
ANÁLISIS ESPACIAL DE LOS EFECTOS DE EL NIÑO 1997-1998 EN TIJUANA, B.C.

Alain Winckell,¹ Michel Le Page¹ y Rafael Vela²

¹ Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Paris, France

² El Colegio de La Frontera Norte (Colef), Tijuana, B.C.

Objetivos

La ciudad de Tijuana, debido a su posición fronteriza y sus características de desarrollo económico, ha presentado un crecimiento urbano acelerado desde los años cincuenta. La ausencia de una verdadera planificación y las difíciles condiciones fisiográficas del sitio han propiciado un sinnúmero de riesgos para la comunidad. Las lluvias y los fenómenos hídricos relacionados constituyen los más importantes, y sus recurrencias en la región han ocasionado pérdidas considerables, tanto humanas como materiales.

Este estudio tuvo como propósito aprovechar un invierno con lluvias intensas –el evento El Niño 1997-1998– como un laboratorio para la recopilación de información en tiempo real para realizar un análisis integral del funcionamiento del ambiente urbano y tratar de comprender el dónde, el porqué, el cuándo, el cuánto y el cómo de los fenómenos ocurridos, utilizando el Sistema de Información Geográfica de la Frontera Norte (Sigef), programa conjunto del IRD y El Colegio de la Frontera Norte.

Cinco etapas han sido desarrolladas: 1) repartición espacio-temporal de las lluvias en el ámbito regional y local; 2) caracterización de las microcuencas-vertientes urbanas; 3) zonificación de los diversos

efectos ocurridos sobre la estructura urbana; 4) modelización de la transformación de la lluvia en escurrimiento, y 5) espacialización de los eventos como señales de disfuncionamiento de las cuencas, elaboración de una escala de riesgo, recomendaciones y prioridades de intervención. En este artículo, sólo se desarrollará una breve presentación de los capítulos 1, 4 y 5.

Etapas 1: Las precipitaciones en Tijuana

Cincuenta años en la historia pluviométrica de Tijuana

Se realizó un estudio con una serie de datos climatológicos de 1950 a 1998, orientado hacia la comparación entre un periodo normal y uno con El Niño, considerando los siguientes aspectos:

- Pluviometría anual: promedios, máximos y coeficientes de variación.
- Pluviometría mensual: promedios, distribución, máximos y coeficientes de variación.
- Pluviometría diaria: eventos máximos y frecuencia.
- Evolución temporal de la pluviometría.

El clima de Tijuana pertenece a la categoría de los subtropicales, de fachada marítima occidental de los continentes. Es un clima seco con precipitaciones anuales promedio del orden de 235.3 mm (año climatológico de julio hasta junio) y una repartición típicamente mediterránea con presencia de lluvias exclusivamente en invierno-primavera (concentradas entre noviembre y abril). Este promedio oculta variaciones relativamente importantes; por ejemplo, los nueve años con presencia de El Niño recibieron en promedio 361.6 mm. Al contrario, durante los 40 años normales, la pluviometría anual disminuyó hasta 206.9 mm, lo cual representa un coeficiente de variación del 74.8% (figura 1).

¿Cómo se sitúa El Niño 1997-1998 en la pluviometría de Tijuana?

