

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LAS INUNDACIONES EN TIJUANA (ENERO DE 1993). USO INTEGRADO DE PERCEPCIÓN REMOTA Y SIS- TEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

**Gerardo Bocco, Roberto A. Sánchez
y Hugo Riemann***

RESUMEN

En este trabajo se analiza el efecto de las lluvias extraordinarias de enero de 1993 sobre la ciudad de Tijuana. Para su análisis, se recurre a la elaboración de un sistema de información geográfica de la ciudad. De la dinámica de los procesos geomorfológicos se identifican, mediante foto-interpretación, zonas de erosión, remoción en masa, depositación y zonas de anegamiento. La dinámica urbana se describe en términos de densidad de la población, características de vivienda, servicios públicos e ingresos. De manera complementaria, se analiza, mediante un modelo de probabilidad de eventos extremos y datos diarios sobre la precipitación ocurrida durante los 45 años más recientes, la probabilidad de retorno de una lluvia de intensidad similar.

Los resultados de los análisis muestran que la gran vulnerabilidad de Tijuana a este tipo de fenómenos naturales se debe en gran parte al efecto conjunto de la localización de la ciudad y la falta de un esquema de planeación adecuado. En ese sentido, este trabajo pretende ser una contribución.

ABSTRACT

This article analyzes the effects of the extraordinarily heavy rains that fell on Tijuana in January 1993. For the analysis, the authors developed a geographical information system for the city, using photointerpretation to identify the dynamics of geomorphological processes: erosion, soil shifts, redepositing of soils, and flooding. The authors also consider the urban dynamics that enter into the process-population density, housing patterns, public services, and income.

Complementing this focus, the authors employ a probability model for extreme weather patterns and daily precipitation over the last forty-five years to examine the likelihood that similarly heavy rainfall will recur. The results of this analysis demonstrate that Tijuana's marked vulnerability to this type of natural phenomenon is due in large part to the combination of the city's placement and the lack of an adequate urban planning schema. It is hoped that this work will contribute to improved preparation against future disasters of this type.

* Los autores son investigadores del Departamento de Estudios Urbanos y del Medio Ambiente de El Colegio de la Frontera Norte. Se les puede enviar correspondencia a Blvd. Abelardo L. Rodríguez núm. 2925, Zona del Río, Tijuana, Baja California, México. Tels.: 30 04 11, 30 04 12 y 30 04 18.

Introducción

LAS inundaciones ocurridas en Tijuana durante el mes de enero de este año nos han recordado de manera abrupta la extensión y gravedad de las deficiencias urbanas de nuestra ciudad. El elevado volumen de precipitación de esos días, inesperado sin duda, pero susceptible de repetirse, puso de manifiesto la vulnerabilidad de Tijuana ante situaciones de emergencia causadas por fenómenos naturales. Las deficiencias urbanas han sido generadas por el crecimiento explosivo de la ciudad durante las más recientes décadas. Los rezagos acumulados en estructura urbana y en servicios públicos son el resultado, en gran medida, del desnivel entre las políticas federales para la creación de infraestructura económica (abasto de energía, áreas industriales, vías de comunicación, etcétera) y las políticas federales para la construcción de infraestructura social (vivienda, servicios públicos, incluyendo el drenaje pluvial, transporte urbano, etcétera), durante las décadas de los años sesenta y setenta. El crecimiento explosivo de la maquiladora en la década de los años ochenta agravó aún más esa situación. Tijuana cuenta, además, con el inconveniente de haber crecido en una zona con condiciones fisiográficas difíciles para el crecimiento urbano, es decir, con poca superficie urbanizable a bajo costo.

Pero no podríamos atribuirle únicamente al rápido crecimiento de la población y a la expansión física de la ciudad, la diversidad de problemas urbanos que actualmente enfrenta Tijuana. La ausencia de cualquier esfuerzo serio de planeación ha contribuido de manera significativa a agudizar los rezagos urbanos y a expandir sus consecuencias negativas para sus habitantes y para el sector productivo de la ciudad. Las inundaciones de enero de 1993 fueron una muestra brutal y repentina del elevado costo social, económico y ambiental que implica el crecimiento desordenado y la alta vulnerabilidad a emergencias naturales que éste genera.

Preocupados por ese contexto, en este artículo describimos la implantación de un sistema de información geográfica para Tijuana, utilizando técnicas de percepción remota, así como su verificación en la evaluación del impacto de inundaciones catastróficas sobre el tejido urbano en enero de 1993.

La vulnerabilidad de los países en desarrollo en situaciones de emergencias naturales

La importancia del impacto de los desastres naturales provocó que la Organización de las Naciones Unidas (ONU) declarase los años noventa como la década para la reducción de éstos.¹

En los años setenta y ochenta los desastres naturales causaron la pérdida de casi tres millones de vidas y afectaron severamente a 820 millones de personas en el mundo.² Al final de los años setenta se estimó que el costo para la economía global de los desastres naturales era de al menos 40 000 millones de dólares por año.³ Entre los diversos tipos de desastres naturales sobresalen las inundaciones como el más recurrente a nivel global; éste representa 32 por ciento de todos los desastres naturales registrados entre 1974 y 1984;⁴ sin embargo, existen grandes variaciones en cuanto a los daños económicos y el número de víctimas según el tipo de desastre y el tipo de sociedad en donde éste ocurre. Se estima que 90 por ciento de las muertes relacionadas con desastres naturales ocurre entre las dos terceras partes de la población del mundo que habita en los países en desarrollo, mientras que cerca de las tres cuartas partes de los daños económicos se concentran en los países desarrollados;⁵ sin embargo, cuando esas pérdidas económicas son medidas en términos de su proporción del Producto Nacional Bruto (PNB), son entre 20 y 30 veces mayores en los países en desarrollo que en los países desarrollados.⁶ Aún dentro de estos últimos, los más pobres son los

- 1 El objetivo para la década, estipulado en la declaración 44/236 de la ONU, es “reducir a través de la acción Internacional, principalmente en los países en desarrollo, la pérdida de vidas, daños a propiedades y disrupciones sociales y económicas causadas por desastres naturales, como terremotos, inundaciones, tsunamis, deslaves, erupciones volcánicas, sequías, desertificación y otras calamidades de origen natural.”
- 2 Véase G. W. Housner, *Confronting Natural Disasters. An International Decade for Natural Hazard Reduction*. Washington, National Academy Press, 1987.
- 3 Véase I. Burton, R. Kates y G. F. White, *The Environment as Hazard*. New York, Oxford University Press, 1978.
- 4 Las inundaciones son un problema particularmente importante en Estados Unidos. Más del 80 por ciento de todas las declaraciones de desastre en el periodo 1974-1984 fueron ocasionadas por inundaciones.
- 5 Algunos autores estiman que hay más de 3 000 muertes por evento de desastres naturales en países en desarrollo comparado con menos de 500 muertes por evento en países desarrollados.
- 6 Véase D. Zupka, “Economic Impact of Disasters” en *UNDRO News* January/February, pp. 19-22.

que sufren las mayores consecuencias de los desastres naturales y los que cuentan con menos recursos para sobreponerse a ellos.

La desigual distribución de muertes y daños económicos entre sociedades ricas y pobres es un reflejo más de la extrema polarización en la concentración de la riqueza en el mundo. En el caso de las inundaciones, las disparidades en la vulnerabilidad de las sociedades es particularmente evidente. Un ejemplo claro son las inundaciones en Estados Unidos, India y Bangladesh, durante 1993. Mientras que en Estados Unidos las inundaciones a lo largo del río Mississippi, clasificadas como las peores de su historia (al menos en los registros de los cien años más recientes), ocasionaron pérdidas económicas superiores a los 40 000 millones de dólares y la muerte de dieciséis personas, en el mes de julio de ese mismo año las inundaciones en India y Bangladesh ocasionaron la muerte de más de 2 000 personas.⁷ Un aspecto central para contrarrestar la vulnerabilidad de los países en desarrollo a este tipo de desastres naturales es poner en práctica eficientes sistemas de alarma y prevención. Algunos autores reportan⁸ que casos de estudio en países en desarrollo muestran una reducción de hasta 40 por ciento en las pérdidas económicas por inundaciones cuando adecuados sistemas de alarma y prevención se ponen en práctica.

