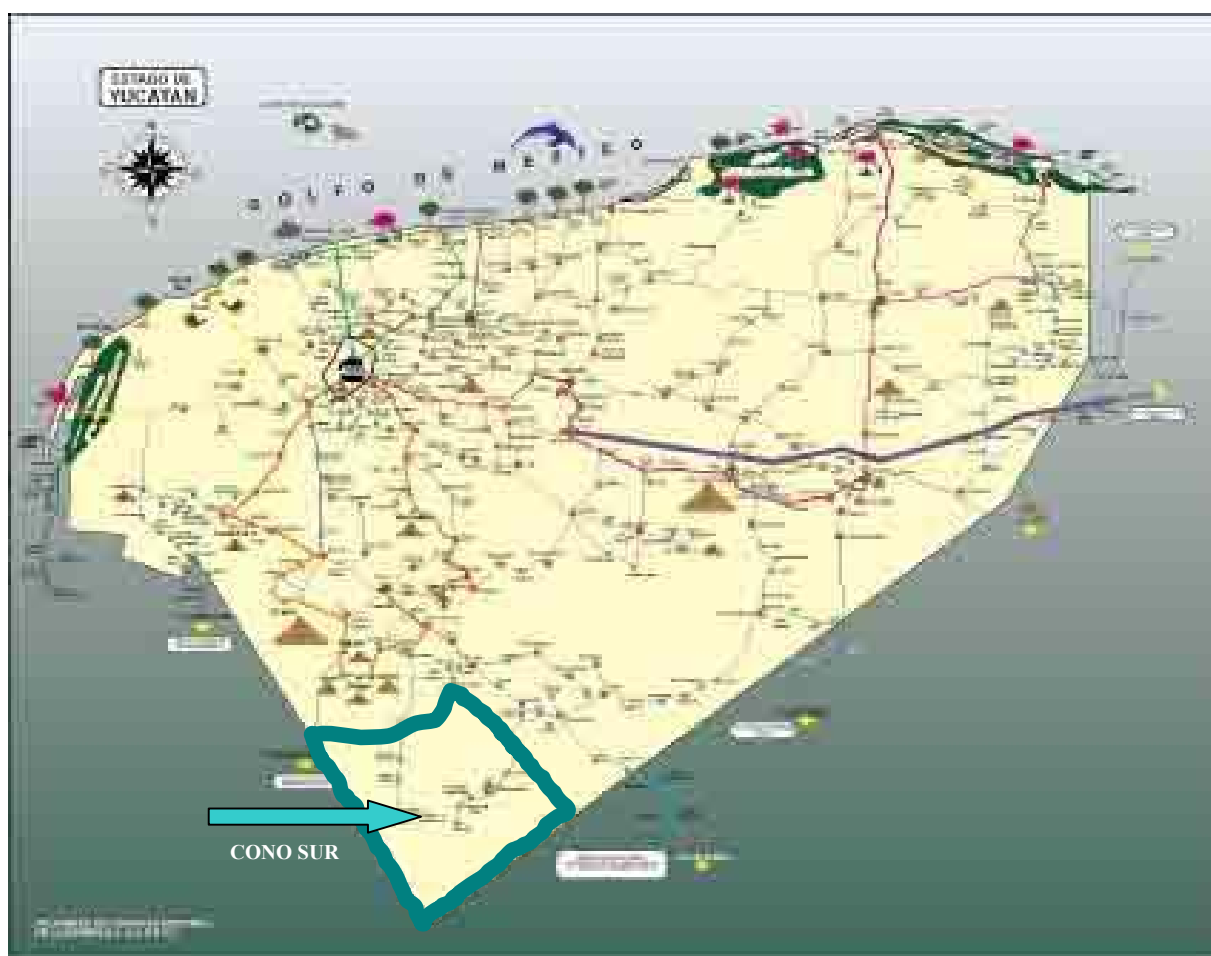


Figura 1. Ubicación del Cono Sur

La región estudiada, se ha denominado Cono Sur y corresponde a un área triangular de cuatro mil kilómetros cuadrados aproximadamente, que tiene como frontera norte la llamada Sierra Yucateca ubicada en línea recta con orientación NO-SE, desde la población de Maxcanú, pasando al sur de las

ciudades de Muna, Ticul, Oxkutzcab y Tekax. Hacia el sur esta región, está limitada por la frontera entre el límites del Estado de Yucatán con los Estados de Campeche y Quintana Roo (Figura 1). Es conveniente mencionar que la elevación del terreno en el Cono Sur

es de 50 a 150 m más alta que en el norte de la península.

Las inundaciones en las pequeñas cuencas cerradas del Cono Sur son muy variables. Se dan con diferentes frecuencias y duraciones. Existen áreas que se inundan cada uno o dos años hasta las que requieren de precipitaciones mayores con períodos de recurrencia de más de diez años. Por otra parte, existen inundaciones que desaparecen en unas horas y otras que duran varias semanas.

Con el paso del tiempo los asentamientos poblacionales junto con sus terrenos de cultivo y de pastoreo han cubierto áreas cada vez más grandes, invadiendo de manera progresiva zonas que son afectadas periódicamente por las inundaciones.

Los trabajos tradicionales de investigación geotécnica a nivel nacional incluyen tanto exploración como muestreo y ensayos de laboratorio, siempre con el propósito primario de la caracterización de los suelos. Por otra parte, este estudio involucra de manera importante la hidrología superficial en los temas de cálculo de escurrimientos, captación, conducción y drenaje. El personal académico y técnico del Cuerpo Académico de Geotecnia y Vías Terrestres de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Yucatán al cual pertenecen los participantes de este estudio apoyados por integrantes de los Cuerpos Académicos de Hidráulica e Hidrología y de Estructuras y Materiales de la misma dependencia, han sumado esfuerzos para el desarrollo de las diversas actividades de este proyecto.

