

# Visión panorámica de las precipitaciones pluviales combinadas por los efectos de los ciclones tropicales *Ingrid-Manuel*

• Michel Rosengaus-Moshinsky\* •  
*Consultor privado*

\* Autor para correspondencia

• Felipe I. Arreguín-Cortés •  
*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*

• David Korenfeld-Federman •  
*Consultor privado*

• Horacio Rubio-Gutiérrez •  
*Comisión Nacional del Agua*

## Resumen

Rosengaus-Moshinsky, M., Arreguín-Cortés, F. I., Korenfeld-Federman, D., & Rubio-Gutiérrez, H. (noviembre-diciembre, 2016). Visión panorámica de las precipitaciones pluviales combinadas por los efectos de los ciclones tropicales *Ingrid-Manuel*. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(6), 73-92.

Se presenta un análisis panorámico de las precipitaciones pluviales que generaron los ciclones tropicales *Ingrid* y *Manuel* durante los días en que actuaron de forma simultánea sobre México, con énfasis en las características que no corresponden a la simple superposición de los campos de lluvias que cada uno de ellos hubiese generado de manera individual. Se muestra que la circulación combinada de la humedad alrededor de ambos vórtices explica conceptualmente las extensiones anómalas de la zona lluviosa que se manifestaron hacia el noreste de México, en el caso de *Ingrid*, y hacia el sureste de México, en el caso de *Manuel*. Se muestra que el evento combinado resultó mucho mayor que el referente previo en la zona del Pacífico (huracán *Pauline*, en 1997). Para tres cuencas específicas cercanas a Acapulco, Guerrero, se calcularon los periodos de retorno de las lluvias ocurridas durante este evento, identificando que, aunque las acumulaciones diarias resultaron extremas, las secuencias ocurridas de 2 a 5 días consecutivos corresponden a un periodo de retorno mucho mayor.

**Palabras clave:** ciclones tropicales, precipitación ciclónica, interacción entre ciclones, eventos hidrometeorológicos extremos, *Ingrid*, *Manuel*, Acapulco, huella de lluvias.

## Abstract

Rosengaus-Moshinsky, M., Arreguín-Cortés, F. I., Korenfeld-Federman, D., & Rubio-Gutiérrez, H. (November-December, 2016). *Panoramic Vision of the Rainfall Generated by the Combined Effects of the Tropical Cyclones Ingrid-Manuel*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 7(6), 73-93.

A panoramic analysis of the rainfall produced by the combination of the tropical cyclones *Ingrid* and *Manuel* (2013) is presented, with emphasis on the anomalous extension of the rainfall footprint observed in comparison to the simple superposition of two individual tropical cyclones. It's conceptually shown that the combined circulation of humidity around the double system explains the anomalous extensions towards NE Mexico in the case of *Ingrid* and SE Mexico in the case of *Manuel*. It is shown that this combined system resulted in a much larger footprint than the previous historic reference on the Pacific coastline, hurricane *Pauline* in 1997. For three specific basins close to Acapulco, state of Guerrero, the return periods of the rainfall by *Ingrid-Manuel* were computed, identifying that, while the daily rainfalls resulted extreme, the sequence of daily rainfall in two to five day intervals correspond to a much larger return period.

**Keywords:** tropical cyclones, cyclonic rainfall, cyclone interaction, extreme hydrometeorological events, *Ingrid*, *Manuel*, Acapulco, rainfall footprint.

---

Recibido: 26/05/2015  
Aceptado: 22/06/2016

---

## Introducción

Durante la temporada 2013 de ciclones tropicales se presentó una situación inédita sobre México: dos ciclones tropicales se presentaron de manera simultánea: la tormenta tropical *Manuel* por el Pacífico y el huracán *Ingrid* por el Golfo de México, suficientemente cerca uno del otro como para permitir cierta interacción en la manifestación de sus precipitaciones pluviales sobre el territorio nacional. A pesar de que ninguno de ellos, por sí mismo, resultaba especialmente peligroso, alcanzando *Manuel* un pico en su velocidad de vientos máximos sostenidos de 111 km/h (clasificado como *tormenta tropical*), e *Ingrid* un pico en su velocidad de vientos máximos sostenidos de 139 km/h (clasificado como un *huracán categoría I*), el hecho es que produjeron uno de los desastres de mayor envergadura de los que se tenga registro en el país. El intervalo de acción simultánea de estos dos ciclones tropicales fue de 72 horas, de las 08:00 (hora del Centro de México; en adelante, todas las horas se referirán a este horario) del 13 de septiembre a las 08:00 del 16 del mismo mes de 2013. Aunque al final de este intervalo *Ingrid* apenas iniciaba su incidencia sobre el noreste de México, *Manuel* se había declarado como disipado (temporalmente) desde cuatro horas antes cerca de Bahía de Banderas. Para las 16:00/16sep, *Ingrid* fue declarado una depresión tropical. Aunque el remanente de *Manuel* se volvió a regenerar al recuperar contacto con las aguas cálidas del Pacífico mexicano, esto no ocurrió sino hasta las 16:00/16sep, por lo que la porción final de ambos ciclones tropicales no resultó simultánea y por ello no se considera como sujeto del presente estudio. En esta segunda etapa de *Manuel*, la regeneración alcanzó el nivel de huracán categoría I antes de reincidir en tierra sobre las costas de Sinaloa. La fracción del país sujeto a lluvias por el efecto combinado de los dos ciclones tropicales fue de 77%, aproximadamente (Pedrozo-Acuña, Breña-Naranjo, & Domínguez-Mora, 2014), lo que corresponde a un área mucho mayor que la que hubiese sufrido de este efecto con la simple adición de las

huellas de precipitación esperadas para cada uno en lo individual, de acuerdo con criterios presentados más adelante. También la duración total de las lluvias en las zonas afectadas resultó mayor que la que de forma típica se produce con ciclones tropicales de tales características. Estas dos características (extensión y duración de las lluvias) se analizan en el presente estudio, bajo la hipótesis de que resultaron determinantes en la magnitud del desastre ocurrido.

García-Arróliga, Méndez-Estrada, Reyes-Rodríguez y Marin-Cambranis (2015) asocian 119 muertes (98.3% del total relacionadas con desastres de 2013) a este par de ciclones tropicales, así como un valor de 34 829 millones de pesos (82% del total 2013) en daños. La mayor concentración de muertes y valor de los daños se dio en el estado de Guerrero (105 muertes y 23 441 millones de pesos); esto, a pesar de que la trayectoria de *Manuel* no incidió directamente en ese estado. Alrededor de 40 000 turistas se quedaron varados en el destino turístico de Acapulco, Guerrero, debido a las inundaciones generalizadas provocadas por las lluvias ocurridas del 13 al 16 de septiembre de 2013. Pedrozo-Acuña et al. (2014) presentan un análisis de las lluvias a nivel nacional del 1° al 19 de septiembre de 2013, pero sólo sobre el acumulado total, además del cálculo de la fracción que las lluvias representan de la lámina típica anual —en 19 estaciones sobre Guerrero y Michoacán—, encontrando gran variabilidad, que va desde 11 hasta 186% (este último, en Huitzuc, Guerrero). En un análisis más detallado de cuatro estaciones cercanas a Acapulco, los mismos autores encuentran periodos de retorno para la máxima diaria ocurrida en este evento relativamente moderados, de entre 25 a 40 años. Su estimación del caudal máximo (basado en evidencias *a posteriori* del nivel de agua alcanzado) en la estación Km 21 sobre el río La Sabana fue de unos 45 años. Dichos autores no muestran análisis representativos de cuencas completas ni de acumulados mayores a 24 horas.

Roth (2015) ofrece numerosas (365) huellas de precipitación pluvial (basada en mediciones

puntuales en superficie) producidas por ciclones tropicales que incidieron en tierra, la mayor parte de ellos sobre EUA, bajo condiciones orográficas planas o moderadas, pero muchos en México y unos más sobre islas del Caribe, para la temporada 1964-2014. De ellas se deduce que la huella de lluvias significativas (iguales o mayores que 50 mm) de un ciclón tropical se mantiene dentro del entorno de 250 km alrededor de la trayectoria. En Rosengaus (2016a) se muestran otras 73 huellas de precipitación pluvial de ciclones tropicales que incidieron sobre o pasaron cerca de México, muchos de ellos sobre las condiciones orográficamente abruptas características de este país; esto, para el intervalo de 1993 a 2015 (muestras completas sólo de 2011 a 2015). En dichas huellas de lluvia se observa que aunque el umbral de 250 km se mantiene, al incidir cuasi-perpendicularmente a una sierra, la zona de lluvias observada muestra un sesgo hacia el área en donde la circulación de los vientos va del mar hacia el eje de la sierra, es decir, que se *desliza* hacia el SE en el Pacífico mexicano y hacia el NW o N en el Golfo de México. También se advierte que para las Sierras Madres de México, las lluvias significativas ( $\geq 50$  mm) se mantienen restringidas a la vertiente marítima de la Sierra, aunque el eje de ésta se encuentre a menos de 250 km de la línea del litoral. El umbral de 250 km alrededor de la trayectoria que resulta un máximo para la huella de lluvias significativas ( $\geq 50$  mm) es compatible con el modelo estadístico de pronóstico de lluvias ciclónicas *R-CLIPER* (Marks, Kappler, & DeMaria, 2002; Marks & DeMaria, 2003; Tuleya, DeMaria, & Kuligowski, 2007; Lonfat, Rogers, Marchok, & Marks, 2007) y con el modelo de proyección de lluvias actuales (desde satélite en banda microondas) sobre la(s) trayectoria(s) pronosticada(s), llamados *TRaP* y *e-TraP* (Kidder, Kusselson, Knaff, & Kuligowski, 2001; Kidder et al., 2005; Ferraro et al., 2005). Análisis detallados de casos emblemáticos (Mooney et al., 2001) también confirman este umbral para la extensión de precipitaciones significativas por un ciclón tropical.

Este trabajo estudia las anomalías del evento combinado *Ingrid-Manuel*, especialmente en cuanto a extensión y duración del campo de lluvias, con respecto al que se esperaría para cualquiera de estos casos en lo individual y en simple adición aritmética de ambos, como una posible (y parcial) explicación de la magnitud del desastre que produjeron sobre México. Primero se realiza un análisis de las precipitaciones diarias de 08:00/13sep2013 a 08:00/16sep2013 y su acumulado total, luego se contrastan contra el caso histórico emblemático previo (*Pauline*, 1997) en la zona más afectada, concluyendo con un análisis más detallado de la precipitación ocurrida en tres cuencas cercanas a Acapulco, en un contexto histórico con los datos 1961-2010. Finalmente, se discuten resultados en el contexto de enfrentar la emergencia y se presentan conclusiones.