De acuerdo con diversos autores, entre las zonas más vulnerables a inundaciones se encuentran las cuencas pequeñas de rápidos escurrimientos, principalmente en zonas áridas o semiáridas, en donde hay una combinación de abrupta topografía, poca vegetación y precipitaciones intensas de poca duración. Una situación similar puede ocurrir en valles estrechos y en áreas altamente urbanizadas con rápidos escurrimientos.⁹ Vale la pena enfatizar el caso de las áreas urbanas. K. Smith¹⁰ considera que el proceso de urbanización incrementa la magnitud y la frecuencia de las inundaciones en cuatro aspectos.

7 El problema de las inundaciones es particularmente grave en Asia, en donde este tipo de eventos dañan cerca de cuatro millones de hectáreas de tierra y cultivos y la vida de más de diecisiete millones de personas cada año (véase D. K. Smith, "Natural Disaster Reduction: How Metereological and Hidrological Services Can Help" en *Publication*, núm. 722. Geneva, World Metereological Organisation, 1989).

8 Keith Smith, por ejemplo, en *Environmental Hazards. Assessing Risk & Reducing Disaster*. London, Routledge, 1992.

9 Algunos estudios estiman que la pérdida de vidas por ahogamiento en los países tropicales es el resultado de Intensa precipitación en pequeños depósitos *aguas arriba* de áreas urbanas pobremente drenadas.

10 Keith Smith. Op. cit.

1) La creación de superficies altamente impermeables, como techos y calles, inhibe la infiltración del agua ocasionando que una alta proporción de la precipitación se transforme en escurrimientos.¹¹

2) Superficies hidráulicamente suaves, conformadas por una densa red de drenes superficiales y de drenajes subterráneos, conducen el agua rápidamente a los canales de desagüe. Esto incrementa la velocidad de gestación de la inundación al reducir a la mitad el periodo de *lag* entre la tormenta pluvial y el flujo pico.

3) En el caso de ciudades aledañas a un río, las obras construidas sobre sus bordes (puentes, áreas recreativas, etcétera) frecuentemente reducen su capacidad de transporte del agua. Esto puede incrementar la frecuencia con que altos flujos de agua desbordan el cauce del río.

4) Debido a que la urbanización incrementa los escurrimientos de agua en el área urbana, muchos de los drenajes se saturan frecuentemente.

También debe tomarse en cuenta que la deforestación a lo largo de las cuencas hidráulicas, e incluso al interior de las zonas urbanas, incrementa los escurrimientos de agua y la depositación de sedimentos en los canales colectores, decreciendo así su capacidad de transporte.¹²

La ciudad de Tijuana

Localizada sobre la línea fronteriza (Figura 1), Tijuana ha sido durante los cuarenta años más recientes una de las principales áreas de migración de trabajadores indocumentados hacia Estados Unidos. Su colindancia con California ha constituido también un aspecto central para el desarrollo del comercio y los servicios en la ciudad, entre los que destaca el turismo, y, durante las décadas más recientes, el crecimiento industrial.

Debido a esas características, el crecimiento urbano ha sido explosivo y ha estado fuera de un marco amplio de planeación y control. De acuerdo con los censos nacionales de población,¹³ la

11 G. E. Hollis considera que pequeñas inundaciones pueden incrementarse hasta diez veces debido a la urbanización. Cfr. "The Effect of Urbanisation on Floods of Different Recurrence" en *Water Resources Research*, 1975,11:431-4.

12 Algunos estudios sugieren que en cuencas pequeñas pueden incrementarse hasta cuatro veces los máximos niveles de escurrimiento en conjunto con concentraciones de sedimentos suspendidos hasta 100 veces superiores a las de los ríos en donde el área forestada de la cuenca no ha sido alterada. Véase Keith Smith, *Op. cit.*

13 INEGI, 1980 y 1990.

población de Tijuana se incrementó de 429 500 habitantes en 1980 a 747 381 en 1990. Tijuana es una ciudad con un nivel del espacio característico de las ciudades latinoamericanas; su rápida expansión física ha estado basada en el tradicional proceso de invasión de la tierra, asegurar su tenencia, lograr el abasto de servicios públicos para la posterior incorporación de esas zonas al mercado inmobiliario. Al igual que en otras ciudades de México y América Latina, en Tijuana los invasores originales con frecuencia son desplazados a otras zonas periféricas con menor plusvalía, para iniciar una vez más el mismo ciclo. Esta forma de apropiación del espacio se muestra claramente en el crecimiento histórico de la ciudad (rápido crecimiento de la periferia urbana, aun en zonas de topografía accidentada), y ha sido un aspecto determinante en la conformación de la estructura de la ciudad actual.

Los datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)¹⁴ indican que la mayoría de la población de Tijuana la conforman jóvenes, solamente 4 por ciento de ésta es mayor de 60 años. 35 por ciento es económicamente activa, de sus integrantes el 98 por ciento se encuentra ocupado. El sector secundario emplea aproximadamente al 40 por ciento de la población ocupada, en tanto que el sector terciario ocupa a casi el 60. El primario es casi inexistente.

De acuerdo con INEGI, existen unas 155 700 viviendas particulares, habitadas en promedio por 4.5 personas cada una. Al menos 50 por ciento de las casas tienen paredes de tabique, 60 por ciento tienen piso de cemento, 65 por ciento disponen de drenaje, 69 por ciento cuenta con servicio de agua y 84 por ciento, con electricidad. 62 por ciento de las viviendas son propiedad de quienes las habitan.

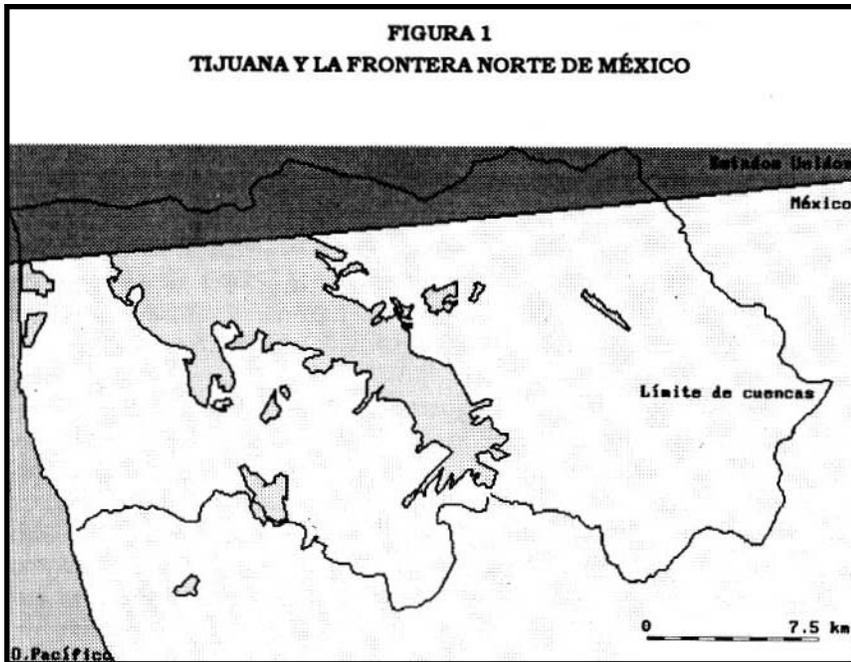
El área urbana es de 18 800 hectáreas¹⁵ con una densidad de población de 37 habitantes por hectárea. La altitud varía entre el nivel del mar y los 500 metros sobre el nivel del mar (msnm); 80 por ciento de la ciudad se encuentra entre 0 y 200 msnm. Casi tres cuartas partes se localizan en laderas con una inclinación de menos de 15 por ciento, y 5 por ciento de la ciudad se localiza en laderas con pendientes de más de 30 por ciento de inclinación.

65 por ciento del área urbana se encuentra sobre materiales fluvio-marinos pre-holocénicos (terrazas de areniscas y conglomerados), la mayor parte depositados en el delta pleistocénico del

14 INEGI, 1990.

15 *Op. cit*

antiguo río Tijuana. 20 por ciento de la ciudad se asienta sobre depósitos fluviales recientes (aluviones de la llanura fluvial y las terrazas del río Tijuana actual). Ambas unidades tienen suelos arenosos; el 15 por ciento restante se localiza sobre rocas volcánicas (flujos lávicos ligeramente ondulados), con suelos más arcillosos.