Las actividades principales del proyecto se inician con una serie de visitas de estudio y reconocimiento a la región estudiada, efectuadas de junio de 2003 a enero de 2004, en las cuales se obtuvo información sobre las características de las inundaciones a partir del testimonio de los pobladores afectados y de las autoridades municipales. Paralelamente se recopiló información impresa existente, principalmente de la Gerencia Regional de la Comisión Nacional del Agua y de la Unidad Estatal de Protección Civil. También se obtuvo información mediante exploración y muestreo de suelos y pruebas de laboratorio. Al término del desarrollo de todos los trabajos de campo, se efectuó la organización y el análisis de la información obtenida, lo cual permitió formular las recomendaciones de carácter general y diseñar las obras en una cuenca típica de la región. Las recomendaciones incluyen la construcción de obras hidráulicas superficiales como son bordos y terraplenes de contención; canales y conductos de

derivación y conducción hacia otras cuencas o hacia pozos y resumideros; obras de toma y brocales para habilitación de pozos y resumideros naturales y lumbreras construidas para encauzar el agua drenada hacia las cavernas subterráneas.

Es importante señalar que la decisión de llevar a cabo las obras superficiales necesarias para evitar o mitigar las inundaciones en cualquier población o terreno debe fundamentarse en un estudio socio-económico en el cual se involucre el costo económico y social de las obras referidas y el de otras soluciones como la reubicación de poblados o su traslado temporal a zonas menos vulnerables y por otro lado tener en cuenta también el rendimiento económico de la producción de los terrenos a proteger.