### Análisis de las precipitaciones diarias del 13 al 16 de septiembre de 2013

El Servicio Meteorológico Nacional de México envía diariamente a la comunidad internacional un subconjunto de las mediciones pluviométricas que la Comisión Nacional del Agua y otros organismos realizan con cierre en cada mañana a las 08:00 hora local. El análisis de las precipitaciones diarias desde las 08:00 horas del 13 de septiembre a las 08:00 horas del 16 de septiembre de 2013 se realizan con base en estos datos, pero ya interpolados sobre una malla regular con resolución de  $0.2^\circ$  de latitud y longitud. Esto, para hacerlas directamente comparables con las mediciones históricas 1961-2010, disponibles en la base de datos *MAYA* v1.1 (Rosengaus, 1996; Quintas, 2004). El número de mediciones puntuales de la que se interpoló la información histórica es mayor, del orden de unos 3 300 puntos de medición cada día. Los segmentos de las trayectorias en cada uno de los días se obtuvieron de la trayectoria operativa (en contraste con el *best track* de las bases de datos históricas). Las posiciones a las 08:00 horas de cada día son linealmente interpoladas de las posiciones disponibles en los boletines del

Centro Nacional de Huracanes de Miami más próximas a las 08:00 horas.

Aunque el ciclón tropical *Ingrid* fue declarado como tal previamente, el primer día en el que ambos, *Ingrid* y *Manuel*, actúan simultáneamente es de las 08:00 horas del 13 de septiembre a las 08:00 horas del 14 de septiembre de 2013. En la figura 1 se muestra el mapa de precipitaciones, en conjunto con los segmentos de las trayectorias recorridas en dicho día. Se resaltan las isoyetas de 50 mm en línea punteada y de 100, 200,... etc., en línea más gruesa. Alrededor de cada trayectoria se presenta la vecindad de 250 km alrededor de ella como indicador del área dentro de la cual se esperarían las lluvias significativas ( $\geq 50$  mm), en el caso de independencia total de cada uno de los ciclones. Ese día, la velocidad de vientos sostenidos máxima fue de 93 km/h para *Ingrid* y de 74 km/h para *Manuel*.

Se observa claramente que ocurrió poca lluvia dentro de los entornos esperados, observándose un deslizamiento de la misma hacia el este sobre la vertiente marítima Pacífico y hacia el NW en la vertiente marítima del Golfo de México. El pico en la vertiente Pacífico resultó de 132.4 mm sobre el punto  $(-97.8, +16.0)$ , unos 350 km al este del centroide de la trayectoria en dicho día. El pico en la vertiente Golfo de México, 171.3 mm, se presentó sobre el punto  $(-97.8, +20.4)$ , unos 250 km al NW, al punto de mayor aproximación a tierra de *Ingrid* en dicho día. Es importante enfatizar que estos picos son representativos de promedios en celdas de unos 400 km<sup>2</sup>. En un intento por explicar conceptualmente esta anomalía, en la figura 2 se muestra el mismo mapa de lluvias, pero ahora súper impuesto un esquema de la circulación de cada uno de los vórtices. Las extensiones observadas se explican al considerar la circulación de

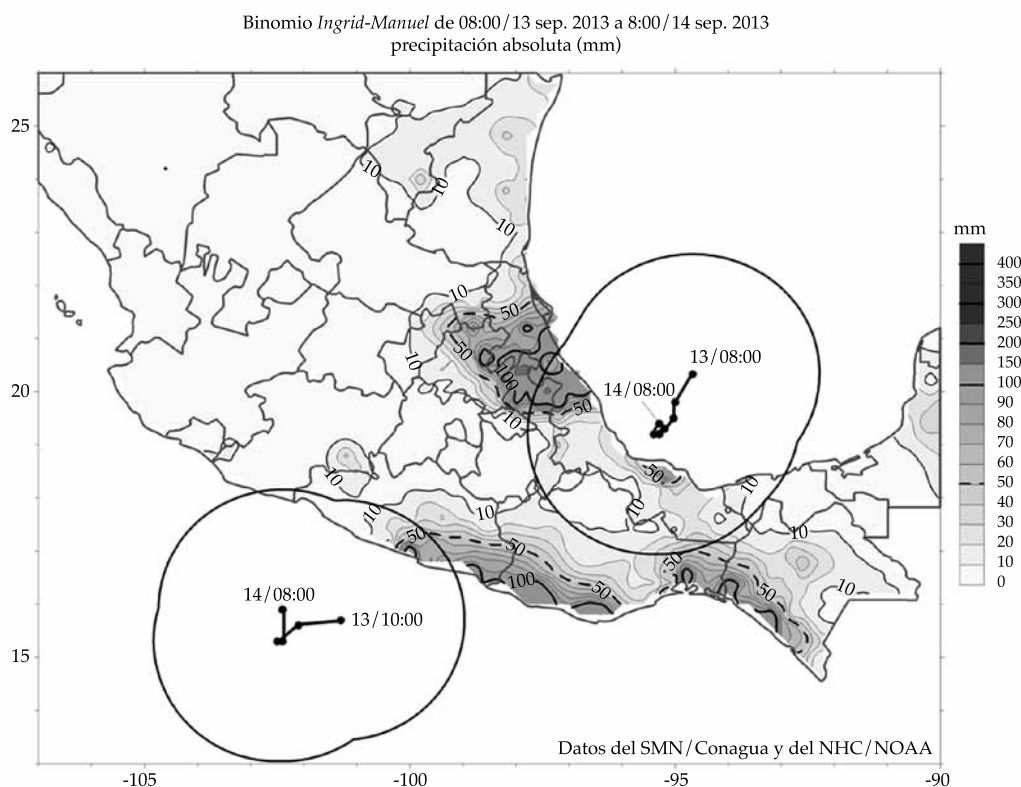


Figura 1. Mapa de lluvias de 08:00/13sep2013 a 08:00/14sep2013 con los segmentos de trayectoria recorrida y sus entornos de 250 km.

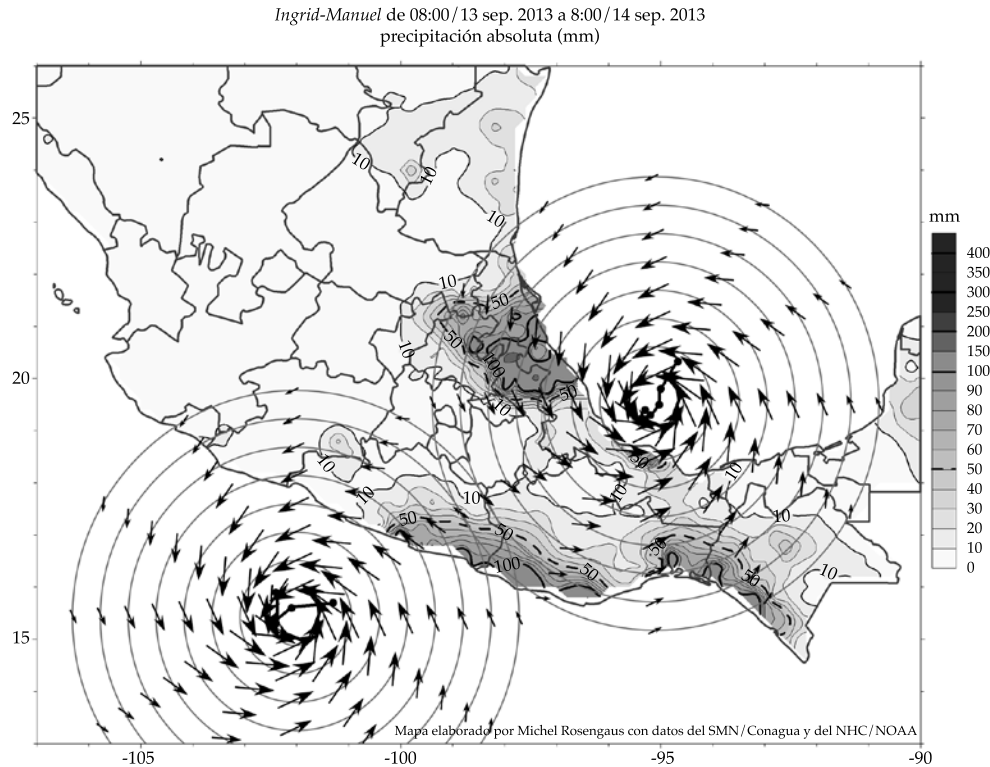


Figura 2. Mapa de lluvias del primer día de acción simultánea de *Ingrid* y *Manuel*, con esquema de circulación de cada uno de ellos superpuesto.

humedad alrededor de ambos vórtices. En este sentido, las lluvias sobre la vertiente marítima Pacífico de Chiapas se explica más por la circulación de *Ingrid* en el Golfo de México que por la circulación de *Manuel* en el propio Pacífico. En términos relativos, las lluvias correspondientes a este primer día alcanzan valores de 5 y hasta 10% de la lámina media anual local.

El segundo día de acción simultánea de *Ingrid* y *Manuel* se da de 08:00/14sep2013 a 08:00/15sep2013, cuyas precipitaciones y segmentos de trayectoria se presentan en la figura 3, junto con el entorno de 250 km alrededor de cada segmento de trayectoria. De nuevo se observa que sólo una fracción pequeña de la lluvia se presentó dentro de los límites normales de precipitación significativa ( $\geq 50$  mm). La mayor parte de ella se concentra hacia el este en la vertiente Pacífico y hacia el oeste y NW en la vertiente del Golfo de México. En el primer caso,

el pico se da en el punto  $(-99.8, +17.0)$ , con 293.1 mm, unos 250 km al este del centroide de la trayectoria recorrida en dicho día por el centro de giro de *Manuel*. En el segundo caso, el pico se presenta en las coordenadas  $(-98.6, +21.2)$ , con valor de 172.2 mm, unos 300 km al oeste del centroide de la trayectoria recorrida durante dicho día. En esa fecha, las velocidades de viento máximo sostenido fueron de 111 km/h para *Manuel* y de 139 km/h para *Ingrid*. Obsérvese que cerca del punto final de *Manuel* para ese día, muy próximo al litoral, y a pesar de que se clasificaba ya como una tormenta tropical cerca del límite de huracán, la precipitación pluvial es muy escasa. En términos relativos, en este segundo día, las precipitaciones alcanzaron de 5 a 10% de la lámina media anual en la vertiente Golfo de México, y de 5 a 20% en la vertiente Pacífico, con este 20% muy cerca de Acapulco, la zona de mayores daños.