La mayor parte de la ciudad se desarrolló sobre terrenos no aptos para la urbanización. Familias de muy bajos recursos ocupan laderas muy empinadas y fondos de valles expuestos a inundaciones repentinas. El drenaje pluvial es inapropiado o inexistente, incluso en zonas de mayores recursos económicos. La tala en laderas forestadas ocurre sin control; además, existe micro-sismicidad asociada a fallas geológicas que provoca deslizamientos y movimientos del terreno en varios sectores de la ciudad.¹⁶

16 L. Delgado (investigador del CICESE). Información recabada por medio de comunicación personal en 1993.

De acuerdo con la clasificación de Köppen (modificada por E. García),¹⁷ el clima es seco estepario, templado con verano cálido, extremoso con precipitaciones (invernales) de 270 milímetros (mm) en promedio. La vegetación natural es la típica flora mediterránea de la costa californiana con arbustos y pastizales.

En enero de 1993 ocurrieron precipitaciones extraordinarias (50 mm en menos de 24 horas, 210 mm en catorce días), que desencadenaron inundaciones severas en Tijuana. Se registraron más de 40 muertos, se produjeron daños por varios millones de dólares y se paralizó la vida de la ciudad durante casi un mes. Estos hechos pusieron de manifiesto los problemas ambientales de Tijuana e impulsaron intentos de racionalizar el desarrollo urbano. El SIG que se describe en este artículo se formula en esta línea de acción.

El crecimiento de Tijuana ha presentado el siguiente patrón durante los veinte años más recientes. Parte importante de ese crecimiento se ha orientado hacia el norte en la zona de la Mesa de Otay. Ésta constituía la reserva territorial plana más abundante para absorber el crecimiento de Tijuana. Debido a ello, un considerable número de plantas industriales y de nuevos conjuntos habitacionales de clase media y colonias populares se han localizado en esa zona.

Hacia el este, en la zona de El Florido y el ejido Mariano Matamoros, se encuentra la segunda reserva territorial más importante para Tijuana. El tipo de asentamientos en esta zona ha sido de ingreso medio bajo y popular, pero de acuerdo con el plan de desarrollo urbano se espera que buena parte del crecimiento futuro de la ciudad, una vez saturada la Mesa de Otay, se oriente en esta dirección. Se prevé también un mayor crecimiento industrial en el futuro en esa zona.

En el oeste de la ciudad se desarrollaron varios fraccionamientos originalmente destinados a un mercado para viviendas de ingreso alto y medio (Playas de Tijuana y El Mirador); sin embargo, aledaño a esas zonas se construyó un número de viviendas de interés social. Otra parte del crecimiento urbano en esta zona se ha dado en las partes con topografía accidentada en la zona de cañones (las colonias Rancho Las Flores, Los Laureles, San Ángel, etcétera). Se trata de zonas de vivienda popular y asentamientos irregulares. Las partes planas al oeste de Tijuana (zonas de Playas de Tijuana y El Mirador) se encuentran próximas a saturarse, por lo que el crecimiento urbano continúa en zonas de topografía accidentada.

17 Cfr. E. García, *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México, 1981, 252pp..

Hacia el sur de la ciudad el crecimiento se ha dado también en zonas con pendientes pronunciadas. Ésta ha sido la zona de crecimiento de las colonias populares (Obrera, Camino Verde, Fraccionamiento Guaycura, Sánchez Taboada, etcétera) y de asentamientos irregulares; es también la principal área receptora de migrantes. La difícil topografía del terreno en esta zona influye de manera importante en el bajo costo del suelo para uso urbano, y en reducir el posible conflicto y competencia entre los grupos de bajo ingreso y los grupos de capital local por el control del suelo; sin embargo, también dificulta considerablemente la dotación de servicios urbanos básicos (agua, drenaje, vialidades, alumbrado público, transporte, etcétera).

Por último, en el centro geográfico de Tijuana, en la parte baja a lo largo del cauce del río Tijuana, se desarrolló un programa de renovación urbana conocido como la Zona del Río. Este programa ha transformado en veinte años una parte importante de Tijuana en una zona de alta plusvalía conformando un nuevo centro comercial y de servicios profesionales en la ciudad.

Materiales y método para la creación de un sistema de información geográfica para Tijuana

El manejo y análisis de datos geográficos, así como el modelamiento de fenómenos biofísicos y socioeconómicos en áreas urbanas, pueden contribuir a la planeación urbana.¹⁸ Este proceso debe basarse en el conocimiento de las interacciones físicas y sociales a nivel del paisaje urbano. Son cruciales, entonces, los instrumentos de planeación y control del crecimiento urbano.

En este sentido, los sistemas de información geográfica, combinados con técnicas de percepción remota (como por ejemplo la fotointerpretación o el procesamiento digital de imágenes satelitarias), han sido utilizados frecuentemente para analizar problemas ambientales y espaciales en zonas urbanas.¹⁹ Estas

18 C. A. de Bruijn, "Spatial Factors in Urban Growth: Towards GIS Models for Cities In Developing Countries" en *ITC-Journal*, 1991-4:221-231.

19 Véase, entre otros, S. Openshaw, "Spatial Analysis and Geographical Information Systems: a Review of Progress and Possibilities" en H. J. Scholten y C. H. Stillwell (eds.), *Geographical Information System/or Urban and Regional Planning*, 1990, pp. 153-163; M. M. Flscher y P. Nijkamp, "Geographical Information Systems and Spatial Analysis" en *Aim. Reg. Set* 26:3-17, 1992; Treltz, et al., "Application of Satellite and GIS Technologies for Land-Cover and Land-Use Maping and the Rural-urban Fringe: A Case Study" en *Photog. Eng. and S.* 58, 1992, (4):439-448.

herramientas permiten analizar datos sobre el paisaje urbano y contribuir con información valiosa al modelamiento y la planeación de la dinámica urbana.

Debido a las resoluciones espacial y temporal requeridas por el tipo de problema analizado²⁰ se prefirió utilizar la interpretación visual de fotos aéreas estereoscópicas en lugar del procesamiento digital de imágenes de satélite. Se hizo hincapié además en las implicaciones de los periodos de retorno de las precipitaciones que causaron la catástrofe.

El SIG se organizó como una herramienta para guiar y coadyuvar a la planeación urbana. El sistema utilizado fue Integrated Land and Watershed Management Information System (ILWIS),²¹ un SIG relativamente fácil de operar, el cual funciona en computadora personal, y dispone de capacidades fotogramétricas en el ambiente vectorial así como de herramientas de modelamiento cartográfico poderosas en el ambiente de celdas (sobreposición aritmética, condicional y lógica de múltiples niveles de datos, entre otras). Los atributos de las entidades espaciales se manipulan en una base de datos tabular interna que permite realizar operaciones de tipo relacional.

Todos los datos fueron digitalizados y almacenados en el ambiente vectorial y luego convertidos al formato de celdas, con un tamaño de 75 m, a fin de facilitar el modelamiento cartográfico, basado esencialmente en la reclasificación y la sobreposición de mapas. Las bases de datos de entidades espaciales fueron conceptualizadas y organizadas para almacenar datos de paisaje: topografía, tipo de roca, red de drenaje hidrográfico y formas del relieve.

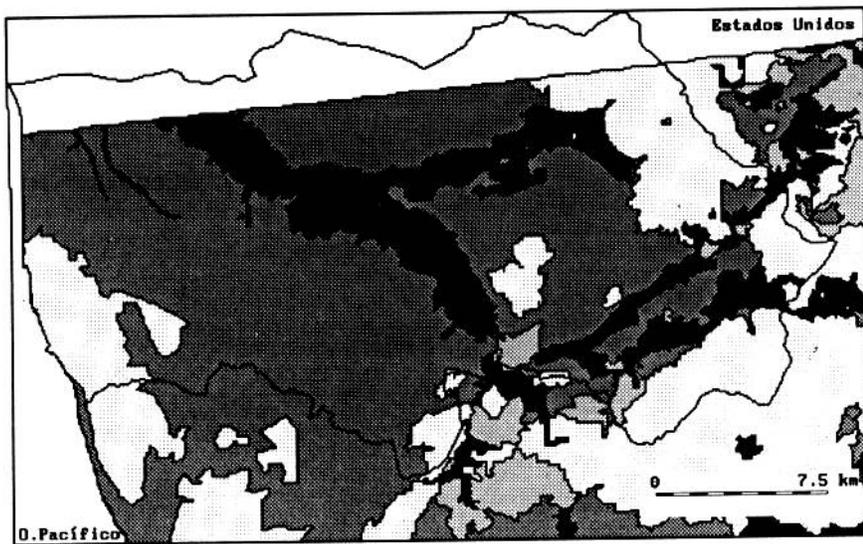
Los datos de altitud fueron capturados mediante digitalización de curvas de nivel maestras del mapa topográfico (INEGI, 1975; escala 1:50 000, con equidistancias de curvas cada 20 m). Con ellos se elaboró un modelo digital de elevación y de él se derivó un mapa de inclinación de las pendientes, utilizando métodos estándar de filtrado direccional. La litología (Figura 2) y la red de drenaje natural también se digitalizaron de mapas preexistentes (topográfico y geológico, a la misma escala). Ya que no existe información detallada de suelos (clases y su representación cartográfica), ésta se infirió a partir de la relación entre litología y forma del relieve.