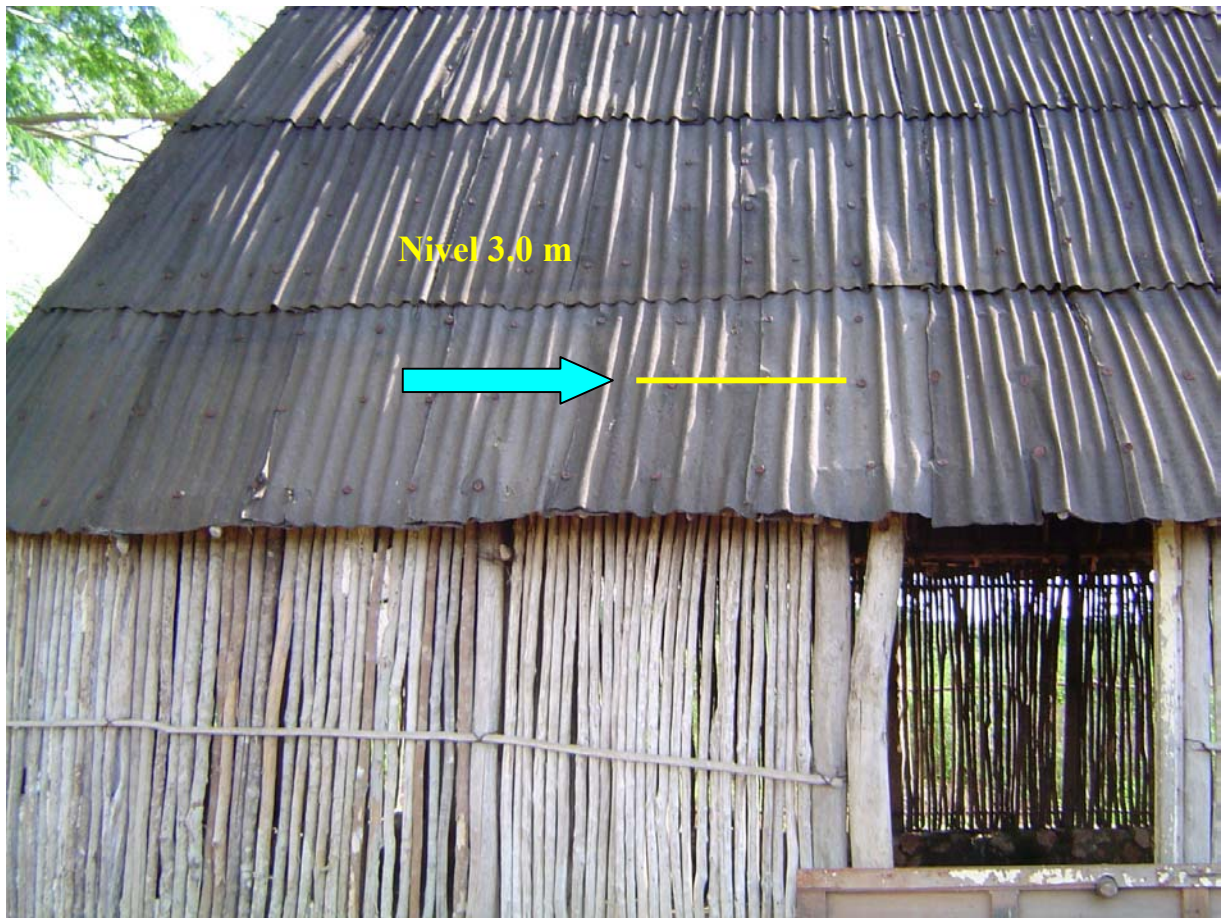
## METODOLOGÍA

El Cono Sur forma un pequeño altiplano con respecto a la parte norte del Estado de Yucatán. Es en este altiplano en el que se presentan las inundaciones en zonas en las cuales el terreno es plano y cubierto por suelos con espesores variables. Estas zonas corresponden a cuencas cerradas, independientes una de otra que son denominadas endorreicas. Estas cuencas tienen algunas características comunes entre sí como la de estar constituidas en zonas que han sido recubiertas por suelos y también por la existencia en todas ellas de resumideros que actúan como bocas por donde el agua fluye hacia las cavidades subterráneas, como se ha mencionado. En algunas cuencas, estas bocas o resumideros permanecen siempre abiertos y en otras se tapan en forma intermitente dependiendo de un ciclo destaponamiento-taponamiento durante la inundación. El funcionamiento cíclico del resumidero como boca de drenaje se puede describir como sigue: 1) primero, el destaponamiento que se produce al aumentar las cargas hidráulicas durante inundaciones con tirantes importantes, entonces, el agua penetra drenándose total o parcialmente la inundación del área involucrada y 2) se produce, pero no siempre, el taponamiento por obstrucción de la boca o de los conductos subterráneos debido al arrastre de vegetación y suelos (ramas, árboles, piedras, tierra, etc.) durante el flujo a través del resumidero y de las cavidades subterráneas. Las características diferentes entre estas cuencas son su extensión, su configuración en planta y, aunque no siempre, el tipo y espesor de los suelos que cubren su superficie.

No todas las cuencas que existen en la zona estudiada son inundables, ahora bien, teniendo en cuenta que existe un número considerable de cuencas

que sí son inundables. Para ilustrar la aplicación de las obras y acciones que se recomiendan para dar solución al problema de las inundaciones, se seleccionó una cuenca típica en la cual tanto la población como los terrenos cultivables sufrieron daños importantes por las inundaciones durante el paso del Huracán Isidoro en septiembre del 2002. Se consideran importantes los daños porque los tirantes de agua alcanzaron elevaciones de más de tres metros (Figura 2) y porque la duración de la inundación fue

de más de tres semanas. y que es precisamente una cuenca en la que se cuenta con suficiente información sobre dimensiones y duración de la inundación, en la fecha mencionada, a través de testimonios confiables tanto de los pobladores afectados como de las autoridades municipales, datos corroborados, además, a partir de las mediciones y observaciones que se hicieron directamente por el responsable del proyecto en las áreas de estudio.



**Figura 2. Nivel de la inundación en una de las viviendas de Chan Dzinup**

La cuenca, que a continuación se menciona, cuenta con un resumidero activo cercano a Chan Dzinup, población situada en la parte más occidental de la cuenca.

La cuenca seleccionada para ejemplo de la aplicación de las recomendaciones formuladas en este proyecto, es la que encierra las poblaciones de Chan

Dzinup, Santa Rosa, San Isidro Dos, San Isidro Yaxché y San Salvador.

En los párrafos que siguen y en el diagrama de la Fig. 3 se describe el procedimiento para el diseño de las obras de mitigación de las inundaciones que debe aplicarse en cualquier cuenca de inundación del Cono Sur.

### **Etapa 1. Recopilación de información existente**

Obtención y generación de los datos necesarios para el análisis hidrológico. Para la obtención y generación de los datos necesarios para el análisis hidrológico se llevaron a cabo las actividades que se describen brevemente a continuación:

Visitas de estudio y reconocimiento al Cono Sur, obteniéndose, básicamente, información sobre las inundaciones, sobre la topografía, sobre la vegetación, sobre los suelos, sobre los resumideros y sobre el estado y ubicación de las estaciones meteorológicas.

Recopilación de la información, sobre las características meteorológicas del Cono Sur, estudio agrológico de los suelos, así como de los proyectos de riego que han sido desarrollados en los últimos años: principalmente por la Gerencia Regional de la Comisión Nacional del Agua; en la Unidad Estatal de Protección Civil; y en bibliografía especializada recomendada por profesores investigadores de la FIUADY.

### **Etapa 2. Exploración y muestreo de suelos y levantamiento topográfico**

Exploración, muestreo y pruebas de laboratorio en suelos, posicionamiento geográfico y levantamiento y nivelación en la cuenca seleccionada.

Se realizaron cuatro sondeos en el estrato superficial de suelo con recuperación de muestras alcanzando la roca caliza subyacente una profundidad de 2.60 a 4.40 m. las muestras permitieron la identificación de los suelos a partir de las pruebas estándar de laboratorio.

Se obtuvo el posicionamiento geográfico de las poblaciones del interior de la cuenca y de puntos situados a cada 50 m sobre el camino de acceso a dichas poblaciones, camino que se dirige, aproximadamente, hacia el oriente desde Chan Dzinup hasta San Salvador, pasando por Santa Rosa, San Isidro Dos y San Isidro Yaxché. Se realizó, asimismo, el levantamiento y la nivelación de este camino y de otros tres de dirección norte-sur, es decir, transversales al primero mencionado, situados en Chan Dzinup, San Isidro Yaxché y San Salvador.

### **Etapa 3. Análisis de la información**

En la zona de la cuenca seleccionada se cuenta con información de precipitaciones durante el mes de septiembre de 2002 cada 24 horas de la

estación de San Diego Buena Vista, siendo las extraordinarias máximas las del día 23 de 300 mm y la del día 24 de 214 mm. El análisis de la magnitud de las precipitaciones medidas en esta estación desde 1982 y en la estación contigua de Becanchén desde 1950 permitieron estimar como precipitación para diseño, con un período de recurrencia de menos de 5 años, una de 150 mm.