Se estableció una red de 27 pluviómetros que permitió monitorear la

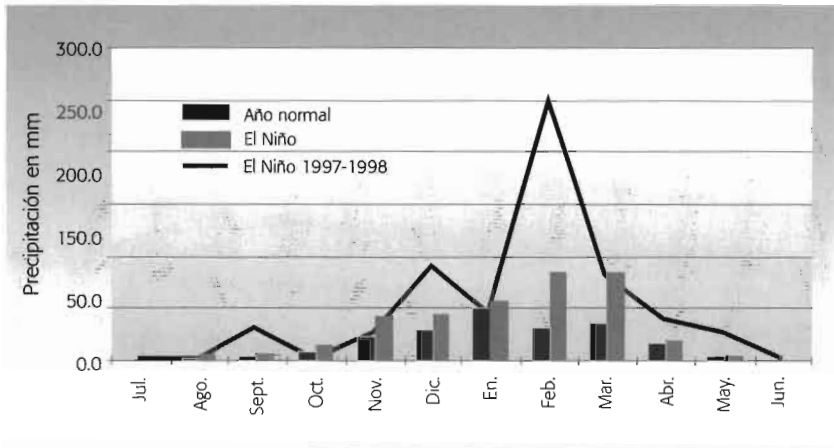


Figura 1. Pluviometría comparada de Tijuana (Presas Rodríguez).

ciudad de Tijuana desde octubre de 1997 hasta junio de 1998. Con un total de 579.4 mm, la estación de la Presa Rodríguez recibió la mayor cantidad de precipitación registrada desde el año 1950, esto representó 2.5 veces la pluviometría promedio, casi el triple de un año normal y 1.6 veces la pluviometría promedio de los nueve años con El Niño desde 1950.

La repartición mensual de este episodio se diferencia claramente de los Niños precedentes. Mostró dos máximas; la primera se produjo en septiembre con el paso de la tormenta tropical Nora, 100 km al sur de Tijuana; la segunda se presentó en febrero, la cual con sus repetidos aguaceros, registró 247.5 mm. Esto fue tres veces la pluviometría en temporada de El Niño, siendo este mes el segundo más lluvioso en la historia de Tijuana, solamente superado por el de enero de 1993. Después de este paroxismo, la fase decreciente es comparable con la evolución normal de un evento El Niño.

El modelo digital muestra una repartición de las lluvias de acuerdo con la orientación noroeste-sureste conformada por los ejes orográficos. Dos áreas con mayor precipitación se localizan en los contrafuertes suroeste del río Tijuana, donde se registraron más de 580 mm, y al extremo noreste, en los contrafuertes de los relieves norteamericanos, donde se alcanzaron casi los 700 mm. Por oposición, la franja cos-



ros contrafuertes al oeste y rodeado por una extensa zona con precipitaciones superiores a 40 mm en las partes central y suroeste de la ciudad, misma que en los dos eventos precedentes había recibido la mayor precipitación diaria. Dos islotes de mínimos relativos se identifican bien: uno hacia la bahía de San Diego, y el otro en la esquina sureste de la ciudad. La precipitación aumentó gradualmente en los cerros del lado estadounidense.

Fuertes intensidades fueron registradas. Las lluvias se concentraron en seis horas, dos con intensidad de 10 mm, seguidas por un pico de aproximadamente 30 mm, las cuales cayeron sobre un suelo ya bastante saturado. Como el evento se produjo durante la noche, se dificultó llevar a cabo medidas de prevención o socorro.

Tres conclusiones principales merecen ser resaltadas:

- Los mayores factores causales del desencadenamiento de fenómenos catastróficos resultan ser la intensidad de la precipitación y la cantidad acumulada en un periodo corto de tiempo, como puede ser un día. Lluvias con posibles consecuencias catastróficas se producen con una recurrencia relativamente alta, menos de cuatro años para precipitaciones entre 40 y 50 mm; de siete a nueve años para lluvias entre 50 y 60 mm, y de uno a 12 años para precipitaciones entre 60 y 70 mm. En casi 50 años se produjeron sólo dos eventos con lluvias superiores a 70 mm, registradas únicamente en temporada normal, la mayor de éstas en enero de 1993. Los datos de 20 a 30 mm predominaron en los inviernos normales, mientras que los datos de 30 a 60 mm son más numerosos en temporada de El Niño.
- Aunque el fenómeno El Niño presenta una relación de fuertes lluvias en Tijuana, conviene recalcar que los registros mostraron precipitaciones intensas, tanto mensuales como diarias, en temporada de El Niño y en periodos normales. El riesgo de inundaciones y deslaves existe entonces a lo largo de todos los inviernos.
- Una de las tareas prioritarias debería consistir en equipar la ciudad con una red de pluviógrafos para registrar permanentemente las variaciones en espacio y tiempo real de las lluvias que caen, con

la finalidad de contar con un sistema de aviso de riesgo en caso de desbordamiento.