20 Véase, por ejemplo, R. Welch, "Spatial Resolution Requirements for Urban Studies" en *Int J. Remote Sensing*, 1982, 3 (2): 139-146; L. R. Martin y P. J. Howarth, "Change Detection Accuracy Assessment Using SPOT Multispectral Imagery of the Rural-urban Fringe" en *Remote Sens. Environ.*, 1989,30:55-66.

21 C. R. Valenzuela, "ILWIS overview" en *ITC Journal*, 1988-1:3-14.

Las formas del relieve (Figura 3) (unidades del terreno),²² fueron delineadas sobre pares estereoscópicos de fotografías aéreas pancromáticas, en blanco y negro (escala aproximada 1:37 000) verificadas en campo. Las unidades del terreno son homogéneas desde el punto de vista del tipo de roca, características de las laderas (longitud, inclinación y forma) y densidad del drenaje. Se delimitan sobre la base de criterios morfogenéticos y morfométricos, utilizando claves fotográficas estándar (tono, textura, patrón, moteado, forma y sitio).

FIGURA 2
MAPA GEOLÓGICO GENERALIZADO

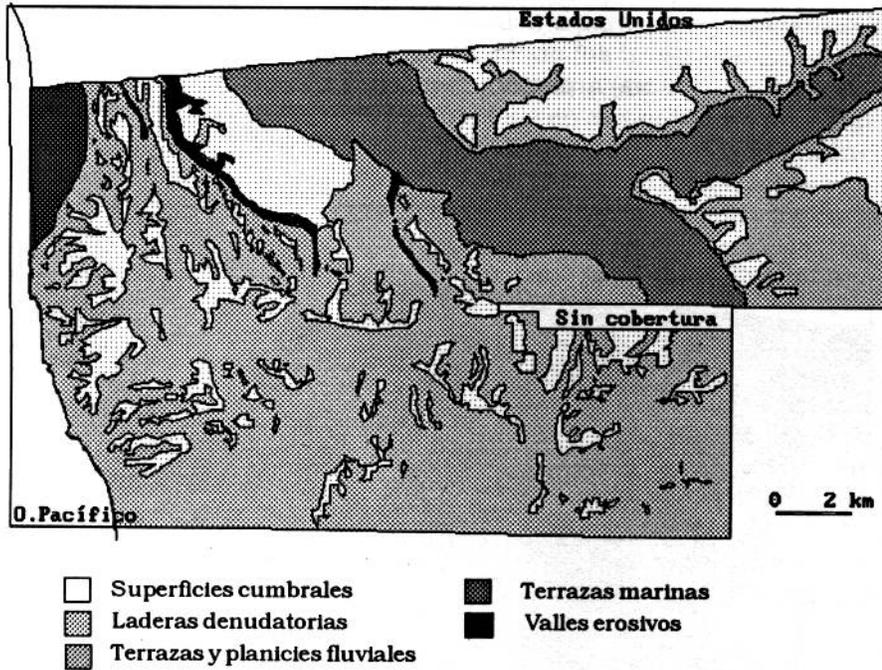


- | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Rocas extrusivas |  Areniscas y conglomerados |
|  Rocas intrusivas |  Aluvión |

22 A. Meijerink, "Data Acquisition and Data Capture Through Terrain Mapping Units" en *ITC-Journal*, 1988-1:23-44.

Las unidades del terreno fueron digitalizadas directamente de las fotos aéreas y corregidas geoméricamente utilizando al menos seis puntos de control por foto. La precisión fue de 75 m (error medio cuadrático), es decir el tamaño de la celda, correspondiente a 2 mm sobre las fotos (1:37 000).

FIGURA 3
MAPA GEOMORFOLÓGICO GENERALIZADO



La dinámica urbana fue descrita en términos de densidad de la población, características de vivienda, servicios públicos e ingresos. Todos estos datos, tomados del Censo Nacional de Población,²³ (INEGI, 1990) fueron integrados al SIG directamente en formato tabular. Su nivel de desagregación espacial correspondió al máximo ofrecido por el censo, es decir al de las áreas geoestadísticas básicas (AGEBs) (Figura 4).

23 INEGI, 1990.

Estas variables fueron “espacializadas”; es decir, se crearon mapas que describen, por ejemplo, la distribución espacial de zonas de igual densidad de la población, mediante la reclasificación (agrupamiento) de AGEBS según valores de población por área, almacenada en la base de datos de atributos.

Las áreas dañadas fueron interpretadas sobre fotografías aéreas pancromáticas blanco y negro (escala aproximada 1:15 000), tomadas inmediatamente después de ocurridas las inundaciones. Las imágenes y la verificación en campo permitieron la discriminación de tres tipos de daños, en realidad de tres tipos de procesos geomorfológicos diferentes: erosión y remoción en masa, depositación y anegamiento. Las unidades espaciales (polígonos) resultantes fueron digitalizadas, cuantificadas e integradas a la base de datos (Figura 5). Además se recopilaron 45 años de datos diarios de precipitación correspondientes a la estación estadounidense de Chula Vista (véase Anexo 1), localizada a menos de cinco kilómetros de la frontera binacional, frente a Tijuana. Estos datos fueron incorporados a la base de datos para modelar la probabilidad de su repetición de un evento de precipitación similar, utilizando un modelo de valores extremos, eficiente para la variabilidad de la lluvia en condiciones de semiaridez (distribución de probabilidad Gumbell).

Ya que se combinaron datos espaciales de diferentes fuentes, a varias resoluciones, el grado de exactitud esperado de este análisis debe corresponder al menor (1:50 000). La exactitud en cuanto a localización no será mayor que 2 mm a esta escala (100 m, ó 1 ha). Además, las bases de datos fueron inspeccionadas para garantizar un buen nivel de exactitud en cuanto a atributos.²⁴

Para poder evaluar el impacto de los eventos, las áreas dañadas fueron combinadas, por clase, mediante sobreposición cartográfica, con el tipo de roca, las unidades de terreno y la inclinación de la pendiente. Operaciones similares se realizaron con las variables socioeconómicas, expresadas espacialmente.

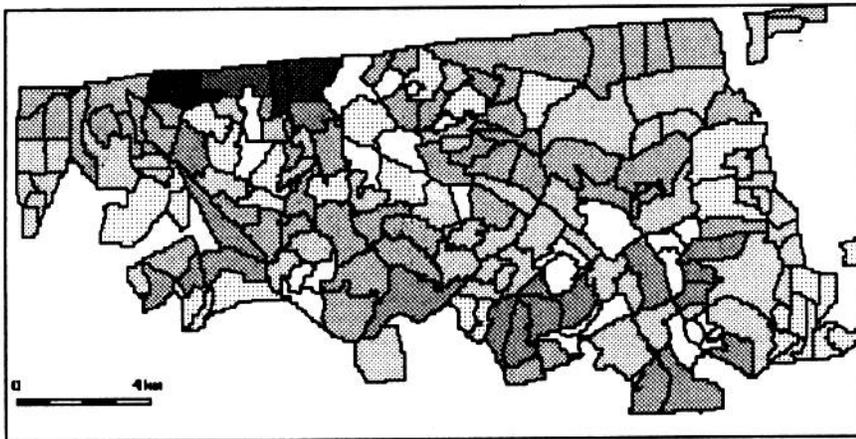
Probabilidades de repetición de la catástrofe

La precipitación del mes de enero de 1993 fue de 210 mm, con catorce días de lluvia (Anexo 1). Esta cantidad tiene, de acuerdo con el modelo ajustado, un periodo de retorno de 75 años; sin embargo, el mayor impacto sobre la ciudad de Tijuana fue ocasionado por una

24 S. J. Walsh, *et al.*, “Spatial Resolution Requirements for Urban Studies” en *Photog. Eng. and R.S.* 53, 1987, (10): 1423-1430.

lluvia continua de 50 mm. La probabilidad de ocurrencia, durante el mes de enero, de una precipitación mensual de entre 48 y 60 mm oscila entre 0.57 y 0.67, con un periodo de retomo de tres años y con uno a once días de lluvia por mes. No obstante, la probabilidad de ocurrencia de una precipitación mayor a 50 mm en un solo evento, con un periodo de retorno de tres años, es, de acuerdo con el modelo ajustado, de 0.63; es decir, el riesgo de una catástrofe similar es relativamente alto en cada época de lluvias.