Trazo del “parte-aguas” y cálculo del área total de la cuenca. En el presente estudio se emplearon, para realizar este trazo las cartas topográficas de INEGI de escala 1:50,000 y curvas de nivel a cada 10 m. El cálculo tanto del área total como la de cualquiera de las partes que se consideraron en el análisis se llevó a cabo utilizando el software ArcView GIS 3.2.

La división de la cuenca por zonas de suelos diferentes y cálculo tanto de las áreas ya divididas como de los coeficientes de absorción de los suelos en esas áreas se efectuaron con el apoyo de la información recabada durante las visitas de campo y con base en la clasificación de los suelos contenida en la referencia bibliográfica denominada “Descripción general de los suelos localizados en el Cono Sur del Estado de Yucatán. Estudio agrológico semidetallado, 1979”, de la Gerencia Regional de la Comisión Nacional del Agua en la Península de Yucatán.

El ajuste de los coeficientes de absorción de los suelos se realizó mediante un procedimiento iterativo de estimación de los niveles de inundación en un punto de la cuenca, variando en cada iteración el coeficiente de absorción de los suelos, y comparando los niveles, así estimados, con los reales de la inundación medidos en ese punto. Los valores conocidos de la precipitación y de las áreas de los diferentes suelos se mantienen constantes. Este procedimiento iterativo sólo se debe aplicar después de un recorrido de campo detallado en toda la extensión de la cuenca, tomando nota del tipo de la variación del tipo de suelos y de la vegetación, apoyándose en fotos aéreas de vuelos recientes siempre que sea posible.

En la cuenca seleccionada se utilizó el nivel de inundación medido en la techumbre de lámina de cartón de una de las viviendas del poblado de Chan Dzinup (Figura 2). El ajuste de los coeficientes de absorción se alcanzó después de varias iteraciones.

Para la estimación de la escorrentía extraordinaria debida a la precipitación del 23 de septiembre de 2002 y la de diseño en áreas del Cono Sur se siguió el procedimiento aplicado por la

Gerencia Regional de la Comisión Nacional del Agua en la Península de Yucatán en el Distrito de Temporal Tecnificado No. 24, Zona Sur, Becanchén, Tekax, Yucatán. (Sie Ling Chiang "Clasificación hidrológica. Potencial de escorrentía" Journal of Hydrology, Vol 13, 1971, pp 54-62)

#### Etapa 4. Estimación de escorrentías y gastos de diseño

El procedimiento antes señalado consta de tres pasos:

- 1) Se utiliza, en primera instancia, un sistema de clasificación hidrológica de suelos que toma en cuenta no sólo la constitución química y mineralógica y el espesor de los suelos sino la profundidad y fracturamiento de la roca subyacente. Este sistema considera terrenos desde los de muy alta hasta los de muy lenta infiltración y los divide en cuatro grupos de A, B, C y D.
- 2) A continuación se aplica un sistema de clasificación atendiendo al uso de suelo, vegetación y tipo de cultivo. Este sistema proporciona un número de curva, CN, cuyo valor queda comprendido entre 6 para terrenos de muy alta infiltración hasta 94 para los de infiltración muy baja.
- 3) Finalmente, se usan dos ecuaciones una para calcular la infiltración potencial en milímetros, S:

$$S = (2540/CN) - 25.4$$

y la denominada ecuación de escorrentía:

$$Q = ((P - 0.2*S)^2)/(P + 0.8*S)$$

Donde:

Q = Escorrentía, en milímetros  
 P = Precipitación en 24 horas, en milímetros  
 S = Infiltración potencial, en milímetros

En la cuenca seleccionada para la aplicación de la metodología propuesta (Chan Dzinup-San Salvador), con base en una precipitación extraordinaria de 300 mm en 24 horas, el procedimiento anteriormente descrito permitió estimar una escorrentía de 252 mm en la zona plana más baja que es la que corresponde al interior de la curva de nivel de 140 m (Carta topográfica E16A12

de INEGI) y una escorrentía de 129 mm en las zonas de relieve ondulado de las lomas y cerros que quedan fuera de la zona baja hasta la frontera superior de la cuenca. Estos valores de escorrentía son los que finalmente fueron compatibles con los niveles de inundación reportados en la cuenca y por tanto los valores de infiltración con que fueron calculados, se adoptaron para el cálculo de la escorrentía de la cuenca debida a la precipitación de 150 mm en 24 horas, precipitación, esta última, que fue la propuesta para el diseño de las obras de alivio.

La escorrentía correspondiente a la precipitación de 150 mm, empleando el mismo procedimiento arriba descrito fue de 107 mm para las tierras bajas y planas y de 30 mm para la zona de lomas y cerros.

El cálculo de los gastos de diseño se efectuó para cada una de las seis subcuencas que conforman las zonas de lomeríos que existen tanto al sur como al norte del área plana baja donde se encuentran establecidos los poblados. Los gastos calculados son aproximadamente los que podrían captarse en la salida o cauce más bajo de cada subcuenca. El procedimiento para estos cálculos es el que se presenta en el Anexo VII del Informe Final 2002 de la Comisión Nacional del Agua correspondiente al denominado Distrito de Temporal Tecnificado No. 24 Zona Sur del Estado de Yucatán.