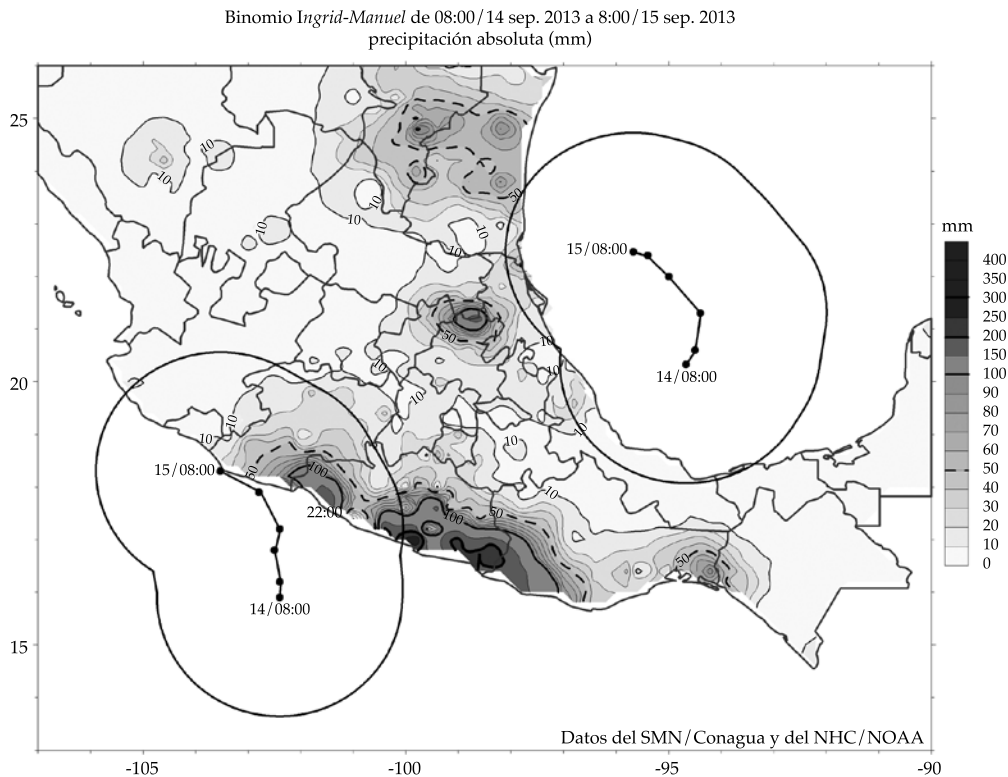


Figura 3. Mapa de lluvias de 08:00/14sep2013 a 08:00/15sep2013 con los segmentos de trayectoria recorrida y sus entornos de 250 km.

Repitiendo el ejercicio conceptual del primer día sobre la circulación combinada de ambos ciclones tropicales, en la figura 4 se presenta el mismo mapa de lluvias con el esquema de circulación superpuesto. Nuevamente, la distribución geográfica de la lluvia se explica mejor con la circulación combinada alrededor de ambos ciclones que con la circulación alrededor de cada uno de ellos, incluyendo las lluvias significativas presentes sobre la vertiente Pacífico en el Istmo de Tehuantepec. La anomalía penetración de humedad tierra adentro sobre el NE de México (antes de incidir en tierra *Ingrid*) también parece promoverse por la presencia simultánea de ambos vórtices.

El tercer día de acción simultánea de los ciclones tropicales *Ingrid* y *Manuel* es de 08:00/15sep2013 a 08:00/16sep2013. El mapa de la huella de lluvia, así como los segmentos de sus trayectorias recorridas y sus entornos de

250 km se muestran en la figura 5. De nuevo se observa gran parte de la precipitación significativa fuera de las zonas de vecindad de 250 km alrededor de las trayectorias, hacia el ESE en el caso de *Manuel*, hacia el WNW en el caso de *Ingrid*. El pico de precipitación pluvial del día sobre la vertiente Pacífico se dio sobre las coordenadas (-99.8,+17.0), con 324.1 mm, más de 400 km al ESE del centroide de posiciones del correspondiente centro de giro para dicho día. Para el caso de la vertiente del Golfo de México, el pico se presentó sobre las coordenadas (-99.8,+25.0) con 119.1 mm, unos 400 km al WNW del centroide de las posiciones del centro de giro de *Ingrid*. Para este día, las velocidades máximas sostenidas que alcanzaron *Manuel* e *Ingrid* fueron de 111 y 120 km/h, respectivamente. En términos relativos a la huella de lluvias significativas, alcanzó porcentajes de 5 a 30% de la lámina típica anual en la vertiente Pacífico,

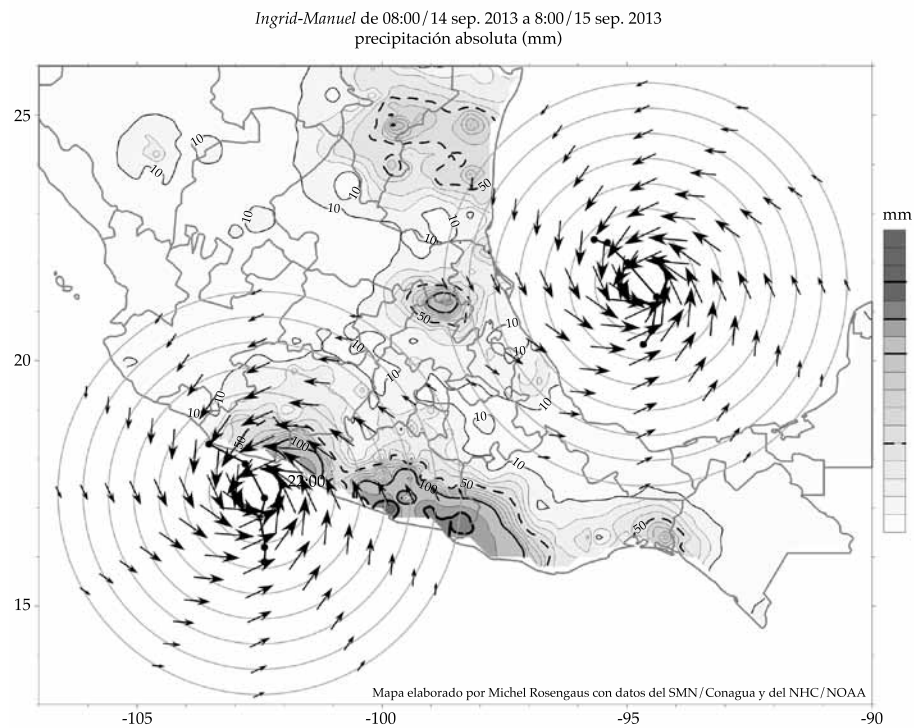


Figura 4. Mapa de lluvias del segundo día de acción simultánea de *Ingrid* y *Manuel*, con esquema de circulación de cada uno de ellos superpuesto.

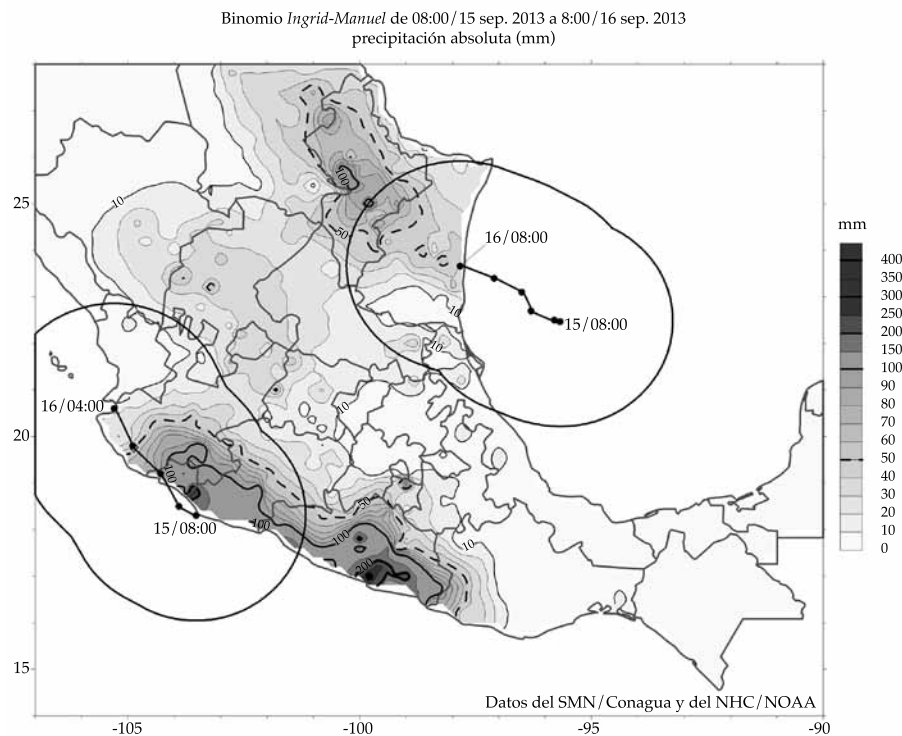


Figura 5. Mapa de lluvias de 08:00/15sep2013 a 08:00/16sep2013 con los segmentos de trayectoria y sus entornos de 250 km.

y entre 5 y 20% de la lámina típica anual en la vertiente del Golfo de México.

Las desviaciones de la huella de lluvias de este tercer día de acción simultánea también se pueden explicar de modo conceptual, considerando los esquemas de circulación ciclónica para ambos sistemas montados sobre el centroide de cada segmento de trayectoria, como se muestra en la figura 6. Una vez más se observa que el patrón de lluvias del día en cuestión se explica mejor considerando el transporte de humedad alrededor de ambos vórtices y difícilmente se puede hacer considerando este transporte como solamente alrededor de cada vórtice en lo individual. Las intensas lluvias sobre la zona de Acapulco fueron probablemente promovidas por la presencia del vórtice de *Ingrid*, extendiendo de modo significativo la huella hacia el ESE. De igual manera, la extensión hacia el WNW de la vecindad de *Ingrid* parecen más lógicos auxiliados por la circulación alrededor de *Manuel*.

### Análisis de las precipitaciones acumuladas desde el 13 hasta el 16 de septiembre de 2013

Se ha mostrado la anomalía de la ubicación de las zonas de lluvia diarias con respecto a lo que se esperaría en los casos individuales, pero la precipitación pluvial de cada día no parece haber sido récord y en este sentido su capacidad de producir un desastre es incierta. Por ello, en esta sección, se procede a evaluar la precipitación acumulada total en las 72 horas de acción conjunta de ambos ciclones tropicales. La huella total de precipitación pluvial, con los segmentos de trayectoria recorrida y su entorno de 250 km se muestran en la figura 7.