FIGURA 4
ÁREAS GEOESTADÍSTICAS BÁSICAS



Resultados del análisis

El área dañada, según la interpretación de las fotos aéreas verificadas en campo, fue de 1960 hectáreas (10 por ciento del área urbana) (Cuadro I). 57 por ciento fue dañado por erosión-remoción en masa, 20 por ciento por depositación y el 23 restante, por anegamiento.

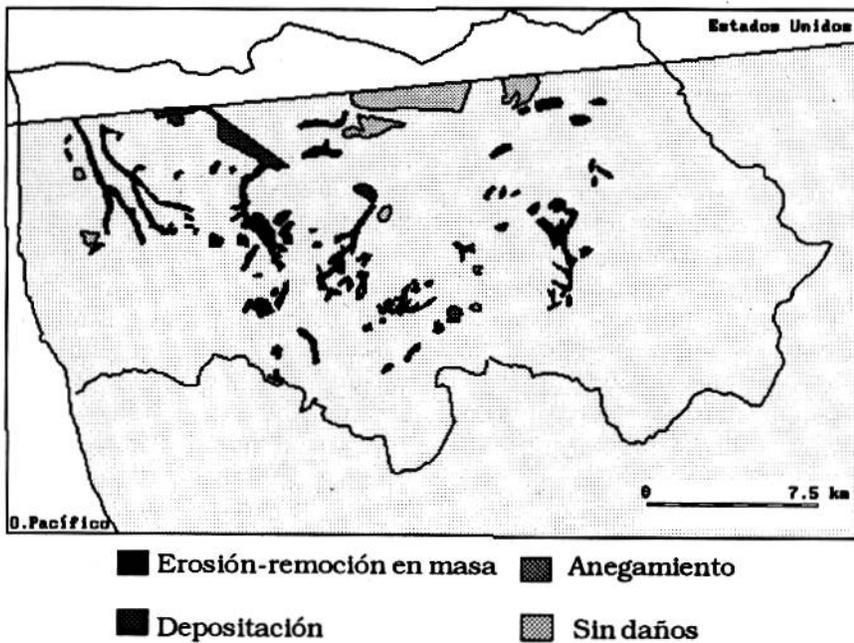
Los efectos de los daños sobre la población y vivienda se resumen en el Cuadro I. Los datos se obtuvieron mediante combinación (sobreposición) cartográfica de las áreas dañadas (por clase) y los mapas que describen espacialmente las variables seleccionadas. Se presupuso que la población y las viviendas están distribuidas en forma homogénea en las AGEBs.

Entre los resultados del Cuadro I sobresale la extensión de los daños por erosión (112 has), y el significativo número de personas potencialmente afectados (47 928). Comparado con los otros dos

tipos de daños, el número de habitantes en las zonas dañadas por erosión es proporcionalmente mayor que en las superficies dañadas por depositación (38 has y 15 206 personas) o por anegamiento (46 has y 17 098 personas). Al considerar las características de las viviendas destaca que las viviendas en las zonas con daños por erosión están por debajo del promedio de la ciudad en su abasto de servicios públicos básicos (agua entubada, drenaje y electricidad), mientras que las zonas por depositación están significativamente por arriba del promedio y, en el caso de anegamiento están cercanas al promedio urbano. Esto es un posible indicador de diferentes niveles socioeconómicos en las zonas con diversos tipos de daños. Otra diferencia en las características de la vivienda en las tres zonas es su régimen de propiedad. Mientras que en los daños por erosión arriba del 70 por ciento de las viviendas son propias, en la zona con daños por depositación sólo 40 por ciento de las viviendas son propias mientras que en las zonas afectadas por anegamiento constituyen casi 65 por ciento.

Al localizar en el espacio urbano el tipo de colonias afectadas por cada tipo de daño, se comprende con mayor claridad los indicadores arriba expuestos. Las zonas con daños por erosión están ocupadas en su gran mayoría por colonias populares con urbanización incompleta y localizadas en los valles erosivos (cañones) de la ciudad.

FIGURA 5
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ZONAS DAÑADAS



CUADRO I
EFFECTOS DE LOS DAÑOS (POR TIPO) SOBRE POBLACIÓN
Y VIVIENDA

	Erosión-remoción	Depositación	Anegamiento
Área dañada(has)	112	38	46
Viviendas (total)	10 328	3 936	3 515
-con drenaje	4 443	3 322	2 943
-con agua entubada	4 803	3 480	3 019
-con electricidad	7 053	3 733	3 223
-con paredes de material	4 153	874	2 704
-con piso de cemento	6 445	883	2 852
-de propietarios	7 206	1 439	2 520
Población (total)	47 828	15 206	17 098
-ocupada	16 123	5 858	6 408
-empleado u obrero	12 035	4 355	5 005
-secundaria completa	5 236	1 786	1 815
->5 años en la entidad	30 695	9 843	11 462

La zona con daños por depositación se localiza en las terrazas bajas, principalmente en las márgenes del río Tijuana. Tal es el caso de la amplia zona de reciente urbanización conocida como Zona del Río con uso del suelo dominante de áreas comerciales y de servicios profesionales, y con conjuntos multifamiliares de vivienda, muchos de ellos para renta en grupos de ingreso medio-alto. Otra de las colonias afectada por este tipo de daño, la Gabilondo, está habitada también por grupos de ingreso medio-alto. Dos de las zonas restantes en la zona de La Mesa de Tijuana (el área que se conoce como la 5 y 10 y al sur de la delegación de La Mesa) están habitadas por grupos de ingreso medio.

Las zonas con daños por anegamiento se localizan en las zonas planas, principalmente en las superficies cumbrales. Es sobre todo el caso de la zona conocida como Mesa de Otay, ocupada por conjuntos habitacionales para grupos de ingreso medio y medio-alto, colonias populares y una amplia zona industrial.

En nuestro análisis se intentó utilizar variables sobre ingreso del censo de población de 1990, pero éstas no contribuyeron de manera sustancial. Una de las razones fue que las características particulares de Tijuana, bajo empleo abierto (una de las tasas más bajas en el país) y grandes rezagos en la dotación de servicios públicos, le confiere algunas condiciones particulares a su proceso de urbanización al compararlo con otras ciudades de México. En Tijuana la marginalidad urbana no se relaciona con una marginalidad social

como sucede en otras ciudades de México y otros procesos de urbanización de países en desarrollo.²⁵ En otras palabras, en Tijuana un marginado urbano no es necesariamente un desempleado o subempleado, como tradicionalmente sucede en la urbanización de los países en desarrollo. Debido a ello, variables como población ocupada o ingreso, de acuerdo con los datos censales de 1990, no resultaron particularmente significativas como variables explicativas en nuestro estudio (véase Cuadro I).

El Cuadro II desglosa el análisis de los tres tipos de daños por densidad de población, área y el porcentaje que representa el área de impacto respecto al total de cada clase en que se mide la densidad de población. En el caso de la erosión, la mayor extensión de área con daño (454 ha) se registró en zonas con baja densidad de población (25 hab/ha); sin embargo, esto sólo representó el 0.6 por ciento en términos del total del área con esa densidad de población. Ello es debido a que la periferia de la ciudad se encuentra sobre zonas de valles erosivos con baja densidad de población. El impacto en el resto de las clases en que se dividió la densidad de población muestra pocas diferencias significativas. Esto puede interpretarse a que los daños por erosión afectaron en forma similar a zonas con densidad media y con densidad alta, aunque sí se muestra un ligero incremento del impacto conforme aumenta la densidad de población.

En los daños por depositación (Cuadro II) el impacto fue mayor en zonas con densidad media (entre 25 y 50 hab/ha) y en zonas con densidad media alta (entre 75 y 100 hab/ha). Estas zonas corresponden a las colonias de ingreso medio arriba señaladas. Una situación similar ocurrió en las zonas con daños por anegamiento, en donde el impacto se concentró en las zonas con densidad de población media alta (la zona de Mesa de Otay).²⁶

25 Véase por ejemplo los trabajos de Roberto Sánchez, "Condiciones de vida de los trabajadores de la maquiladora en Tijuana y Nogales" y Tonatiuh Guillén, "Servicios públicos y marginalidad social en la frontera norte" en *Frontera Norte*, vol. 2, núm. 4, Tijuana, El Colegio de la Frontera Norte, 1990.