Etap 2: Las cuencas hidrológicas urbanizadas

Treinta cuencas-vertientes elementales están cubiertas por la ciudad de Tijuana

¿Por qué un estudio en el nivel de la microcuenca-vertiente? Es una entidad física natural donde los fenómenos de tipo hídrico se encuentran estrechamente relacionados y constituye una unidad ambiental propicia para la aplicación de cualquier medida encaminada a controlar el escurrimiento hídrico urbano.

Para cada cuenca-vertiente se realizó una caracterización completa, elaborándose fichas con tablas y gráficos. En ellas se presenta amplia información multitemática, resultado de un largo proceso de recopilación, homogeneización, actualización, validación, georreferenciación e integración. La información contenida considera los siguientes puntos:

- Características del medio físico: fisiografía, topografía, pendientes, condiciones del escurrimiento, geología y formaciones superficiales.
- Características humanas: sociodemográfica, uso del suelo generalizado.
- Infraestructura pluvial existente, superficial y subterránea.

Etap 3. Análisis espacial de los eventos ocurridos durante el invierno 1997-1998

El estudio de los eventos ocurridos durante El Niño 1997-1998 abarcó un extenso monitoreo con la finalidad de obtener un inventario completo del funcionamiento de la ciudad en situación de emergencia “meteorológica”, como lo llaman en Tijuana.

Las operaciones desarrolladas se reparten en cuatro rubros:

- Seguimiento mediante la consulta hemerográfica de dos diarios lo-

aguas. Las diferentes funciones del modelo se integran por medio de matrices de píxeles (o mallas) cuadrados que representan el espacio con una resolución del píxel de 80 metros. Cuatro características principales han sido seleccionadas: la topografía, el uso del suelo, el tipo de sustrato y la pluviometría, para elaborar las capas de información necesarias al funcionamiento del modelo: la matriz de drenaje, las funciones de producción y transferencia, las precipitaciones diarias y horarias.

Los factores que rigen la transformación de la lluvia en escurrimiento en una ciudad son de muy diversa índole, e intervienen otros elementos en condiciones normales, como el uso del suelo urbano, la densidad de las construcciones, el comportamiento de las redes tanto pluviales como de calles, etcétera.

Para determinar estos parámetros de producción se utilizó el método Runoff Curve Number NRCS, desarrollado por el SCS en 1985. Tres etapas principales intervienen en la atribución de las curvas CN elegidas para Tijuana: el tipo de uso de suelo, las condiciones hidrológicas de la superficie y el comportamiento hidrológico del subsuelo.

Los resultados: el ejemplo del evento del 8 de febrero de 1998

Los resultados finales de la modelización, después de una calibración efectuada en Aguaje de la Tuna, se presentan, para cada secuencia de lluvia en cada una de las cuencas-vertiente, bajo la forma de hidrogramas con las estadísticas correspondientes referentes a los datos de flujo máximo en m³/seg, duración de los escurrimientos en horas y volumen escurrido en miles de metros cúbicos.

Un tratamiento estadístico de las series de datos obtenidos (18 cuencas en seis periodos distintos), mediante una asociación de tipo *cluster*, permitió establecer un reagrupamiento jerárquico. El estudio comparativo de los caudales de crecida de estas cuencas, permitió diferenciar tres grupos (*cluster*) de cuencas urbanizadas con comportamientos relativamente homogéneos. Se representó a cada uno con un hidrograma resultante, calculado con un promedio no ponderado de sus integrantes (figura 3).