Para el cálculo del gasto de diseño de cada sub-cuenca se utilizó la siguiente fórmula:

$$C_d = (K*L)/t$$

Donde:

$C_d$  = coeficiente de drenaje, en l/s/ha  
 L = escorrentía total en 24 horas, en mm  
 K = constante de conversión. Con la precipitación en mm y la duración de la lluvia en horas su valor es de 2.78  
 t = tiempo de la lluvia en 24 horas

Con el valor del coeficiente de drenaje así calculado se aplica la fórmula del gasto que es:

$$Q = C_d*A$$

Donde:

Q = gasto de diseño, en l/s  
 A = superficie de la subcuenca, en hectáreas  
 $C_d$  = coeficiente de drenaje, en l/s/ha

Con el valor del gasto de diseño se entra al paso siguiente.

Empleando ambas ecuaciones se calcularon los gastos de diseño que se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1. Gasto de diseño en subcuencas**

Subcuenca	Abreviatura	Gasto de diseño, en l/s
San Salvador Norte	SSN	1,191.41
San Isidro Dos Noreste	SIDNE	1,275.33
San Isidro Dos Centro	SIDCN	184.34
San Isidro Dos Noroeste	SIDNO	510.69
San Isidro Dos Sureste	SIDSE	1,051.71
San Isidro Dos Suroeste	SIDSO	280.11

#### Etapa 5. Diseño preliminar de las obras de alivio

El cálculo de la sección del área hidráulica de cada uno de los canales de drenaje se efectuó, también, para cada una de las seis subcuencas que conforman las zonas de lomeríos que existen tanto al sur como al norte del área plana con orientación este-oeste donde se encuentran establecidos los poblados. Las dimensiones se calcularon mediante el mismo procedimiento para drenes de sección triangular que se presenta en el Anexo VII del Informe Final 2002 de la Comisión Nacional del Agua correspondiente al denominado Distrito de Temporal Tecnificado No. 24 Zona Sur del Estado de Yucatán.

Para el cálculo de las dimensiones de la sección triangular de cada obra de drenaje se aplicó la fórmula de Manning expresada en la forma siguiente:

$$Q = (A * R^{0.667} * S^{0.5}) / n$$

Donde:

Q = gasto de la sección, en m<sup>3</sup>/s

A = área de la sección, en m<sup>2</sup>

R = radio hidráulico de la sección en m

S = pendiente de la sección, en m/km

n = coeficiente de rugosidad que depende del material, adimensional

Empleando la ecuación de Manning y los gastos de cada subcuenca se obtuvieron las dimensiones de los drenes que se presentan en la Tabla 2, que corresponde a la rama norte de captación y drenaje mediante la cual se interceptan y canalizan, hacia el resumidero de Chan Dzinup, los escurrimientos provenientes de las subcuencas situadas al norte de los poblados de la cuenca y la Tabla 3 en la que se presentan las dimensiones de los drenes que corresponden a las obras de la rama sur.

**Tabla 2. Dimensiones de los drenes de la rama norte**

Subcuenca	Profundidad	Ancho de corona	Longitud	Pendiente
SSN	1.7	5.0	1,250	0.0005
SIDNE	2.2	6.7	1,400	0.0005
SIDCN	2.3	7.0	850	0.0005
SIDNO	2.5	7.5	1,750	0.0005

Tabla 3. Dimensiones de los drenes de la rama sur

Subcuenca	Profundidad	Ancho de corona	Longitud	Pendiente
SIDSE	1.7	5.0	650	0.0005
SIDSO	1.8	5.3	3,700	0.0005

Mediante el mismo procedimiento deberá diseñarse la obra de drenaje de 1 kilómetro de longitud para canalizar, de la población de San Salvador a la sabana de Mac Yan, un gasto de aproximadamente 600 l/s.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Información recabada

La información recabada desde el inicio del proyecto y durante el desarrollo del mismo tuvo una gran importancia para el logro de los objetivos del proyecto. Esta información está contenida en libros y publicaciones; informes y artículos; cartografía de INEGI; resultados de exploración, muestreo y mediciones de campo y laboratorio, generados expresamente para el proyecto; y, finalmente el testimonios de los pobladores y autoridades municipales locales.

### Discusión de la propuesta técnica y científica del proyecto

La conclusión principal de la investigación que genera, asimismo, la recomendación más importante del proyecto, dada la circunstancia de que las cuencas y áreas inundables son del tipo interior o endógeno, puede expresarse en los términos siguientes:

“El denominado gasto de diseño, estimado utilizando los coeficientes de evaporación y de infiltración de los suelos y vegetación de cada región analizada, deberá encauzarse sistemáticamente hacia las cavidades cársticas subterráneas existentes a través de los resumideros naturales habilitados para ese propósito o a través de pozos o lumbreras perforadas *ex profeso* en sitios previamente seleccionados utilizando métodos geofísicos de exploración”

Esta conclusión no es cien por ciento original puesto que en las últimas dos o tres décadas, en la región estudiada, se han utilizado los

resumideros naturales que existen en la zona como destino final del agua de algunos sistemas de drenaje de áreas agrícolas. Algunos de estos resumideros cársticos son muy conocidos, como el de Noh Becan utilizado desde hace muchos años para ese fin.

Es justo hacer notar, que la conclusión formulada, es nueva, en cuanto formula la recomendación de que “sistemáticamente” se utilicen las cavidades cársticas subterráneas para el desagüe o drenaje final del agua producto de los escurrimientos superficiales ya sea a utilizando pozos o lumbreras excavadas para este propósito o a través de los resumideros cársticos naturales.