26 El Cuadro IV, en el que se consideran los daños por clases de densidad de viviendas, corrobora los resultados del Cuadro II.

CUADRO II				
ÁREA DAÑADA POR INTERVALO DE DENSIDAD DE POBLACIÓN (EL IMPACTO ES EL ÁREA DAÑADA COMO UN PORCENTAJE DE ÁREA TOTAL BAJO ESE INTERVALO DE DENSIDAD DE POBLACIÓN)				
Tipo de daño	Densidad de población (hab/ha)	Área dañada (has)	Área total (has)	Impacto (%)
Erosión-rem.	< 25	454	7 2308	0.6
Erosión-rem.	25-50	246	4 492	5.5
Erosión-rem.	50-75	256	3 377	7.6
Erosión-rem.	75-100	92	1 378	6.6
Erosión-rem.	>100	74	8 97	8.3
Depositación	< 25	122	72 308	0.2
Depositación	25-50	169	4 493	3.8
Depositación	50-75	25	3377	0.7
Depositación	75-100	61	1378	4.4
Depositación	>100	7	897	0.8
Anegamiento	<25	243	72308	0.3
Anegamiento	25-50	36	4493	0.8
Anegamiento	50-75	95	3377	2.8
Anegamiento	75-100	82	1378	6.0
Anegamiento	>100	0	897	0.0

El Cuadro III muestra algunas diferencias interesantes respecto a los resultados del Cuadro II. Al medir el impacto por densidad de población ocupada, el Cuadro III muestra diferencias en los grupos sociales afectados por cada tipo de daño. Mientras que en los daños por erosión el mayor impacto se registró en una densidad de empleo media, en los daños por depositación y por anegamiento hay una significativa concentración del impacto en zonas con alta densidad de población ocupada. Esto refuerza de alguna manera el planteamiento arriba mencionado de diferencias en los grupos sociales por tipo de daños. Mientras que los daños por erosión afectan de manera más amplia a los grupos de ingreso bajo, los daños por depositación y anegamiento afectan a grupos de ingreso medio y medio alto. Esto permite observar la gran vulnerabilidad de Tijuana a daños por desastres naturales.

CUADRO III				
ÁREA DAÑADA POR INTERVALO DE DENSIDAD DE POBLACIÓN OCUPADA (EL IMPACTO ES EL ÁREA DAÑADA COMO UN PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL BAJO ESE INTERVALO DE DENSIDAD DE POBLACIÓN OCUPADA)				
Tipo de daño	Densidad de población (hab/ha)	Área dañada (has)	Área total (has)	Impacto %
Erosión-rem.	< 25	21	64 520	0.0
Erosión-rem.	25-35	778	9 453	8.3
Erosión-rem.	35-45	322	8 337	3.9
Depositación	< 2 5	1	64 520	0.0
Depositación	25-35	43	9 453	0.5
Depositación	35-45	322	8 337	3.8
Depositación	45-55	19	100	19.0
Anegamiento	< 25	10	64 520	0.0
Anegamiento	<25	10	64 520	0.0
Anegamiento	25-35	58	9 453	0.6
Anegamiento	35-45	389	8 337	4.7

Los cuadros V, VI, VII y VIII contribuyen a reforzar este esquema. Los cuadros V, VI y VIII consideran por tipo de daño la densidad de viviendas con servicios de drenaje, agua entubada y electricidad, respectivamente. El impacto en los daños por erosión es mayor en las viviendas con abasto de esos servicios públicos y menor o cercano al abasto promedio en Tijuana (65 por ciento de abasto en agua, 60 por ciento en drenaje y 85 por ciento en electricidad). En tanto que en los daños por deportación y anegamiento el impacto es mayor en las zonas en donde el abasto de esos servicios públicos es mayor al promedio de la ciudad. Esto puede tomarse como un indicador más de la concentración de estos dos últimos tipos de daños en grupos de ingreso medio-alto y zonas con buena urbanización. El Cuadro VIII muestra el porcentaje de viviendas con muros de material por tipo de daño. El impacto en los daños por erosión se concentra en un porcentaje bajo y medio de viviendas con muros de material, mientras que en los daños por depositación y anegamiento el mayor impacto lo sufren las zonas de viviendas con un porcentaje alto de muros de material.

Los Cuadros IX a XI describen el comportamiento de los daños en las unidades físicas (terreno, tipo de roca e inclinación de la pendiente). La densidad del drenaje natural fue excluida del análisis debido a limitaciones de la escala. Casi las tres cuartas partes de los valles erosivos (“cañones” en la terminología local) fueron afectados por erosión-remoción en masa (Cuadro IX). 13 por ciento de las laderas

denudatorias también resultaron afectadas por este tipo de proceso. Ambos grupos de formas del relieve están genéticamente ligadas a estos procesos geomorfológicos; en otras palabras, la erosión y los movimientos en masa generan este tipo de formas en la naturaleza.

La depositación (Cuadro IX) ocurre principalmente en la terrazas fluviales (con casi 20 por ciento de su área dañada), especialmente en las terrazas bajas, a lo largo del cauce del río Tijuana. En estas áreas, el material proveniente de laderas arriba tiende a depositarse, como un proceso geológico natural.

CUADRO IV				
ÁREA DAÑADA POR INTERVALO DE DENSIDAD DE VIVIENDAS (EL IMPACTO ES EL ÁREA DAÑADA COMO UN PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL EN ESE INTERVALO DE VIVIENDA)				
Tipo de daño	Densidad de población (viv/ha)	Área dañada(has)	Área total (has)	Impacto (%)
Erosión-rem.	< 5	460	72 626	0.6
Erosión-rem.	5-10	223	3 818	5.8
Erosión-rem.	10-15	273	3 310	8.2
Erosión-rem.	15-20	87	1 405	6.2
Erosión-rem.	20-30	80	1 276	6.3
Depositación	< 5	122	72 308	0.2
Depositación	5-10	143	3 818	3.7
Depositación	10-15	29	3 377	0.7
Depositación	15-20	22	1 378	4.4
Depositación	20-30	68	897	0.8
Anegamiento	< 5	243	72 308	0.3
Anegamiento	5-10	36	3 818	0.9
Anegamiento	10-15	95	3 310	2.9
Anegamiento	15-20	82	1 405	5.8

El anegamiento afectó principalmente a las superficies cumbrales. Este proceso ha sido favorecido por la falta de gradiente en estas superficies naturales llanas o casi llanas, así como por una perturbación de la capacidad de infiltración de los suelos debida a las construcciones.

En el Cuadro X se describen las relaciones entre daños y tipos de roca. La erosión-remoción en masa afecta principalmente a las areniscas y conglomerados de origen deltáico. Estos materiales conforman la mayor parte de los valles y laderas descritos arriba. La depositación afecta a los materiales aluviales, resultantes de este

tipo de proceso. El anegamiento se produce en los conglomerados de las mesas (véase también Cuadro I).

CUADRO V				
ÁREA DAÑADA POR INTERVALO DE VIVIENDAS CON DRENAJE (EL IMPACTO ES EL ÁREA DAÑADA COMO UN PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL EN ESE INTERVALO DE VIVIENDA)				
Tipo de daño	Densidad de población (viv/ha)	Área dañada(has)	Área total (has)	Impacto (%)
Erosión-rem.	< 25	554	69 437	0.8
Erosión-rem.	25-50	114	239 738	4.7
Erosión-rem.	50-75	209	2 827	7.9
Erosión-rem.	75-100	246	7 792	3.2
Deposición	< 25	42	69 437	0.1
Deposición	25-50	4	2 397	0.2
Deposición	50-75	20	2 897	0.7
Deposición	75-100	319	7 792	4.1
Anegamiento	< 25	68	69 437	0.1
Anegamiento	25-50	79	2 397	3.3
Anegamiento	50-75	12	2 827	0.4
Anegamiento	75-100	298	7 792	3.8

Una encuesta aplicada por El Colegio de la Frontera Norte (El COLEF) y la Cruz Roja en 939 familias alojadas en 42 albergues en el momento de la tragedia en Tijuana proporciona información adicional que corrobora el esquema arriba planteado.²⁷ En este trabajo nos interesa destacar únicamente que el 32 por ciento de las familias damnificadas provenían de seis colonias ubicadas en las delegaciones de La Mesa y La Presa (3 de Octubre, Pípila, Camino Verde, Vista Hermosa, San Juan del Río y San Luis). Todas esas colonias se ubican en valles erosivos. Es importante destacar que 228 familias damnificadas habían sido afectadas al menos dos veces en años anteriores por inundaciones con pérdidas parciales o totales de sus viviendas y pertenencias. Esto revela la vulnerabilidad de Tijuana a este tipo de emergencias, pero también de inexistencia de medidas tendientes a reducir esa vulnerabilidad o a proteger a sus habitantes.