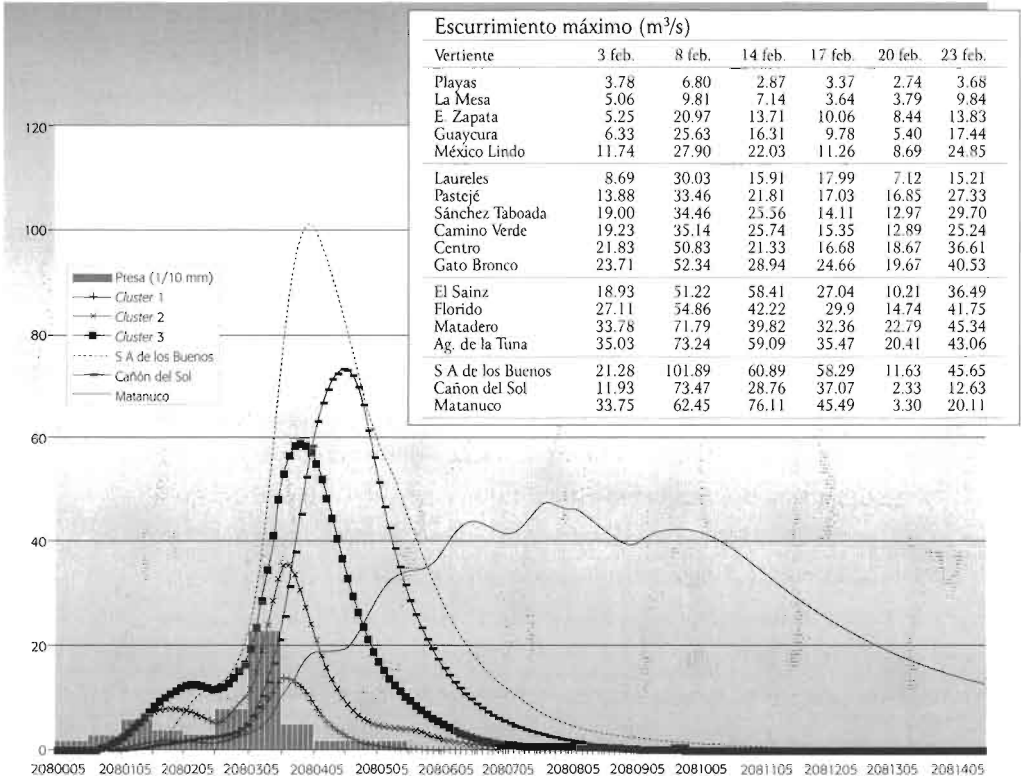


Figura 3. Hidrogramas sintéticos de los escorrentimientos.

- *Cluster 1*: cuencas de caudal bastante estables (Playas, La Mesa, Emiliano Zapata, Guaycura).
- *Cluster 2*: cuencas intermedias (México Lindo, Sánchez Taboada, Camino Verde, Pastejé, Los Laureles, Sistema Centro y Gato Bronco).
- *Cluster 3*: cuencas de caudal fuerte (El Sainz, Aguaje de la Tuna, Matadero y El Florido).
- Existen tres cuencas de comportamiento singular debido a su bajo nivel de uso de suelo, tales casos son: el Cañón del Sol, San Antonio de los Buenos y el Matanuco.

Del 3 al 7 de febrero, la temporada fue poco húmeda, cayendo tan sólo 12 mm al medio día del 6. Las precipitaciones iniciaron a las 24:00 horas del día 7, para terminar con un aguacero de 30 mm a las 3:00 am del día 8. Los tres grupos urbanos presentan una dinámica similar. Es sorprendente la velocidad con la cual aumentan los caudales, típica de los llamados *oueds* en el ambiente mediterráneo, mostrando un caudal máximo multiplicado por cinco en un lapso de 60 hasta 75 minutos después de la lluvia –lo que debe hacer reflexionar sobre la gestión a futuro en el caso de tales crecidas–, pero con intensidades diferentes (máximos de 14, 35, 59 y 102 m³/seg) principalmente ligadas a la cantidad de superficie drenada y al tamaño de la cuenca.

Sin embargo, la superficie no es un factor determinante. Pastejé, por ejemplo, con una superficie mayor que cualquier cuenca del grupo III, se encuentra dentro del grupo II, con caudales intermedios, debido a que una amplia proporción de su área está desocupada.