La anomalía en la ubicación de las lluvias (fuera de los entornos de 250 km) es menos notoria en este caso acumulado que en los días individuales, pero todavía evidente: una porción muy grande de la huella se encuen-

*Ingrid-Manuel* de 08:00/15 sep. 2013 a 8:00/16 sep. 2013  
precipitación absoluta (mm)

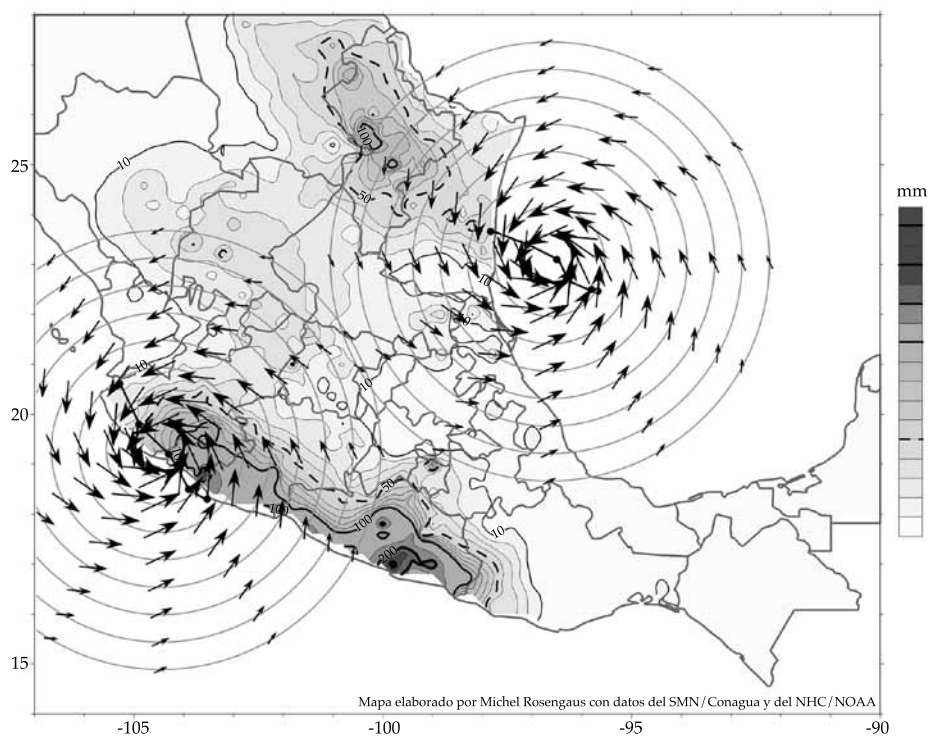


Figura 6. Mapa de lluvias del tercer día de acción simultánea de *Ingrid* y *Manuel*, con esquema de circulación de cada uno de ellos superpuesto.

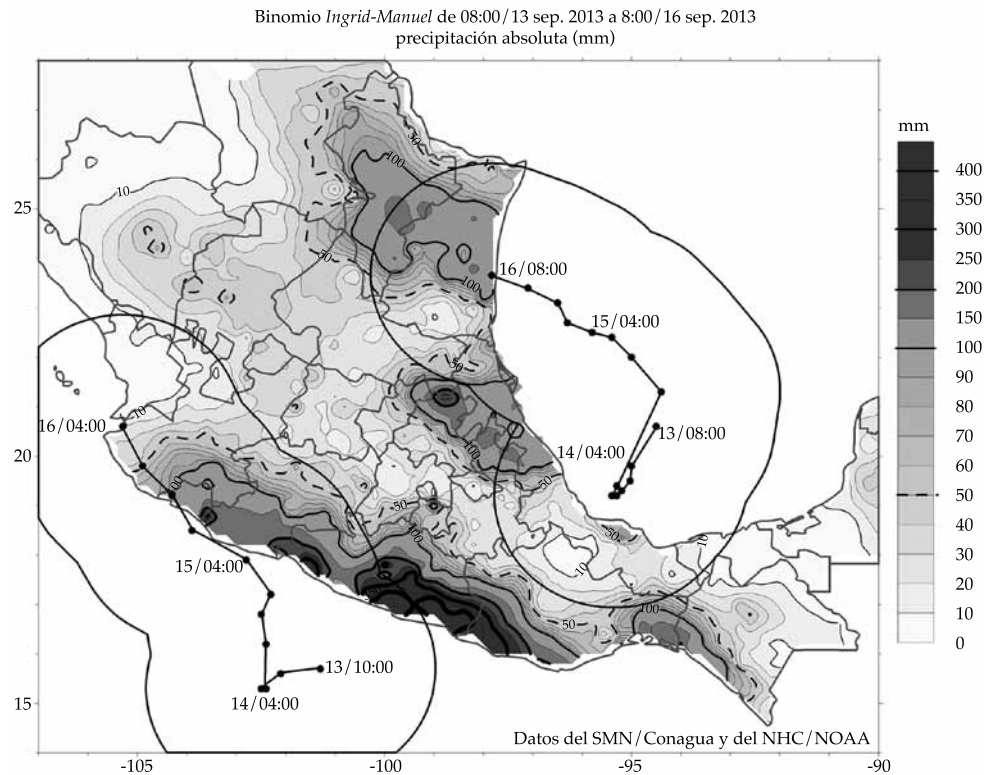


Figura 7. Mapa de precipitación pluvial acumulada de 08:00/13sep2103 a 08:00/16sep2013, con los segmentos de trayectoria y entornos de 250 km.

tra hacia el este, fuera del entorno de 250 km alrededor de la trayectoria de *Manuel*, y una porción significativa de la huella está hacia el W y WNW del entorno de 250 km alrededor de la trayectoria de *Ingrid*. El pico en la vertiente Pacífico se encuentra sobre  $(-99.8, +17.0)$ , con 692.1 mm, apenas adentro del entorno de 250 km y unos 400 km al ESE del punto de incidencia de *Manuel* sobre tierra. Al mismo tiempo, la precipitación acumulada al NW del punto de disipación de *Manuel* es muy escasa y es probable que sea humedad transportada desde el Golfo de México más que del propio Pacífico. El punto más lejano con precipitación de 50 mm se encuentra a ¡600 km! al este fuera del entorno de 250 km alrededor de la trayectoria de *Manuel* (en el sur de Chiapas). Sobre la vertiente del Golfo de México, el pico se encuentra sobre  $(-98.8, +21.2)$  con 284.3 mm ligeramente afuera, hacia el oeste, del entorno de 250 km alrededor

de la trayectoria de *Ingrid*. Con el propósito de comparar posteriormente contra el evento previo más extremo registrado (*Pauline*, 1997), el área cubierta y el volumen total precipitado dentro de la huella de lluvias significativas ( $\geq 50$  mm) sobre la vertiente Pacífico (el área delimitada por la línea punteada y el litoral), resultaron de 193 462 km<sup>2</sup> y  $3.127 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup>, con una lámina media de 161.6 mm.

Para dimensionar la magnitud del evento completo, el mapa de lluvias de la figura 7 se muestra de nuevo, ahora como fracción de la lámina típica anual (figura 8). Se observa que sobre la vertiente Pacífico, el evento representó entre 5 y 35% de la lámina típica anual, mientras que sobre el noreste de México alcanzó algo más de 30%. La fracción del territorio nacional que rebasó 5% de la lámina típica anual es muy significativa. Estos valores son iguales o mayores que las fracciones a las que corresponden las llu-

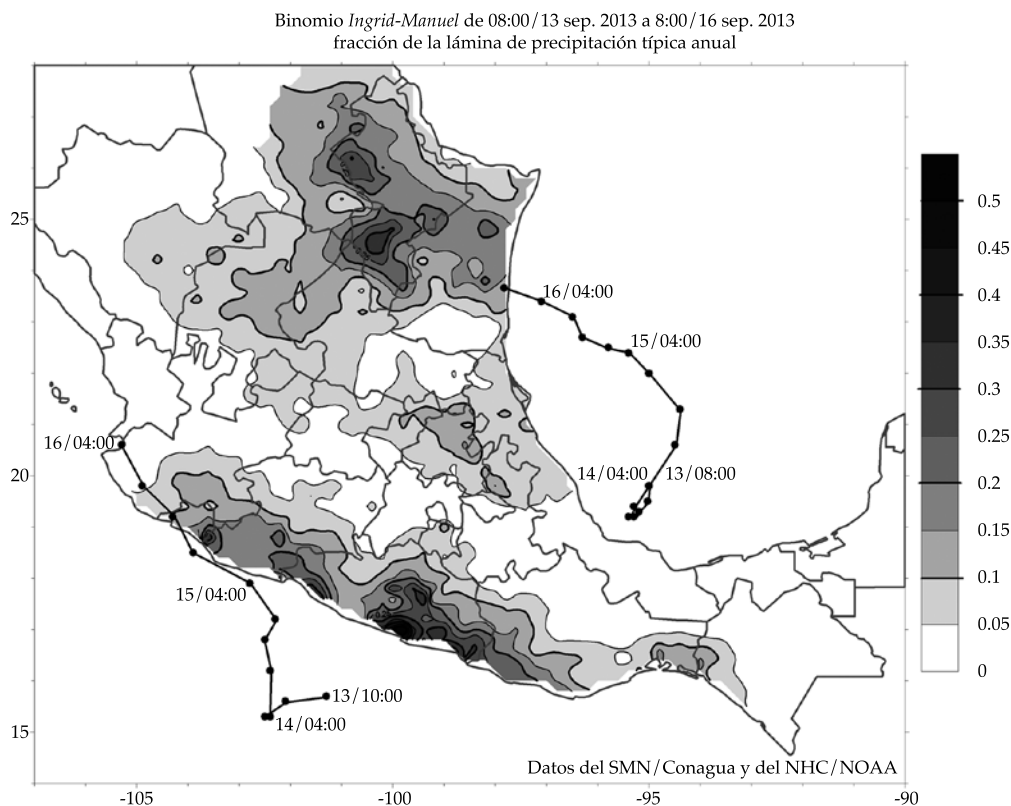


Figura 8. Mapa de las precipitaciones acumuladas de 08:00/13sep2013 a 08:00/16sep2013 como fracción de la lámina típica anual (1961-2010).

vias totales de temporadas de ciclones tropicales sobre el país de acuerdo con Breña-Naranjo, Pedrozo-Acuña, Pozos-Estrada, Jiménez-López y López-López (2015).