27 El COLEF, 1992.

CUADRO VI				
ÁREA DAÑADA POR INTERVALO DE PORCENTAJE DE VIVIENDAS CON SUMINISTRO DE AGUA (EL IMPACTO ES EL ÁREA DAÑADA COMO UN PORCENTAJE DE ÁREA TOTAL EN ESE INTERVALO DE VIVIENDA)				
Tipo de daño	Densidad de población (viv/ha)	Área dañada (has)	Área total (has)	Impacto (%)
Erosión-rem.	< 25	521	68 698	0.8
Erosión-rem.	25-50	105	2 165	4.8
Erosión-rem.	50-75	168	2 670	6.3
Erosión-rem.	75-100	328	8 920	3.7
Depositación	< 25	1	68 698	0.0
Depositación	25-50	45	2 165	2.1
Depositación	50-75	8	2 670	0.3
Depositación	75-100	330	8 920	3.7
Anegamiento	< 25	129	68 698	0.2
Anegamiento	25-50	18	2 165	0.8
Anegamiento	50-75	0	2 670	0
Anegamiento	75-100	309	8 920	3.5

CUADRO VII				
ÁREA DAÑADA POR INTERVALO DE PORCENTAJE DE VIVIENDAS CON SUMINISTRO DE ELECTRICIDAD (EL IMPACTO ES EL ÁREA DAÑADA COMO UN PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL EN ESE INTERVALO DE VIVIENDA)				
Tipo de daño	Porcentaje de viviendas con electricidad	Área dañada (has)	Área total (has)	Impacto (%)
Erosión-rem.	< 25	174	65 459	0.3
Erosión-rem.	25-50	120	1 158	10.4
Erosión-rem.	50-75	169	2 925	5.8
Erosión-rem.	75-100	659	12 911	5.1
Depositación	< 25	0	65 459	0.0
Depositación	25-50	0	1 158	0.0
Depositación	50-75	41	2 925	1.4
Depositación	75-100	343	12 911	2.6
Anegamiento	< 25	86	65 459	0.1
Anegamiento	25-50	3	1 158	0.3
Anegamiento	50-75	42	2 925	1.4
Anegamiento	75-100	326	12 911	2.5

CUADRO VIII				
ÁREA DAÑADA POR INTERVALO DE PORCENTAJE DE VIVIENDAS CON PARED DE TABIQUE (EL IMPACTO ES EL ÁREA DAÑADA COMO UN PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL EN ESE INTERVALO DE VIVIENDA)				
Tipo de daño	porcentaje de viviendas de tabique	Área dañada(has)	Área total (has)	Impacto (%)
Erosión-rem.	< 25	260	67 364	0.4
Erosión-rem.	25-50	498	6 031	8.2
Erosión-rem.	50-75	312	6 296	5.0
Erosión-rem.	75-100	52	2 762	1.9
Depositación	< 25	183	67 364	0.3
Depositación	25-50	22	6 031	0.4
Depositación	50-75	179	6 296	2.8
Depositación	75-100		12 911	
Anegamiento	< 25	13	67 364	0.0
Anegamiento	25-50	71	6 031	1.2
Anegamiento	50-75	106	6 296	1.7
Anegamiento	75-100	266	2 762	9.6

Conclusiones

Si bien el periodo de retorno del fenómeno considerado globalmente es bajo (75 años), el impacto más severo fue causado por un evento que puede repetirse, en promedio, cada tres años, con 0.7 de probabilidad. Esto indica que las necesidades de planeación de la evacuación del escurrimiento en la ciudad son muy serias. Asimismo el manejo hidrológico de las cuencas urbanas, incluyendo el manejo de la cobertura vegetal, es crítico.

Desde un punto de vista del medio físico, la mayor parte de los procesos que dañaron a la ciudad ocurrió en las zonas donde naturalmente se habrían producido, incluso sin interferencia antrópica. Las mesetas (superficies cumbreles) anegadas, donde la perturbación fue estimulada en forma sustancial por el cambio de permeabilidad de los materiales conglomeráticos, es parcialmente una excepción.

CUADRO IX				
ÁREA DAÑADA POR CLASE DE UNIDAD DE TERRENO (EL IMPACTO ES EL ÁREA DAÑADA COMO UN PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL EN ESA UNIDAD)				
Tipo de daño	Unidad de terreno (código y nombre)	Área dañada (has)	Área total (has)	Impacto (%)
Erosión-rem.	1 Superficies cumbrales	90	5 222	1.7
Erosión-rem.	2 Laderas denudatorias (>inc)	668	10 189	6.5
Erosión-rem.	3 Laderas denudatorias (<incl)	289	4 691	6.2
Erosión-rem.	4 Complejo de climas/terrazas	9	498	1.8
Erosión-rem.	5 Planicies fluviales	48	896	5.4
Erosión-rem.	6 Terrazas fluviales (baja)	22	1 870	1.2
Erosión-rem.	7 Terrazas fluviales (alta)	10	1 630	0.6
Erosión-rem.	8 Valles erosivos	86	115	74.1
Erosión-rem.	10 Estratovolcanes	8	487	1.6
Depositación	2 Laderas denudatorias (>incl)	4	10 189	0.0
Depositación	3 Laderas denudatorias (<incl)	16	4 691	0.3
Depositación	6 terrazas fluviales	292	1 870	15.6
Depositación	7 terrazas fluviales	55	1 630	3.4
Anegamiento	< 25	725	5 222	13.9
Anegamiento	25-50	36	10 189	0.4
Anegamiento	50-75	25	4 691	0.5
Anegamiento	75-100	24	1 630	1.5

Esto no quiere decir que la catástrofe haya sido de índole natural. Las observaciones de campo indicaron que durante los eventos, en las zonas rurales alrededor de Tijuana, así como en las laderas con vegetación natural dentro de la ciudad, no se provocaron daños importantes (tales como derrumbes o deslizamientos en laderas). En realidad, la catástrofe en la ciudad fue provocada por la aceleración de procesos naturales (especialmente erosión-depositación), debido a la interferencia humana (desarrollo urbano no planificado).

CUADRO X				
ÁREA DAÑADA POR TIPO DE ROCA (EL IMPACTO ES EL ÁREA DAÑADA COMO UN PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL DE ESE TIPO DE ROCA)				
Tipo de daño	Tipo de roca (Código y nombre)	Área dañada (has)	Área total (has)	Impacto (%)
Erosión-rem.	1 Areniscas	260	67 364	0.4
Erosión-rem.	2 Areniscas-conglomerados	498	6 031	8.2
Erosión-rem.	3 Conglomerados	312	6 296	5.0
Erosión-rem.	5 Aluvión	52	2 762	1.9
Erosión-rem.	7 Rocas volcánicas ácidas	183	67 364	0.3
Depositación	2 Areniscas-conglomerados	22	6 031	0.4
Depositación	5 Aluvión	13	67 364	0.0
Anegamiento	2 Areniscas-conglomerados	71	6 031	1.2
Anegamiento	3 Conglomerados	106	6 296	1.7
Anegamiento	5 Aluvión	266	2 762	9.6
Anegamiento	7 Rocas volcánicas ácidas			

Los resultados del análisis muestran también una gran vulnerabilidad de Tijuana a este tipo de emergencias. Sin duda los grupos de menores ingresos son los más vulnerables, tienen mayores pérdidas y sufren mayores consecuencias que otros grupos con mejores ingresos. Pero nuestro análisis mostró también la afectación a un considerable grupo de habitantes de ingreso medio y medio alto, aunque hay diferencia en el tipo de daño que afectó a cada grupo social y la capacidad de defensa de éstos ante la emergencia. La vulnerabilidad de Tijuana a fenómenos naturales es en parte debida a la zona en donde la ciudad se ubica, pero en gran medida es también resultado del crecimiento desordenado de la ciudad y fuera de cualquier esquema de planeación. Los masivos movimientos de tierra en las partes altas de Tijuana para la construcción de nuevos fraccionamientos residenciales o parques industriales, la urbanización de los cauces naturales del agua, la pérdida de vegetación y la erosión del suelo a través de la actividad urbana, todo ello sin ninguna consideración a los aspectos naturales del terreno, aceleraron la respuesta de las cuencas hidráulicas dentro de la ciudad. El resultado fue la catástrofe de enero de 1993.