Los fundamentos científicos y técnicos que avalan y que le otorgan la factibilidad a la presente propuesta, son primero, el conocimiento geológico que indica la existencia de rocas calcáreas con carsticidad generalizada, en segundo término, niveles freáticos profundos y, en tercer lugar, la existencia de un gran número de resumideros o desagües naturales. Desde luego, que es necesario realizar una prospección gravimétrica del tipo de sensor remoto u otro procedimiento geofísico avanzado para posicionar y dimensionar las importantes oquedades subterráneas de esta región.

Es fácil de comprender que el trabajo más delicado implicado en la propuesta de encauzar los escurrimientos excesivos hasta las cavidades cársticas subterráneas, es precisamente el de la detección de cavidades y definir su ubicación y dimensiones.

### Recomendaciones

En los párrafos que siguen se describen, en primer término, las recomendaciones de carácter general, y a continuación las acciones y obras que se recomiendan en la cuenca típica seleccionada.

Cabe señalar que el control absoluto de las inundaciones raramente es económicamente factible. Lo que comúnmente se busca es reducir los daños que las inundaciones causan hasta un mínimo que sea consistente con el costo involucrado.



### Recomendaciones de carácter general

- 1. Reducción de los escurrimientos máximos en las zonas vulnerables mediante vasos de almacenamiento.** Los vasos de almacenamiento para control de avenidas requieren tener incorporada una compuerta de control que permanece abierta hasta que los escurrimientos alcanzan la capacidad de los cauces de las corrientes naturales, dado que su función es almacenar una porción del gasto de la avenida máxima para reducir al mínimo el pico de este gasto en el sitio que se desea proteger.
- 2. Bordos y muros de defensa.** La erección de bordos y muros de defensa para evitar que las avenidas ocasionen daños, es uno de los métodos de protección contra las avenidas. Estas obras son esencialmente presas que se construyen paralelamente a las corrientes y arroyos. Cuando se trata de cuencas endorreicas se hacen transversales al cauce para evitar la inundación de la parte más baja de la cuenca. Los bordos son diques de tierra compactada mientras que los muros de defensa son generalmente construcciones de mampostería o concreto. Para el control de avenidas se utilizan con más frecuencia los bordos, dado que pueden construirse con costos relativamente más bajos utilizando, los materiales disponibles en el lugar, generalmente extraídos de bancos de préstamo paralelos a la línea del bordo. El material debe colocarse en capas y compactarse, con el material de menor permeabilidad del lado de la corriente. Por lo general, existe la disponibilidad de materiales arcillosos de baja permeabilidad para utilizar como núcleo impermeable, y es frecuente que se realicen como terraplenes homogéneos.
- 3. Derivación de avenidas hacia otras cuencas, corrientes o resumideros subterráneos, siempre que sea posible.** Una línea combinada de canales y bordos, por lo general, tiene que cruzar cauces o corrientes tributarias, entonces, se tienen dos alternativas que dependen, de nueva cuenta, de la configuración topográfica de la cuenca y de los criterios económicos del caso: 1) puede llevarse la línea de derivación hacia aguas arriba o perpendicular al cauce tributario mediante un canal profundo para

ligarla con otra cuenca o corriente o 2) bloquear el cauce tributario mediante la construcción de un bordo con una estructura de control que sólo se abre para encauzar la corriente hacia la línea de proyecto.

- 4. Habilitación y mantenimiento de pozos y lumbreras de drenaje mediante obras de protección como brocales y obras de toma.** En cuencas interiores o endorreicas, como las de la región estudiada, deberán diseñarse y llevarse a cabo brocales, obras de toma y desarenadores en el sitio de los resumideros naturales o en los pozos o lumbreras hechos a propósito en zonas en las que se haya comprobado la existencia de cavidades comprobadas.
- 5. Mantenimiento y desazolve frecuente de las obras de encauzamiento como bordos y canales.** Los bordos y canales deben pasar por una inspección anual, antes de la temporada de tormentas, con el fin de buscar evidencias de la acción de animales y vegetación, socavación en los bordos, señales de tubificación, asentamientos y erosión, y azolvamiento en los canales.
- 6. Manejo de la cubierta vegetal y su efecto sobre las avenidas en concordancia con el aprovechamiento de las tierras agrícolas.** Existe una gran polémica con respecto a la influencia de la cubierta vegetal sobre las avenidas. Por ejemplo, es bien sabido, que la deforestación incrementa el volumen de los escurrimientos y que la cubierta vegetal quita humedad al suelo por el aumento de la transpiración. Por tanto, una espesa o densa cubierta vegetal siempre es conveniente.
- 7. Manejo racional de la superficie de inundación.** Todo proyecto para protección contra las inundaciones debe realizarse con base en los estudios siguientes:
  - Zonificación de las superficies de inundación
  - Evaluación de la extensión, duración y frecuencia de la inundación
  - La utilización y rendimiento actual o potencial de las áreas a proteger
  - La comparación de los costos del proyecto de protección contra los costos de reubicación o desocupación.

- Análisis de costos de un programa de seguros contra inundación.

### Recomendaciones para la cuenca de Chan Dzinup – San Salvador

Estas recomendaciones se lograron formular al término de la aplicación del procedimiento completo de cálculo de avenidas y dimensiones de obras de contención, desvío, y conducción, tal como se presenta en la sección Metodología.

Con las obras superficiales recomendadas a continuación se pretende primero contener y enseguida desviar y conducir parte de los escurrimientos de la cuenca arriba señalada, a un resumidero natural, típico de la región cercano a la población de Chan Dzinup y la otra parte de los

escurrimientos a la cuenca correspondiente a la amplia sabana de Mac Yan.