El grupo I, constituido por las cuencas con menor grado de peligrosidad en cuanto a los escurrimientos superficiales, abarca cuatro cuencas. Las dos primeras (Playas y La Mesa) no presentan peligro debido a su reducido tamaño. Sin embargo, Guaycura y Emiliano Zapata están poco urbanizadas en sus partes aguas arriba; la primera, porque su situación binacional la protege de una urbanización total, y la segunda, porque sus partes agua arriba se localizan sobre las faldas del Cerro Colorado con fuertes pendientes que han impuesto estrictas limitaciones.

Las tres últimas cuencas constituyen áreas de reserva territorial para la futura expansión de Tijuana, y revelan ya diferentes niveles de urbanización. El Cañón del Sol se comporta de manera similar, pero con un efecto *buffer*, encontrándose la curva retrasada de 40 minutos.

San Antonio de los Buenos se encuentra en un proceso de reciente urbanización difusa, y presenta una dinámica muy parecida a las cuencas del grupo III que desarrollan fuertes caudales, pero con un volumen de escurrimiento que puede llegar a duplicarse. Una urbanización descuidada de esta cuenca podría causar flujos muy peligro-

sos en el futuro. La configuración natural de la cuenca, con un extenso lecho natural y una desembocadura directa en el Océano Pacífico, contribuye a aminorar las amenazas futuras.

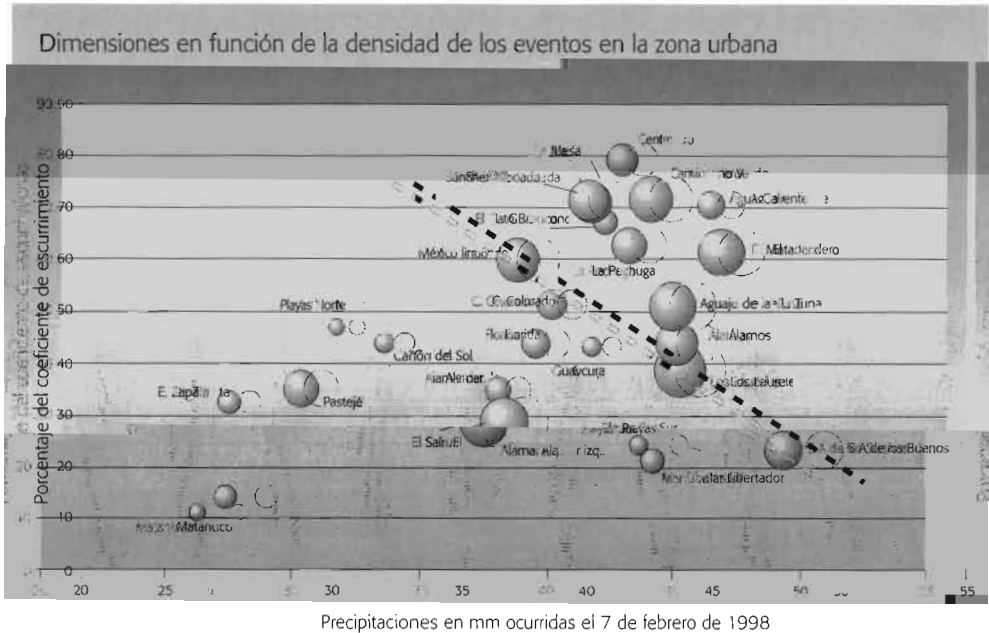
El Matanuco es la cuenca menos intervenida y muestra claramente características en las que predominan los procesos hidrológicos naturales, es decir, sin alteraciones por la intervención del hombre. El aumento de sus caudales es lento, el pico tarda hasta cinco veces más tiempo para suceder después de una lluvia. Además, a pesar de su gran superficie, su respuesta es mucho más prolongada, alcanzando sólo 47 m³/s, o sea características bastante similares a las del Grupo II.