CUADRO XI				
ÁREA DAÑADA POR CLASE DE INCLINACIÓN DE LA PENDIENTE (EL IMPACTO ES EL ÁREA DAÑADA COMO UN PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL DE ESA CLASE DE INCLINACIÓN DE LA PENDIENTE)				
Tipo de daño	Inclinación de la pendiente	Área dañada (has)	Área total (has)	Impacto (%)
Erosión-rem.	Plana	4	412	1.0
Erosión-rem.	0.1-2.4	338	9620	3.5
Erosión-rem.	2.5-4.9	266	6577	4.0
Erosión-rem.	5.0-9.9	440	7418	5.9
Erosión-rem.	10.0-14.9	179	3089	5.8
Erosión-rem.	15.0-29.9	208	2946	7.0
Erosión-rem.	30.0-100.0	24	1098	2.1
Depositación	Plana	2	412	0.4
Depositación	0.1-2.4	338	9620	3.5
Depositación	2.5-4.9	29	6577	0.4
Depositación	5.0-9.9	5	7418	0.6
Depositación	10.0-14.9	4	3089	0.1
Depositación	15.0-29.9	6	2946	0.2
Anegamiento	Plana	1	412	0.1
Anegamiento	0.1-2.4	580	9620	6.0
Anegamiento	2.5-4.9	147	6577	2.2
Anegamiento	5.0-9.9	79	7418	1.1
Anegamiento	10.0-14.9	29	3089	0.9
Anegamiento	15.0-29.9	12	2946	0.4

Desgraciadamente, no es la primera emergencia de este tipo que sufre Tijuana. Tan sólo dos años antes la ciudad había sido afectada por inundaciones de consideración que afectaron por varias semanas su vida regular, además de las pérdidas económicas sufridas. Problemas similares se habían suscitado también en años anteriores. Sin embargo, la respuesta para reducir la vulnerabilidad de la ciudad a esas emergencias había sido mínima. En esta ocasión, las autoridades estatales, municipales y federales llevan a cabo una serie de acciones para controlar los problemas más evidentes en las cuencas hidráulicas de la ciudad. Un nuevo reglamento para regular los movimientos de tierra entró ya en vigor, está en proceso la ampliación de drenaje pluvial de la ciudad y de otras obras en las principales cuencas, y se promulgó un nuevo Plan de Desarrollo Urbano para la ciudad. A pesar de que todas esas acciones constituyen un avance importante para reducir la vulnerabilidad de

Tijuana a las inundaciones, una solución más amplia y con beneficios para todos los grupos sociales que componen la ciudad requiere de un replanteamiento de su patrón de crecimiento con mayor armonía con su medio ambiente. Esperamos que los resultados de nuestro estudio puedan contribuir a lograr ese objetivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Burton, I., Kates, R. W. y White, G. F., *The Environment as Hazard*, New York, Oxford University Press, 1978.
- De Bruijn, C.A., "Spatial Factors in Urban Growth: Towards GIS Models for Cities in Developing Countries" en *ITC-Journal* 1991-4:221-231.
- Delgado, L., (Investigador CICESE). Comunicación personal, 1993.
- Fischer, M.M. y P. Nijkamp, "Geographic Information Systems and Spatial Analysis" en *Ann. Reg. Sci.*, 26:3-17, 1992.
- García, E., *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppe*. México, 1981, 252 pp.
- Housner, G.W., *Confronting Natural Disasters An International Decade for Natural Hazard Reduction*. Washington, National Academy Press, 1987.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), *Carta topográfica "Tijuana"*, 1975. 1:50,000.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), *X Censo General de Población y Vivienda*. México, 1980.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), *XI Censo General de Población y Vivienda*, 1990.
- Martín, L.R. y P.J. Howarth, "Change Detection Accuracy Assessment Using SPOT Multispectral Imagery of the Rural-urban Fringe" en *Remote Sens. Environ.*, 30:55-66, 1989.
- Meijerink, A., "Data Acquisition and Data Capture Through Terrain Mapping Units" en *ITC-Journal*, 1988-1:23-44.
- Openshaw, S., "Spatial Analysis and Geographical Information Systems: a Review of Progress and Possibilities" en Scholten, H.J. y C.H. Stillwell (eds.). *Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning*, 153-163, 1990.

- Smith Keith, *Environmental Hazards. Assessing Risk & Reducing Disaster*. Routledge, London, 1992.
- Treitz, P. M., P. J. Howarth y P. Gong., “Application of Satellite and GIS Technologies for Land-Cover and Land-Use Mapping and the Rural-urban Fringe: a Case study” en *Photog. Eng. and R.S.* 58(4):439-448. 1992.
- Turner 11, B.L., R.H. Moss y D.L. Skole., *Relating Land Use and Global Land-Cover Change: a Proposal for an IGBP-HDP Core Project*. IGBP Report 24. HDP Report 5. IGBP/HDP. Estocohno, 1993.
- Valenzuela, C. R., “ILWIS overview” en *TTC Journal* 1988-1:3-14.
- Walsh, S. J., D. R. Lightfoot y D. R. Butler, “Recognition and Assessment of Error in GIS” en *Photog. Eng. and R.S.* 53(10):1423-1430, 1987.
- Welch, R., “Spatial Resolution Requirements for Urban Studies” en *Int. J. Remote Sensing* 3(2); 139-146, 1982.
- Zupka, D., “Economic Impact of Disasters” en *UNDRO News* January/February: 19-22, 1988,

ANEXO 1					
Año	Pr	D	P	PR	R
1963	0.00	0	0.01	1.01	1
1972	0.00	0	0.04	1.04	2
1976	0.00	0	0.06	1.06	3
1959	4.06	1	0.08	1.09	4
1984	4.57	2	0.10	1.11	5
1953	6.10	3	0.12	1.14	6
1971	7.87	3	0.15	1.17	7
1975	8.38	3	0.17	1.20	8
1985	9.91	3	0.19	1.23	9
1968	10.16	3	0.21	1.27	10
1965	10.67	6	0.23	1.31	11
1958	12.19	3	0.26	1.35	12
1989	12.19	6	0.28	1.39	13
1991	15.24	1	0.30	1.43	16
1961	20.57	4	0.32	1.48	15
1970	21.34	6	0.35	1.53	16
1956	23.62	6	0.37	1.58	17
1981	26.16	6	0.39	1.64	18
1988	26.92	6	0.41	1.70	19
1987	32.00	2	0.43	1.77	20
1966	34.54	7	0.46	1.84	21
1964	39.37	9	0.48	1.92	22
1951	41.66	7	0.50	2.00	23
1967	42.42	3	0.52	2.09	24
1973	43.94	9	0.54	2.19	25
1983	48.26	7	0.57	2.31	26
1950	53.59	8	0.59	2.43	27
1974	54.10	11	0.61	2.57	28
1986	54.36	1	0.63	2.72	29
1990	56.64	7	0.65	2.90	30
1962	61.47	6	0.68	3.10	31
1992	61.72	5	0.70	3.32	32
1977	62.99	9	0.72	3.59	33
1982	66.80	7	0.74	3.90	34
1955	79.50	12	0.77	4.26	35

Continúa

1954	80.77	9	0.79	4.71	36
1969	83.06	14	0.81	5.26	37
1960	84.07	7	0.83	5.95	38
1949	97.79	13	0.85	6.85	39
1978	109.22	14	0.88	8.07	40
1952	109.73	13	0.90	9.83	41
1979	115.82	13	0.92	12.56	42
1980	120.65	14	0.94	17.38	43
1957	143.51	16	0.96	28.25	44
1993	209.80	14	0.99	75.33	45

El cálculo del periodo de retorno para valores extremos se basó en la precipitación del mes de enero de los 45 años más recientes. Adjustado a la distribución de probabilidad Gumbell, donde $P = (R-0.4)/(N+0.2)$ y $PR = 1/(1-P)$. (Pr es la precipitación de enero en mm; D son los días con lluvia de cada mes; p es la probabilidad acumulada; PR es el periodo de retorno en años; R es el rango asociado a cada año, de acuerdo con la cantidad de precipitación).