Resulta importante resaltar que el mapa de precipitaciones en la figura 7 no representa la totalidad de la precipitación asociada con los eventos de *Manuel* e *Ingrid* completos. Por un lado, *Manuel* se regeneró 12 horas después de su posición final en la figura 7 y volvió a dejar lluvias significativas en la zona de Sinaloa, donde reingresó a tierra. Por su lado, *Ingrid* continuó su trayectoria más allá de su posición final en la figura 7 hasta disiparse tierra adentro. En ambos casos, los mapas completos pueden ubicarse en línea en Rosengaus (2016b y c), y las lluvias y sus distribuciones geográficas resultaron típicas de fenómenos individuales sin la interacción sujeto de este estudio.

### Análisis de las precipitaciones del ciclón tropical *Pauline* del 7 al 10 de octubre de 1997

Como caso de comparación se utiliza el del huracán *Pauline* (del 5 al 10 de octubre de 1997), que hasta ahora mantenía el récord de precipitación pluvial diaria sobre la zona de mayor afectación del binomio *Ingrid-Manuel*: los alrededores de Acapulco. Precisamente en el Observatorio de Acapulco, localizado muy cerca de la zona Diamante, se midió una acumulación puntual pico en 24 horas de 412 mm al paso del huracán *Pauline*. Aunque *Pauline* resultó bastante más intenso que *Manuel*, alcanzando una velocidad de vientos máximo sostenido de 213 km/h sólo unas seis horas antes de incidir en tierra cerca de Puerto Ángel, Oaxaca (instante en el que presentaba 176 km/h), y que pasó mucho

más cerca de la totalidad de la vertiente Pacífico Sur que *Manuel*, su producción de lluvia significativa ( $\geq 50$  mm/24 h) resultó también en tres días consecutivos. A su paso sobre Acapulco, *Pauline* fue tan sólo un huracán marginal (120 km/h). En todo caso, considerados como casos individuales, la expectativa de lluvias de *Pauline* sería mucho más alta que la de *Manuel*. A *Pauline* se le adjudican entre 230 y 400 muertes y daños millonarios, que resultan difíciles de comparar cuantitativamente con los de *Ingrid-Manuel*, por haber iniciado el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred) sus evaluaciones objetivas de daños con la metodología actual poco después de 1997. En la figura 9 se presentan los mapas de lluvias en los tres días individuales

y en el acumulado de ellos; como en el caso de *Ingrid-Manuel*, se incluyen los segmentos de la trayectoria y los entornos de 250 km alrededor de ellas.

En el contexto de promedios sobre celdas de la base de datos MAYA v1.1, la precipitación diaria pico para *Pauline* resultó de 277.5 mm/24 h precisamente sobre las coordenadas (-100.0,+17.0). En esta misma celda, el acumulado en 72 horas resultó de 308.8 mm y el pico en el acumulado fue de 391.7 mm sobre las coordenadas (-98.8,+16.8); sólo 56.6% del correspondiente a *Manuel*.

Destaca de inmediato que, en este caso, sin interacción con otro vórtice cercano, *Pauline*, en efecto, mantuvo la mayor parte de su precipi-

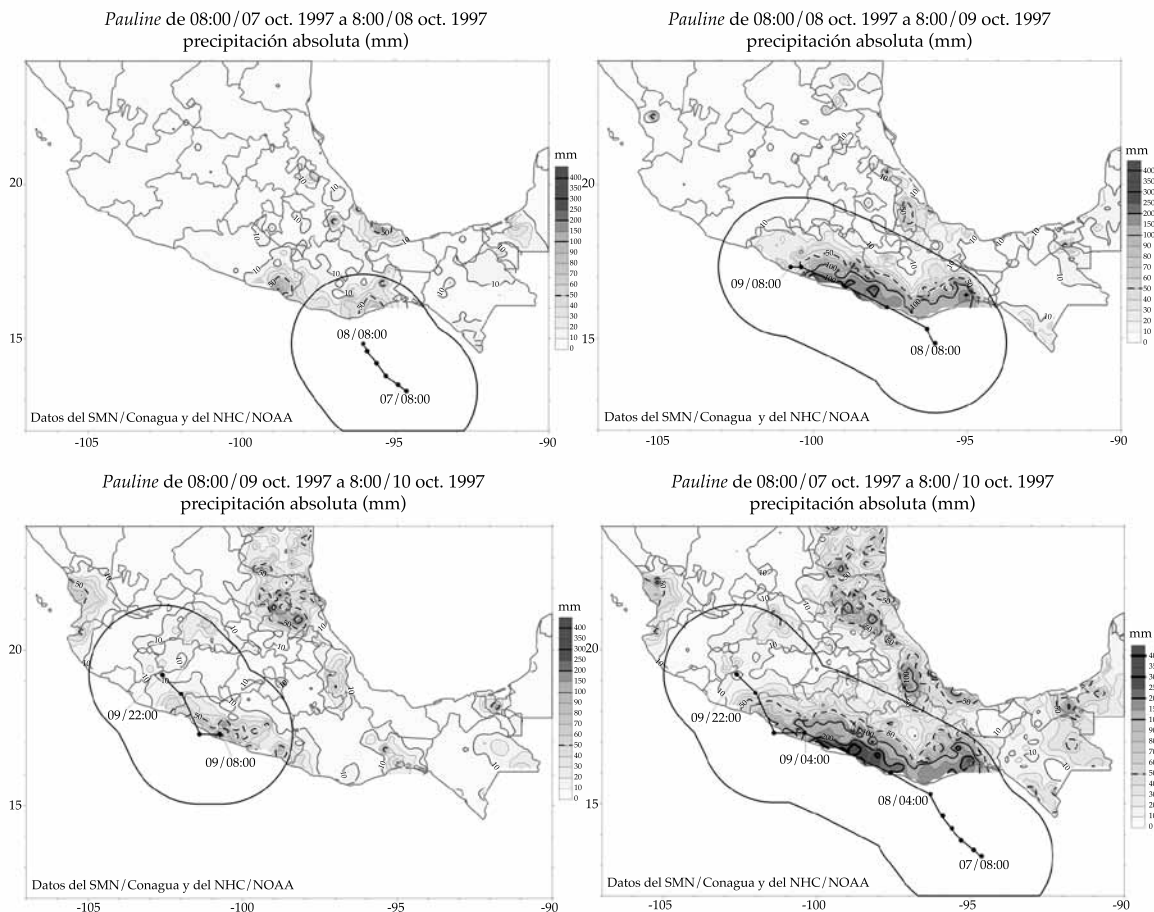


Figura 9. Evolución de lluvias y trayectoria del huracán *Pauline* día por día y el acumulado total del 08:00/07oct1997 al 08:00/10oct1997.

tación significativa ( $\geq 50$  mm) claramente por adentro de su entorno de 250 km. Como es de esperarse en un huracán, las lluvias más intensas se dan en los alrededores directos del centro de giro, sobre la llamada *pared del ojo del huracán*. En este caso, el área total de la huella de lluvias significativas resultó de 95 967 km<sup>2</sup> (49.6% de la correspondiente a *Manuel*); el volumen total precipitado de  $1.364 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup> (43.6% del correspondiente a *Manuel*), y una lámina media dentro de esta *huella* de 142.2 mm (del mismo orden de magnitud que en el caso de *Manuel*). En términos relativos, como fracción de la lámina típica anual, la huella de *Pauline* se muestra en la figura 10, resultando significativamente menos extrema que en el caso de *Manuel* de la figura 8. Se produjeron lluvias del orden de 5 a 25% de la lámina típica anual, pero las mayores fracciones siempre muy cerca de la trayectoria (es decir,

presumiblemente, lluvias producidas de manera directa bajo la *pared del ojo*).

En resumen, esta comparación muestra que el evento *Ingrid-Manuel*, sobre la vertiente marina del Pacífico Sur mexicano, resultó del orden del doble del previo evento récord (*Pauline*, 1997), esto tanto en área con precipitaciones significativas (2.0X) como en el volumen total precipitado (2.3X) y la lámina pico acumulada en 72 horas (1.8X). Lo anterior, además de la anomalía de presentar grandes cantidades de precipitación pluvial fuera de la zona esperada (de los 250 km alrededor del segmento de trayectoria correspondiente), es decir, una extensión anómala. Falta por evaluar el efecto de la interacción *Ingrid-Manuel* en términos de la anomalía en la duración del evento de lluvia, lo que se realizará analizando tres cuencas selectas cercanas a Acapulco a continuación.

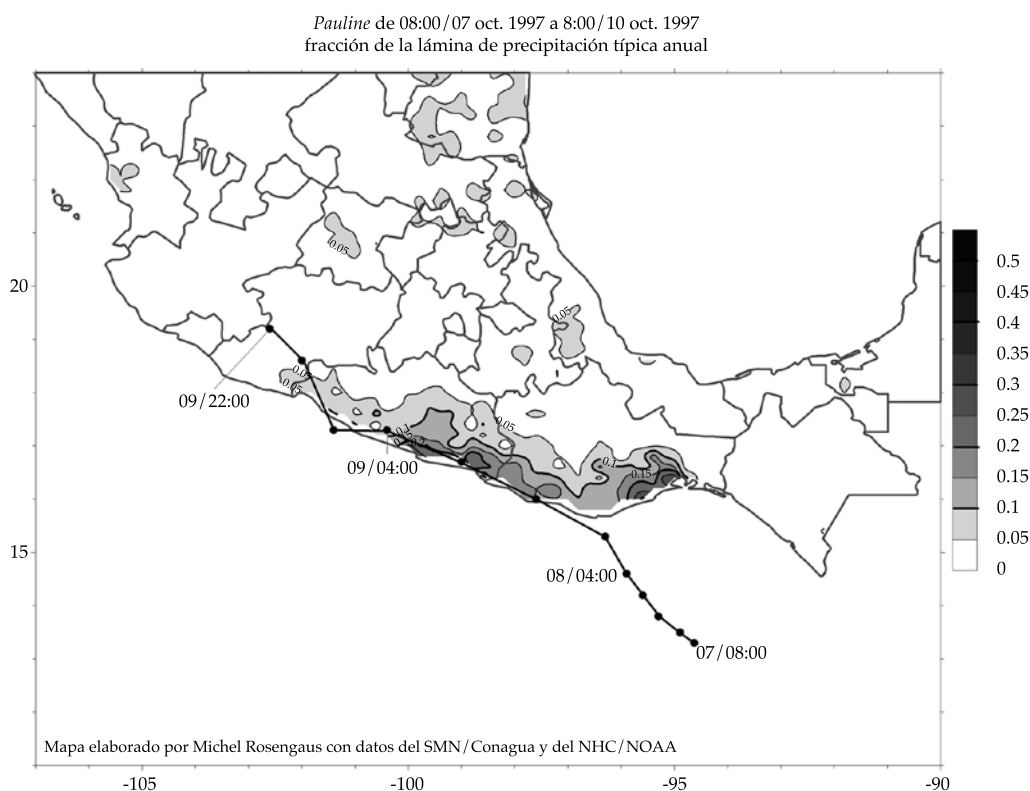


Figura 10. Mapa de las precipitaciones acumuladas de 08:00/07oct1997 a 08:00/10oct1997 como fracción de la lámina típica anual (1961-2010).