Etapa 5: Enseñanzas y recomendaciones

Determinación de los factores de desencadenamiento de fenómenos

Mediante un proceso que combina métodos estadísticos y geográficos en el SIG, se realizó una agregación en cada una de las diferentes cuencas-vertientes, para cada uno de los eventos ocurridos, georreferenciados y reclasificados de acuerdo con sus características morfodinámicas. Los gráficos para el periodo del 7 de febrero resultan ser muy ilustrativos. Éstos combinan la pluviometría en el eje de las abscisas y el coeficiente de escurrimiento en el eje de las ordenadas. El tamaño del símbolo de cada cuenca se encuentra en función de la densidad de los eventos registrados, relacionándose éstos con la superficie urbanizada de la cuenca.

Se aprecia una similitud entre las cuencas con poca densidad de eventos (parte inferior izquierda) y aquéllas con densidades más altas, siendo éstas las de mayor problemática (en la parte superior derecha). La transición es brusca y puede ser evidenciada por una línea recta que une México Lindo, Los Laureles y San Antonio de los Buenos. Se nota muy bien la interacción lluvia diaria a través del coeficiente de escurrimiento y la aparición de fenómenos significativos con lluvias mayores a 50 mm, en cuencas con un 20% de escurrimiento (San Antonio de los Buenos). Este umbral baja a 45 mm con coeficiente del 40% (Los Laureles) y hasta a 37 mm en una cuenca alta-



4. Relación entre eventos, pluviometría y escurrimiento por cuenca-vertiente.

mente urbanizada como lo es México Lindo, con un coeficiente de escurrimiento del 60%. Lo que demuestra unas condiciones de urbanización poco satisfactorias en estas últimas cuencas (figura 4).

Espacialización de los diversos tipos de riesgos

Los riesgos por inundación y anegamiento están estrechamente relacionados con la cantidad de agua acumulada por las precipitaciones y la ausencia de una salida acorde al volumen de las descargas, lo que provoca su estancamiento. Dos cartografías de riesgos potenciales fueron elaboradas mediante tratamientos que se derivaron de un modelo digital de elevación, con una resolución de 30 m, y de una red digital de los cauces hidrográficos naturales.

Las áreas susceptibles de sufrir desencadenamientos de movimientos de vertiente (MVR) fueron determinadas mediante un análisis, a través de una regresión múltiple, de cuatro criterios: la pendiente topográfica, la estabilidad de las formaciones superficiales, la tasa de

Los efectos del fenómeno

El Niño

en México

1997-1998

Compiladores

Elva Escobar Briones

Marcial Bonilla

Antonio Badán

Margarita Caballero

Alain Winckell



CONACYT

Los efectos del fenómeno
El Niño
en México
1997-1998

Compiladores

Elva Escobar Briones

Marcial Bonilla

Antonio Badán

Margarita Caballero

Alain Winckell



CONACYT

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Director General
Jaime Parada Ávila

Director Adjunto de Investigación Científica
Alfonso Serrano Pérez Grovas

Director Adjunto de Modernización Tecnológica
Guillermo Aguirre Esponda

Director Adjunto de Desarrollo Científico y Tecnológico Regional
Manuel Méndez Nonell

Director Adjunto de Coordinación del Sistema SEP-Conacyt
Felipe Rubio Castillo

Director Adjunto de Política Científica y Tecnológica
Gildardo Villalobos García

Directora Adjunta de Asuntos Internacionales y Becas
Margarita Noguera Farfán

Director Adjunto de Administración y Finanzas
Gabriel Soto Fernández

Director de Asuntos Jurídicos
Alejandro Romero Gudiño

Director de Comunicación Científica y Tecnológica
Armando Reyes Velarde

Los efectos del fenómeno El Niño en México 1997-1998
1a. edición, octubre de 2001
© 2001, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



CONACYT

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
Av. Constituyentes 1046
Col. Lomas Altas
11950, México, D.F.

Impreso en México, *Printed in Mexico*