Estas obras superficiales, en su conjunto, forman un sistema de contención, desvío y conducción del cual se proporcionan, en este informe, únicamente los lineamientos preliminares para diseño y construcción.

Cada uno de los canales que integran estas obras superficiales son los descritos en cuanto a dimensiones y longitud en las tablas que se presentan en la Metodología. Los bordos de contención describen a continuación, proporcionando de cada uno los siguientes las dimensiones (longitud, área hidráulica y pendiente). La ubicación de ambos tipos de obras se indica en la Fig. 3.

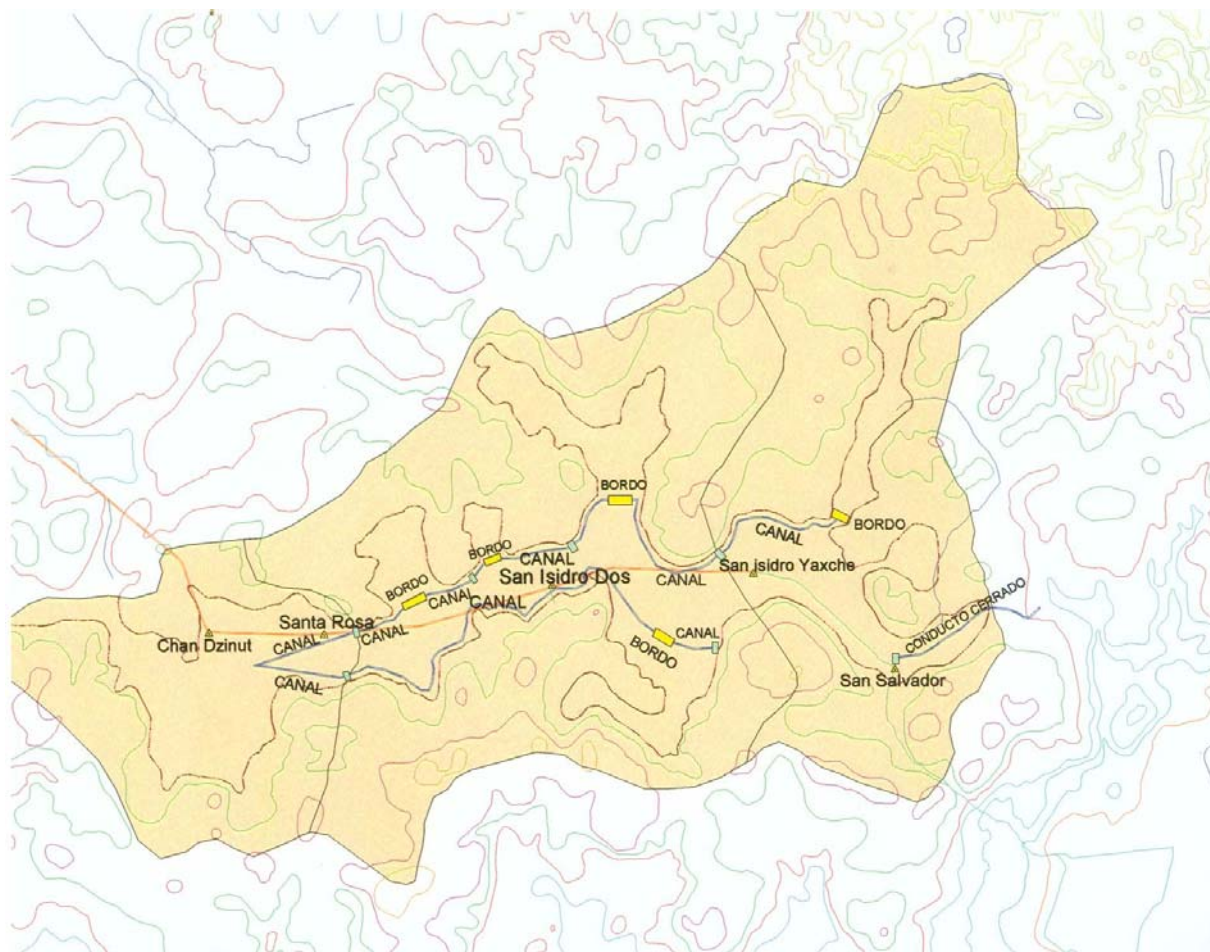


Fig. 3 Ubicación de las obras superficiales en la cuenca de Chan Dzinup

## Espinosa / Ingeniería 8-2 (2004) 67-79

Son tres las ramas o brazos de contención y conducción que constituyen el sistema completo que se recomienda: 1) La rama norte que se inicia en la parte baja de la subcuenca ubicada al norte de San Salvador denominada SS Loma Norte. A partir de este sitio, hacia el poniente termina su recorrido en el resumidero natural localizado 400 m al sureste del poblado de Chan Dzinup, 2) La rama sur que se inicia en la parte más baja de la subcuenca que está ubicada al sur de los poblados San Isidro dos, denominada SID Loma SE, que se dirige al poniente y termina su recorrido en el mismo resumidero arriba mencionado, y 3) La rama que conduce los escurrimientos de la subcuenca del poblado de San Salvador hacia el sur

que conducirá los escurrimientos primero hacia el sur y después al sureste desembocando en la cuenca de Mac Yan.

A continuación se describen los bordos de contención del sistema de drenaje propuesto.

### Obras del sistema de contención, desvío y conducción de la cuenca Chan Dzinup – San Salvador.

Las dimensiones y su ubicación se presentan en las Tablas 4 y 5, respectivamente.