### Definición de las tres cuencas para análisis detallado y metodología

Se seleccionaron tres cuencas de interés, que sufrieron daños importantes, todas cercanas a Acapulco, para evaluar los periodos de retorno a los que correspondieron las lluvias generadas durante *Ingrid* y *Manuel*. Puesto que se requiere explorar la anomalía de estas lluvias en términos de duración, no sólo se analiza el periodo de retorno del evento para precipitaciones acumuladas en 24 horas, sino también para 2, 3, 4 y 5 días consecutivos de lluvias. A fin de no preseleccionar las secuencias de días más extremas, el análisis se realizó para todas las posibles secuencias de días consecutivos dentro del intervalo 08:00/11sep2013 a 08:00/18sep2013. Las cuencas tienen contrastes fuertes en su dimensión, mientras que la cuenca del Canal Colacho-Laguna Negra es tan pequeña (del orden de 15 km<sup>2</sup>) que tan sólo un nodo de la base de datos MAYA v1.1 la representa;

la cuenca del río La Sabana cuenta con aportaciones de cuatro nodos (área = 404.7 km<sup>2</sup>) y la cuenca del río Papagayo tiene aportaciones de 29 celdas (área = 7 450 km<sup>2</sup>). Las tres cuencas son prácticamente colindantes. El río La Sabana no descarga de manera directa al mar, sino que lo hace a través de la Laguna de Los Tres Palos. El análisis se realizó sólo hasta donde inicia el delta de dicho río hacia la Laguna de Los Tres Palos. Cuando el río La Sabana se desborda en su parte final, puede conectarse hacia la cuenca del Canal Colacho-Laguna Negra (Rosengaus, 2013). Análisis adicionales se realizaron para las subcuencas altas de la cuenca del río La Sabana (hasta la estación hidrométrica km 21) y de la cuenca del río Papagayo (hasta la Presa La Venta), pero estos resultados no se muestran en el presente trabajo. Los detalles de los análisis, incluyendo las muestras históricas completas de máximos anuales, se pueden consultar en Rosengaus (2013). Las cuencas en sí se muestran en la figura 11, en donde se identifican los diversos

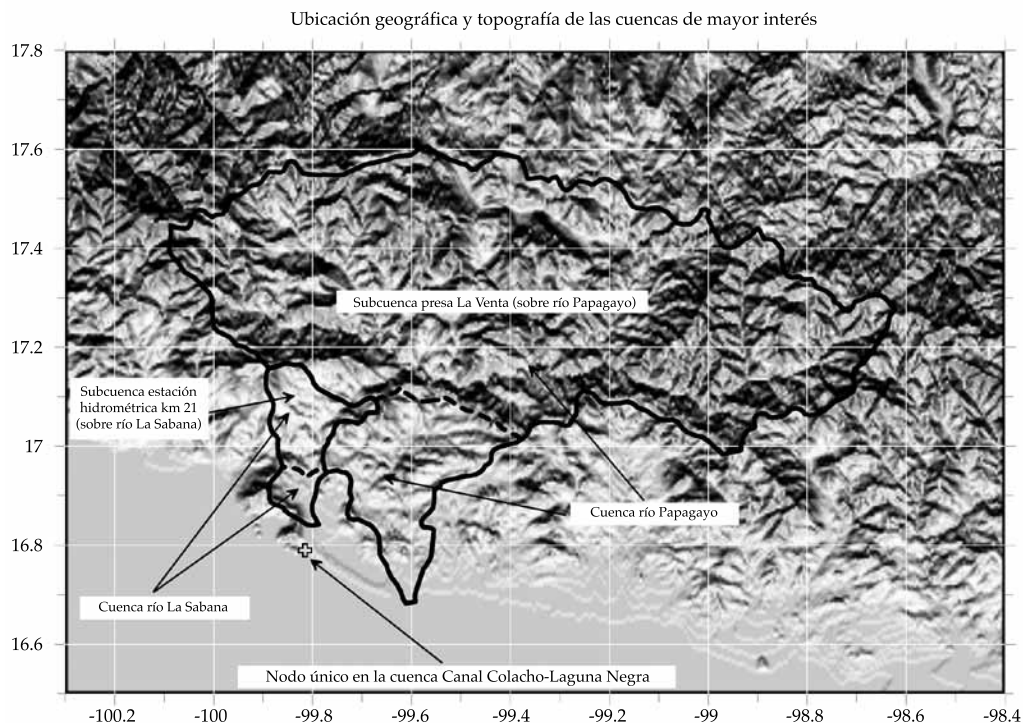


Figura 11. Delimitación de las tres cuencas (línea continua) sobre un mapa de relieve topográfico.

nodos que aportan información al análisis de cada cuenca, no solamente los que se encuentran en su interior, sino los que se encuentran apenas afuera de su periferia.

La metodología utilizada es la tradicional (Aparicio-Mijares, 1992), con excepción de que se utilizan datos del evento *Ingrid-Manuel* que han sido interpolados en una malla regular idéntica a la de la base de datos histórica MAYA v1.1, para poder hacer su comparación directa. Para cada cuenca se genera su serie histórica representativa, como promedio pesado de las series de los nodos en su interior o cerca de su periferia, con pesos proporcionales a la fracción del área efectiva de la cuenca dentro de la celda correspondiente a cada nodo. Con dicha serie diaria de cada cuenca, se generan además series para acumulados en 2, 3, 4 y 5 días consecutivos (todavía con granularidad diaria). Se extraen las muestras de los valores máximos anuales para secuencias de 1, 2, 3, 4 y 5 días consecutivos, mismos que se utilizan para comparar los valores producidos por el evento *Ingrid-Manuel* y asignarles un periodo de retorno. Puesto que la muestra histórica es de sólo 50 años, los valores para periodos de retorno mayores se obtienen ajustando diversas distribuciones de probabilidad de valores extremos (con apoyo de herramienta computacional en Jiménez, Domínguez y Cruz (1997). No se considera confiable la extrapolación más allá de  $T = 100$  años para una muestra histórica de tan sólo 50 años, por lo que los periodos de

retorno mayores a 100 años deben considerarse únicamente como indicadores burdos del orden de magnitud del periodo de retorno correcto. Es importante considerar que los resultados de la cuenca del Canal Colacho-Laguna Negra corresponden de manera directa al nodo con coordenadas (-99.8,+16.8) que se encuentra de forma directa en su vecindad.

### Resultados para la cuenca Canal Colacho-Laguna Negra

En el cuadro 1 se presentan los valores máximos históricos ocurridos para la ubicación de la cuenca Canal Colacho-Laguna Negra en los 50 años presentes en MAYA v1.1, es decir, aquellas láminas que corresponderían empíricamente al periodo de retorno de 50 años. Esto, para los acumulados en 1, 2, 3 4 y 5 días consecutivos.

Por otro lado, en el cuadro 2 se muestran las precipitaciones diarias (de 08:00 a 08:00 horas de las fechas indicadas) que se presentaron en cada uno de los siete días considerados durante el evento *Ingrid-Manuel* en la misma cuenca.

Se observa que para el día 14-15 ya se tenía una lámina con periodo de retorno apreciable (25 años), pero para el día siguiente, la lámina resultó inclusive más grande. El caso es que para estos dos días consecutivos, la acumulación resulta ya de 449.6 mm (212.7 mm + 236.9 mm), mayor que el máximo histórico para acumulados en dos días (317.4 mm del cuadro 1), e inclusive más alto que el máximo histórico para

Cuadro 1. Acumulaciones que corresponden empíricamente a periodos de retorno de 50 años en la cuenca del Canal Colacho-Laguna Negra.

| Acumulación en                  | 1 día | 2 días consecutivos | 3 días consecutivos | 4 días consecutivos | 5 días consecutivos |
|---------------------------------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Láminas máximas históricas (mm) | 245.4 | 317.4               | 398.7               | 456.8               | 486.6               |

Cuadro 2. Láminas diarias registradas en la cuenca del Canal Colacho-Laguna Negra durante el evento *Ingrid-Manuel*.

| Fecha              | 11 a 12 sep 2013 | 12 a 13 sep 2013 | 13 a 14 sep 2013 | 14 a 15 sep 2013 | 15 a 16 sep 2013 | 16 a 17 sep 2013 | 17 a 18 sep 2013 |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Lámina diaria (mm) | 25.7             | 12.1             | 81.9             | 212.7            | 236.9            | 141.3            | 0.9              |

acumulados de tres días (398.7 mm del cuadro 1). Bajo estas circunstancias no debe sorprender que los periodos de retorno para acumulados en secuencias de 2, 3, 4 y 5 días pudieran resultar muy altos. Finalmente, en el cuadro 3 se muestran las máximas acumulaciones registradas para cada secuencia de días consecutivos durante *Ingrid-Manuel* en la cuenca del Canal Colacho-Laguna Negra, con las fechas de inicio y fin del intervalo de acumulación, máximo histórico (1961-2010) y periodo de retorno al que corresponde en el contexto de la muestra histórica pertinente.

El último renglón corresponde al error estándar del ajuste de la distribución de probabilidad de valores extremos que mejor resultó, con el cual se obtuvo el periodo de retorno. Los periodos de retorno calculados más allá de 100 años se colocan en gris, para indicar que no se consideran valores confiables para una muestra histórica tan corta como 50 años y que deben ser considerados únicamente como indicadores burdos de orden de magnitud. Como se había previsto, aunque el periodo de retorno para el máximo diario resulta tan sólo de 45.8 años, los periodos de retorno para acumulados en 2, 3, 4 y 5 días fueron mucho mayores. Este es un claro indicador de que día por día, el evento de *Ingrid-Manuel* resultó significativo, pero que su verdadero extremo se manifiesta para la secuen-

cia de varios días consecutivos, confirmando la aseveración sobre una duración extraordinaria de las lluvias significativas. Para el caso de las otras dos cuencas, se procede bajo una metodología completamente análoga.

### Resultados para la cuenca del río La Sabana

Incluso cuando la cuenca del río La Sabana cuenta con aportaciones de sólo cuatro nodos de la base de datos *MAYA* v1.1, cada valor nodal es, a su vez, un promedio pesado de las mediciones de hasta 24 estaciones vecinas a dicho nodo (Quintas, 2004), por lo que el número total de estaciones de medición involucrado es suficiente para resultar representativo bajo toda condición. Con la serie diaria promedio de la cuenca se procede a obtener las equivalentes para acumulados en 2, 3, 4 y 5 días consecutivos también. Luego, se extraen los máximos anuales que corresponden a estas cinco distintas series. Los valores máximos anuales que resultan para cada intervalo de acumulación se muestran en el cuadro 4.

Las mediciones del evento en cuestión, interpoladas en malla regular y con el promedio pesado para sacar valores promedio sobre la cuenca en los siete días considerados del evento se presentan en el cuadro 5.

Cuadro 3. Máximas láminas acumuladas en diversos intervalos durante *Ingrid-Manuel* en la cuenca Canal Colacho-Laguna Negra.

| Días de acumulación               | 1               | 2               | 3               | 4               | 5               |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Lámina acumulada (mm)             | 236.9           | 449.6           | 590.9           | 672.9           | 711.7           |
| Hora/fecha inicial                | 08:00/15sep2013 | 08:00/14sep2013 | 08:00/14sep2013 | 08:00/13sep2013 | 08:00/13sep2013 |
| Hora/fecha final                  | 08:00/16sep2013 | 08:00/16sep2013 | 08:00/17sep2013 | 08:00/17sep2013 | 08:00/18sep2013 |
| Máximo histórico (1961-2010) (mm) | 245.48          | 317.43          | 398.76          | 456.81          | 486.62          |
| Periodo de retorno (años)         | 45.8            | 2 782           | ≈10 000         | 4 091           | 4 892           |
| Error estándar del ajuste (mm)    | 3.7             | 5.8             | 6.5             | 7.3             | 8.0             |

Cuadro 4. Acumulaciones que corresponden empíricamente a periodos de retorno de 50 años en la cuenca del río La Sabana.

| Acumulación en                  | 1 día | 2 días consecutivos | 3 días consecutivos | 4 días consecutivos | 5 días consecutivos |
|---------------------------------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Láminas máximas históricas (mm) | 206.8 | 259.7               | 293.8               | 330.0               | 354.3               |

Cuadro 5. Láminas diarias registradas en cuenca del río La Sabana durante evento de *Ingrid-Manuel*.

| Fecha              | 11 a 12 sep 2013 | 12 a 13 sep 2013 | 13 a 14 sep 2013 | 14 a 15 sep 2013 | 15 a 16 sep 2013 | 16 a 17 sep 2013 | 17 a 18 sep 2013 |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Lámina diaria (mm) | 26.1             | 13.5             | 73.5             | 257.3            | 292.1            | 224.2            | 0.2              |

En esta cuenca, más extremo aún que en la cuenca del Canal Colacho-Laguna Negra, tres días consecutivos presentan lluvias diarias mayores que la lámina diaria máxima histórica (ver cuadro 4). Es decir, el periodo de retorno resultará mayor para acumulados en 2 y 3 días, que para acumulados en un solo día. Finalmente, en el cuadro 6, se muestran las máximas acumulaciones registradas para cada secuencia de días consecutivos durante *Ingrid-Manuel* en la cuenca del río La Sabana, con las fechas de inicio y fin del intervalo de acumulación, el máximo histórico (1961-2010) y el periodo de retorno al que corresponde, en el contexto de la muestra histórica pertinente.

Obsérvese que para los acumulados en 2, 3, 4 y 5 días, el evento *Ingrid-Manuel* produjo

lluvias que rebasan 2X el máximo histórico correspondiente de la muestra 1961-2010 de 50 años. Por supuesto, en este caso, los periodos de retorno obtenidos son tan grandes que no deben ser considerados confiables a partir de una muestra histórica de sólo 50 años.

### Resultados para la cuenca del río Papagayo

Similar a lo realizado para la cuenca del río La Sabana, sólo que en este caso del río Papagayo, con aportaciones de 29 celdas de MAYA v1.1, en el cuadro 7 se presentan los máximos acumulados durante los 50 años disponibles para 1, 2, 3, 4 y 5 días de acumulación para la cuenca completa del río Papagayo (hasta su desembocadura al mar).

Cuadro 6. Máximas láminas acumuladas en diversos intervalos durante *Ingrid-Manuel* en la cuenca del río La Sabana.

| Días de acumulación               | 1               | 2               | 3               | 4               | 5               |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Lámina acumulada (mm)             | 292.1           | 549.5           | 773.7           | 847.2           | 860.6           |
| Hora/fecha inicial                | 08:00/15sep2013 | 08:00/14sep2013 | 08:00/14sep2013 | 08:00/13sep2013 | 08:00/12sep2013 |
| Hora/fecha final                  | 08:00/16sep2013 | 08:00/16sep2013 | 08:00/17sep2013 | 08:00/17sep2013 | 08:00/17sep2013 |
| Máximo histórico (1961-2010) (mm) | 206.8           | 259.7           | 293.8           | 330.0           | 354.3           |
| Periodo de retorno (años)         | 3 742           | > 10 000        | > 10 000        | > 10 000        | > 10 000        |
| Error estándar del ajuste (mm)    | 4.2             | 3.1             | 5.0             | 4.7             | 5.6             |

Cuadro 7. Acumulaciones que corresponden empíricamente a periodos de retorno de 50 años en la cuenca del río Papagayo.

| Acumulación en                  | 1 día | 2 días consecutivos | 3 días consecutivos | 4 días consecutivos | 5 días consecutivos |
|---------------------------------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Láminas máximas históricas (mm) | 160.8 | 193.6               | 250.4               | 272.1               | 294.3               |

Las acumulaciones con  $Tr = 50$  años pueden no parecer muy altas para las condiciones del Pacífico Sur mexicano, pero se trata de valores promedio sobre una cuenca extensa de 7 450 km<sup>2</sup>. Por otra parte, las mediciones (promedio sobre la cuenca) del evento para los siete días explorados se presentan en el cuadro 8.

En este caso, sólo en el intervalo 08:00/15sep2013 a 08:00/16sep2013 se rebasó la lámina diaria máxima histórica (1961-2010). Pero, de nuevo, las acumulaciones máximas en 2, 3, 4 y 5 días consecutivos rebasan de forma amplia a los máximos históricos registrados para dichos intervalos de acumulación, por lo que serían de esperarse periodos de retorno muchos más altos que 50 años. La comparación de las mediciones en el cuadro 8 con las muestras de

máximos anuales históricos en este caso producen los resultados que aparecen en el cuadro 9. Se observa otra vez el hecho de que, aunque el día más lluvioso en el evento *Ingrid-Manuel* en efecto resultó extremo, en términos de acumulados en 2, 3, 4 y 5 días consecutivos fue mucho más extremo, con periodos de retorno mayores a los 1 000 años.

### Discusión de los resultados en términos de atención a la emergencia

La magnitud del periodo de retorno para acumulados en un día del cuadro 3, 45.8 años, resulta congruente con el periodo de retorno que Pedrozo-Acuña *et al.* (2014) encontraron para las cuatro estaciones cercanas a Acapulco

Cuadro 8. Láminas diarias registradas en la cuenca del río Papagayo durante el evento *Ingrid-Manuel*.

| Fecha              | 11 a 12 sep 2013 | 12 a 13 sep 2013 | 13 a 14 sep 2013 | 14 a 15 sep 2013 | 15 a 16 sep 2013 | 16 a 17 sep 2013 | 17 a 18 sep 2013 |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Lámina diaria (mm) | 24.0             | 8.2              | 51.0             | 122.8            | 172.1            | 70.4             | 0.8              |

Cuadro 9. Máximas láminas acumuladas en diversos intervalos durante *Ingrid-Manuel* en la cuenca del río Papagayo.

| Días de acumulación               | 1               | 2               | 3               | 4               | 5               |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Lámina acumulada (mm)             | 172.1           | 295.0           | 371.6           | 416.4           | 449.3           |
| Hora/fecha inicial                | 08:00/15sep2013 | 08:00/14sep2013 | 08:00/14sep2013 | 08:00/13sep2013 | 08:00/12sep2013 |
| Hora/fecha final                  | 08:00/16sep2013 | 08:00/16sep2013 | 08:00/17sep2013 | 08:00/17sep2013 | 08:00/17sep2013 |
| Máximo histórico (1961-2010) (mm) | 160.8           | 193.6           | 250.4           | 272.1           | 294.3           |
| Periodo de retorno (años)         | 89.4            | 1 307           | 1 169           | 1 673           | 2 825           |
| Error estándar del ajuste (mm)    | 2.8             | 2.9             | 4.2             | 4.0             | 3.9             |

que analizaron con detalle, lo cual aumenta la confianza de los valores de periodos de retorno mucho más altos encontrados para las cuencas río La Sabana y Papagayo realizados bajo igual metodología. No es común identificar análisis de eventos extremos que se orienten a los periodos de retorno para diferentes secuencias de días consecutivos, ni para estaciones aisladas, ni para valores promedio sobre cuencas.

Estos análisis de varios días consecutivos serían de importancia cuando la duración de las lluvias significativas rebasaran el tiempo de concentración de la cuenca de interés en sí, pues la manifestación de dichas lluvias no se dará únicamente en el caudal pico sobre el cauce, sino en el volumen total escurrido (es decir, también en la duración del hidrograma). Desde el punto de vista de toma de decisiones de protección civil, tendrá impacto en la duración y extensión de la inundación, una vez que el cauce normal ha sido rebasado. En el caso del río La Sabana, que en términos de lluvia muestra periodos de retorno extraordinariamente grandes, los vuelos sobre la zona dañada y las posteriores visitas por tierra a puntos selectos, así como la modelación numérica de la avenida, muestran que dicho cauce se desbordó mucho antes del punto donde se encontraba antiguamente la estación hidrométrica Km 21 (Rosengaus, 2013), incorporándose al delta del río hacia la Laguna de Los Tres Palos por sitios muy distintos al cauce usual. Estos estudios de campo también mostraron que el desbordamiento del río La Sabana rebasó su parteaguas con la cuenca del Canal Colacho-Laguna Negra, drenando parcialmente a través de ellos (de forma muy lenta) hacia el mar. Esto es, la precipitación propia ocurrida dentro de la cuenca del Canal Colacho-Laguna Negra, por más alta que haya sido, no fue la única causa del grave desbordamiento de la Laguna Negra por sobre la carretera que une a Acapulco con su Aeropuerto Internacional. Gran parte de este volumen de inundación provenía de precipitación ocurrida sobre la cuenca del río La Sabana. La seguridad contra inundaciones de la zona Diamante de Acapulco en el futuro necesariamente tendrá que considerar esta

posibilidad de precipitaciones sobre la cuenca del río Sabana, drenando a través de la Laguna Negra hacia el mar.