Tabla 4. Dimensiones de los bordos

Rama	Subcuenca	Profundidad (m)	Ancho de corona (m)	Longitud (m)
Norte	SSN	1.6	2.0	100
“	SIDNE	1.6	2.0	150
“	SIDCN	1.6	2.0	125
“	SIDNO	1.6	2.0	230
Sur	SIDSE	1.6	2.0	220

Tabla 5. Ubicación de los bordos

Rama	Subcuenca	Ubicación
Norte	SSN	Al sur de la subcuenca
“	SIDNE	“
“	SIDCN	“
“	SIDNO	“
Sur	SIDSE	Al norte de la subcuenca

La rama San Salvador – Mac Yan del sistema propuesto se recomienda que sea una conducción en forma de canal abierto o conducto cerrado que se inicie al oriente del poblado de San Salvador y se dirija hacia el sur, conectándose a la sabana de Mac Yan en su frontera noroeste. Este ramal tendría una longitud aproximada de 1.0 kilómetro de la cual 600 m podrían quedar como canal abierto con un gasto de diseño de 600 litros por segundo.

## RECONOCIMIENTOS

Participaron en el proyecto los estudiantes Suheil Fitzmaurice Escamilla y Wilberth Jesús Góngora Pérez, ambos egresados de la FIUADY.

Las instituciones que colaboraron con la FIUADY fueron: 1) La Comisión Nacional de Agua (CNA), 2) La Secretaría General del Gobierno de

Estado de Yucatán, a través de la Dirección de la Unidad de Protección Civil y 3) La Presidencia Municipal de Tekax, a través del personal de la Dirección del Desarrollo Integral de la Familia del

municipio. El proyecto fue financiado por el “Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica CONACYT – Gobierno del Estado de Yucatán”

## REFERENCIAS

CNA (2002) “Informe final. Anexos VI y VII”, Distrito de temporal tecnificado No. 24, Zona sur de Yucatán, Mérida, Yucatán

CNA (1978) “Cálculo del clima de acuerdo al segundo sistema de Thornthwaite”, Publicación Núm 7, Segunda Edición, Subdirección de Agrología, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, D. F.

CNA (1979) “Cuadro de clasificación del clima de acuerdo al segundo sistema del Dr. Thornthwaite. Estudio agrológico semidetallado”, Correspondiente a la estación climatológica de Becanchén, años 1951-1973, Subgerencia Regional de Operación, Gerencia Regional de la Península de Yucatán, Mérida, Yucatán

CNA (1979) “Gráfica climatológica de Thornthwaite. Estudio agrológico semidetallado”, Correspondiente a la estación climatológica de Becanchén, años 1951-1973, Subgerencia Regional de Operación, Gerencia Regional de la Península de Yucatán, Mérida, Yucatán

CNA (1979) “Descripción general de los suelos localizados en el cono sur del Estado de Yucatán. Estudio agrológico semidetallado”, Subgerencia Regional de Operación, Gerencia Regional de la Península de Yucatán, Mérida, Yucatán

CNA (2003) “Datos de precipitaciones mensuales en tres estaciones situadas al sur del Municipio de Tekax”, Información en diskette, Subgerencia Regional de Operación, Gerencia Regional de la Península de Yucatán, Mérida, Yucatán

CNA (2004) “Registros diarios en los meses de junio a septiembre de 2002 en tres estaciones situadas al sur del Municipio de Tekax”, Subgerencia Regional de Operación, Gerencia Regional de la Península de Yucatán, Mérida, Yucatán

Espinosa, L., Cerón, M. y Sulub, A. (1997) “Compendio de las propiedades físico-mecánicas de la roca caliza del Estado de Yucatán, Informe final, Proyecto de investigación No. DGICSA 010191-02-00-027, Facultad de Ingeniería, UADY, Mérida, Yuc., México

Espinosa, L., Cerón, M. y Sulub, A. (1998) “Limestone rocks of the Yucatan Peninsula. Description of the lithology and physical properties based on the results of exploration, investigation and laboratory. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol. 35, No. 415, Paper 132, Elsevier Science Ltd., Kidlington, Oxford OX5 1GB, Inglaterra

Linsley, R. K. y Franzini, J. B. (1964) “Ingeniería de los recursos hidráulicos”, Editorial C.E.C.S.A., México, D. F.

Milanovic, P. T. (1981) “Karst hidrogeology”, (Utilization and Protection of Water Resources in Karst, Trebinje, Yugoslavia), Water Resources Publications, Littleton, Colorado

Sánchez, I., Pérez, J. y Espinosa L. (1998) “El método *geofísico* eléctrico. Una alternativa en estudios geotécnicos para la *detección de cavernas*”, Revista Ingeniería, Facultad de Ingeniería, UADY, Año 1998. Vol. 2, No. 1, Mérida, Yuc., México

SARH (1982) “Manual para la estimación de avenidas máximas en cuencas y presas pequeñas”, Subsecretaría de infraestructura hidráulica, Dirección general de obras hidráulicas y de ingeniería agrícola para el desarrollo rural, México, D. F.

Sie Ling Chiang (1971) "Clasificación hidrológica. Potencial de escorrentía" Journal of Hydrology, Vol 13, 1971, pp 54-62

Springall C., G. y Espinosa G., L. (1972) "El subsuelo de la Península de Yucatán", Memoria de la VI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, México, D. F.

Springall G., R. (1982) "Hidrología. Primera parte", Publicación interna del Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de México", México, D. F.

SRH (1969) "Pequeños almacenamientos. Instructivo para estudios, proyecto y construcción", Jefatura de irrigación y control de ríos, Plan nacional de pequeña irrigación, México, D. F.