## Conclusiones

Dado que ni la intensidad de la tormenta tropical *Manuel* (en el Pacífico nororiental) ni del huracán *Ingrid* (en el Golfo de México) resultaron especialmente extremos, y ya que en la mayor parte de su trayectoria no se encontraron muy cerca de tierra, la magnitud del desastre que produjeron resulta algo sorpresiva. El campo de lluvia que en combinación produjeron resulta mucho más extenso y con mayor duración que la que se hubiese podido esperar para cualquiera de ellos e, inclusive, para la simple adición de ambos. Así, se estima que su ocurrencia simultánea (en parte de su desarrollo) permitió interacciones que resultaron determinantes en la magnitud del desastre.

En este trabajo se ha mostrado la factibilidad de que la gran extensión de la huella combinada de lluvias se debiera al transporte de humedad alrededor de ambos vórtices, produciendo anómalas extensiones de las lluvias hacia el este del centro de giro de *Manuel*, y hacia el oeste y noroeste del centro de giro de *Ingrid*, con lluvias significativas ( $\geq 50$  mm) muy por fuera del entorno de 250 km, que es lo común en ciclones tropicales aislados.

Se comparó con el evento más extremo en el intervalo 1961-2010 en la zona aledaña a Acapulco: el huracán *Pauline* en 1997. A pesar de la relativa debilidad de *Ingrid* y *Manuel* como ciclones tropicales, en conjunto produjeron, en la vertiente marina Pacífico Sur de México, una huella de lluvias del orden de dos veces la huella que en su momento produjo *Pauline* en 1997 tanto en volumen precipitado como en extensión.

Por otro lado, el análisis de las precipitaciones ocurridas en tres cuencas en la zona de mayor afectación, cerca de Acapulco, Guerrero, en comparación con su historia de precipitaciones de 1961 a 2010, indica que aunque día por día el evento efectivamente resultó extremo, con

periodo de retorno en el rango de 40 a 100 años, las acumulaciones en 2, 3, 4 y 5 días consecutivos resultaron con periodos de retorno mucho mayores, tan grandes que una muestra de tan sólo 50 años de lluvias diarias resulta poco confiable para aseverar sus valores cuantitativos. Esto demuestra que en relación con el clima de extremos de la zona, la duración de las precipitaciones por el fenómeno combinado resultó sin precedente en la historia de precipitaciones de 1961 a 2010.

Se discuten varios puntos asociados con las conclusiones previas que resultan pertinentes para explicar la magnitud del desastre ocurrido y que deben considerarse en posibles casos futuros análogos, que incluyen el impacto no tanto en la magnitud del pico de los hidrogramas como en la duración de éstos (volumen total de inundación), la importancia del hidrograma sobre el río La Sabana como aportador de volumen para la cuenca del Canal Colacho-Laguna Negra, y el cambio de dinámica en la atención a la emergencia que proviene de la gran extensión de las zonas siniestradas, en áreas inesperadas con base en la experiencia casi exclusiva de la afectación por ciclones tropicales aislados.

## Créditos

Se agradece el apoyo recibido del Dr. Ángel Terán Cuevas en la generación de los entornos de los segmentos de trayectoria de los diversos ciclones tropicales. Se acredita el patrocinio de la Organización Meteorológica Mundial (en su programa PREMIA) bajo condiciones emergentes. Se agradece la dedicación de un árbitro anónimo, que promovió la reestructuración de este trabajo en una versión más directa y potencialmente más interesante para los lectores.

## Referencias

- Aparicio-Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie* (302 pp.). México, DF: Limusa.
- Breña-Naranjo, J. A., Pedrozo-Acuña, A., Pozos-Estrada, O., Jiménez-López, S. A., & López-López, M. R. (2015). The Contribution of Tropical Cyclones to Rainfall in Mexico. *Physics and Chemistry of the Earth, Elsevier*. Fecha de consulta: mayo de 2016. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2015.05.011>.
- Ferraro, R., Pellegrino, P., Turk, M., Chen, W., Qiu, Sh., Kuligowski, R., Kusselson, Sh., Irving, A., Kidder, S., Knaff, J. (2005). The Tropical Rainfall Potential (Trap) Technique. Part II: Validation. *Weather and Forecasting. American Meteorological Society*, 20, 466-475.
- García-Arróliga, N. M., Méndez-Estrada, K. M., Reyes-Rodríguez, R., & Marin-Cambranis, R. H. (2015). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en 2013* (80 pp.). México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación.
- Jiménez, E. M., Domínguez, M., R., & Cruz, M., M. (1997). *Manual de operación de los programas AX.EXE y CARACHID.EXE (para hidrología)*. México, DF: Área de Riesgos Meteorológicos, Cenapred. Recuperado de <http://documents.mx/documents/manualax.html>.
- Kidder, S. Q., Kusselson, Sh. J., Knaff, J. A., & Kuligowski, J. (October, 2001). *Improvements to the Experimental Tropical Rainfall Potential (TraP) Technique*. 11<sup>th</sup> Conference on Satellite Meteorology and Oceanography. Recovered from [https://www.researchgate.net/publication/237814530\\_IMPROVEMENTS\\_TO\\_THE\\_EXPERIMENTAL\\_TROPICAL\\_RAINFALL\\_POTENTIAL\\_TRA\\_P\\_TECHNIQUE](https://www.researchgate.net/publication/237814530_IMPROVEMENTS_TO_THE_EXPERIMENTAL_TROPICAL_RAINFALL_POTENTIAL_TRA_P_TECHNIQUE).
- Kidder, S. Q., Kusselson, Sh. J., Knaff, J. A., Ferraro, R. R., Kuligowski, R. J., & Turk, M. (2005). The Tropical Rainfall Potential (TraP) Technique. Part 1: Description and Examples. *Weather and Forecasting. American Meteorological Society*, 20, 456-464.
- Lonfat, M., Rogers, R., Marchok, T., & Marks, F. D. Jr. (2007). A Parametric Model for Predicting Hurricane Rainfall. *Monthly Weather Review, American Meteorological Society*, 135, 3086-3097.
- Marks, F. D., Kappler, G., & DeMaria, M. (2002). *Development of a Tropical Cyclone Rainfall Climatology and Persistence (R-CLIPER) Model*. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/242377492\\_Development\\_of\\_a\\_tropical\\_cyclone\\_rainfall\\_climatology\\_and\\_persistence\\_R-CLIPER\\_model](https://www.researchgate.net/publication/242377492_Development_of_a_tropical_cyclone_rainfall_climatology_and_persistence_R-CLIPER_model).
- Marks, F. D., & DeMaria, M. (2003). *Development of a Tropical Cyclone Rainfall Climatology and Persistence (R-CLIPER) Model. Final Report, Dic. 31, 2003*. Miami: Hurricane Research Division, Atlantic Oceanographical and Marine Laboratory, OAR, NOAA.
- Mooney, L., Adolphson, J., Feldt, J., Gabrielsen, P., Graham, K., Orrock, J., Stewart, K., & Trumbla, R. (2001). *Tropical Storm Allison Heavy Rains and Floods Texas and Louisiana, June 2001* (32 pp.). Silver Spring, USA: Service Assessment, National Weather Service, NOAA.
- Pedrozo-Acuña, A., Breña-Naranjo, J. A., & Domínguez-Mora, R. (2014). The Hydrological Setting of the 2013 Floods in Mexico. *Weather, Royal Meteorological Society*, 69(11), 295-302.
- Quintas, I. (2004). *Informe OMM/PROMMA No. 199. Explotación de la base de datos climatológica nacional del siglo XX. Programa de Modernización del Manejo del Agua* (31 pp.).

México, DF: Comisión Nacional del Agua, Organización Meteorológica Mundial.

Rosengaus, M. (1996). Una propuesta para el manejo eficiente de la información climatológica en México. En: *Memorias del VII Congreso Nacional de Meteorología*. Organización Mexicana de Meteorólogos, Chapingo, Estado de México.

Rosengaus, M. (2013). *Generación de estadísticas de volúmenes históricos precipitados para cuatro cuencas piloto en el río Lerma. Informe MM/PREMIA 219* (124 pp.). Organización Meteorológica Mundial y Comisión Nacional del Agua. Recuperado de <https://sites.google.com/a/wmo.int/mx/infospremia/premiagen>.

Rosengaus, M. (2016a). *Ciclotrop.com*. Recuperado de [http://ciclotrop.com/Ciclones Tropicales/xxxx](http://ciclotrop.com/Ciclones_Tropicales/xxxx) (donde xxxx="previo a 2011","2011","2012","2013","2014","2015").

Rosengaus, M. (2016b). *Ciclotrop.com*. Consultado en mayo de 2016. Recuperado de [http://ciclotrop.com/uploads/3/4/3/4/34340120/precip\\_y\\_tray\\_ingrid\\_0800\\_12sep2013\\_a\\_0800\\_18sep2013.png](http://ciclotrop.com/uploads/3/4/3/4/34340120/precip_y_tray_ingrid_0800_12sep2013_a_0800_18sep2013.png).

Rosengaus, M. (2016c). *Ciclotrop.com*. Consultado en mayo de 2016. Recuperado de [http://ciclotrop.com/uploads/3/4/3/4/34340120/precip\\_y\\_tray\\_manuel\\_fase\\_ii\\_0800\\_18sep2013\\_a\\_0800\\_21sep2013.png](http://ciclotrop.com/uploads/3/4/3/4/34340120/precip_y_tray_manuel_fase_ii_0800_18sep2013_a_0800_21sep2013.png).

Roth, D. (2015). *Tropical Cyclone Rainfall Data*. Weather Prediction Center, National Centers for Environmental Prediction, NOAA. Recuperado de <http://www.wpc.ncep.noaa.gov/tropical/rain/tcrainfall.html>.

Tuleya, R. E., DeMaria, M., & Kuligowski, R. J. (2007). Evaluation of GFDL and Simple Statistical Model Rainfall Forecasts for U.S. Landfalling Tropical Storms. *Weather and Forecasting, American Meteorological Society*, 22, 56-70.

## Dirección institucional de los autores

*Dr. Michel Rosengaus Moshinsky*

Consultor privado

Teléfonos: +52 (55) 5589 9213, 5404 7071

mickros@mac.com

*Dr. Felipe I. Arreguín Cortés*

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso

62550 Jiutepec, Morelos, México

Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensión 554

felipe\_arreguin@tlaloc.imta.mx

*Dr. David Korenfeld Federman*

Consultor privado

drkorenfeld@prodigy.net.mx

*M.I. Horacio Rubio Gutiérrez*

Comisión Nacional del Agua

Avenida Insurgentes Sur 2416

Copilco El Bajo, 04340 Ciudad de México, México

Teléfono: +52 (55) 5174 4000, extensiones 1687 y 1688

horacio.rubio@conagua.gob.mx