



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

**UMBRALES PROBABILÍSTICOS DE PRECIPITACIÓN
QUE DESENCADENAN PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA
EN LA SIERRA NORTE DE PUEBLA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

ALEJANDRA MONSERRAT GONZÁLEZ RAMÍREZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ERNESTO DOS SANTOS CAETANO NETO



MÉXICO D.F.

2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Al Dr. Ernesto Caetano por el apoyo para la elaboración de este trabajo, gracias por motivarme y continuar con este compromiso que empezamos desde hace unos años; pero sobre todo, gracias por su paciencia, dedicación, comprensión y excelente disposición.

Al Instituto de Geografía que a través del programa de Iniciación a la Investigación y posteriormente a la beca "Ma. Teresa Gutiérrez de MacGregor" permitió que concluyera satisfactoriamente mis estudios e integrarme a la rama de la investigación en la cual quiero continuar.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y Colegio de Geografía por ayudarme a encontrar mi vocación, pero sobre todo permitirme vivir increíbles experiencias en la mejor casa de estudios.

Al Mtro. Luis Galván por la ayuda a la elaboración cartográfica, y al Dr. Mateo Berti de la Universidad de Bologna, por la obtención de algoritmos.

A mis sinodales; Dra. Leticia Gómez Mendoza, Dra. Rosa María Bonilla Burgos, Mtro. Mauricio Galeana Pizaña y a la Dra. Mary Frances Rodríguez Van Gort por los comentarios y observaciones a este trabajo.

Dedicatorias

A mis padres, por ser el más grande motor de mi vida, por todo el apoyo brindado para cumplir uno de mis grandes sueños; pero sobre todo, por enseñarme que el amor y la justicia es un fin por el cual luchar. Gracias por su esfuerzo y sus incontables sacrificios. Lo hemos logrado juntos, los amo.

A mis segundos padres y hermanita Angie, porque ser otro gran soporte en esta decisión y regalarme innumerables sonrisas. También es su logro.

A la familia Ramírez y González por sus buenos deseos, y comprensión. Así como a Xiuh Papalotl y Rocío por su extraordinario cariño, las quiero.

A mis grandes amigos, Tona, Itzel, Ary, Israel, Magda, Shel, Andrés, Jorge, Edson y Lalo. Por enseñarme que la amistad sobrepasará las barreras del tiempo y que aquellas experiencias que vivimos valen más que cualquier cosa.

A mi Tona, mi dualidad, mi mejor amigo, mi todo; no cabe duda que la universidad me dio el mejor obsequio que eres tú. Gracias por volar a mi lado, por crecer, por sufrir y sonreír en esta etapa de mi vida; por conocerme más que nadie, pero sobre todo por tu amor, que puedo asegurar es eterno.

“La Tierra, por la magnificencia de sus horizontes, las frescuras de sus bosques y la pureza de sus fuentes, ha sido y continúa siendo la gran educadora y no ha cesado de llamar a las naciones a la armonía y a la conquista de la libertad”

Élisée Reclus

ÍNDICE

Contenido	Pág.
ÍNDICE	5
RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO 1. MARCO CONCEPTUAL	14
1.1. Peligro de procesos de remoción en masa	14
1.2. Procesos de remoción en masa.....	18
1.3. Causas de los procesos de remoción	22
1.3.1.Factores involucrados en la inestabilidad de las laderas.....	22
1.4. Factores determinantes	23
1.5. Factores desencadenantes.....	25
1.6. Condiciones climáticas	25
1.6.1.Precipitación	26
1.6.2.Sistemas Convectivos de Mesoescala	29
1.6.2.1.SCM en México.....	30
1.6.3.Fenómeno de El Niño, La Niña.	30
CAPÍTULO 2. DATOS Y METODOLOGÍA	32
2.1. Localización de la Sierra Norte de Puebla (SNP).....	32
2.2. Condiciones socioeconómicas de la población	33
2.3. Relieve	35
2.4. Climatología.....	40
2.5. Definición de umbrales	45

2.6.	Descripción del método de Bayes.....	49
	2.6.1.Una dimensión.....	50
	2.6.2.Dos dimensiones	53
CAPITULO 3. RESULTADOS		56
3.1.	Procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla	56
3.2.	Características de la precipitación	62
	3.2.1.Huracanes	65
	3.2.2.El Niño /La Niña.....	65
3.3.	Cálculo de la probabilidad Bayesiana	68
3.4.	Cálculo de una dimensión.....	71
3.5.	Cálculo de dos dimensiones	76
3.6.	Propuesta de un modelo de alerta a la población	81
RESULTADOS		84
DISCUSIÓN.....		86
CONCLUSIÓN.....		88
BIBLIOGRAFÍA.....		89
ANEXO		96

RESUMEN

La Sierra Norte de Puebla tiene como precedente histórico cientos de procesos de remoción en masa desencadenados por lluvias; en las que la intensidad y duración son las variables más importantes. Para la determinación de un umbral de precipitación, se calcularon tres tipos de probabilidad; *a priori*, marginal y condicional, para que se suscite un movimiento de ladera dadas determinadas características de precipitación. Para ello, se utilizó el método de Bayes desarrollado por Berti *et al.* (2012); para una dimensión como de dos dimensiones, dando como resultado una mayor probabilidad de desencadenamiento de movimiento cuando intensidades de 60 mm son superados entre uno y diez días. Por último, se elaboraron diversos rangos en que la precipitación supera o precede el umbral para desarrollar el sistema de alerta de la región proponiendo una adaptación del prototipo de alerta de Brunetti *et al.* (2009).

Abstract

The Sierra Norte de Puebla has historical precedent for hundreds of processes of mass movement triggered by rains; of which the intensity and duration are the most important variables. In order a threshold values which the rainfall may affect, the prior probability, marginal and conditional was calculated for the slope movement associated to rainfall characteristics. The Bayesian method developed by Berti *et al.* (2012) was used for one-dimensional and two-dimensions, resulting in a higher probability of triggering movement when the precipitation overcome 60 mm from one to ten days. Finally various classes in which the threshold is exceeded or preceded is developed, for the warning system proposal, by Brunetti *et al.* (2009).

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas los estudios referentes a los procesos de remoción en masa en todo el mundo se han incrementado debido al aumento de reportes de la presencia de estos fenómenos. En este periodo, se han registrado más de 502 eventos relevantes por la cantidad de pérdidas humanas y económicas para cada país de acuerdo a la Base Internacional de Desastres (EM-DAT, 2014).

En 1998 por ejemplo, debido al impacto del huracán Mitch se registraron flujos y deslizamientos en Guatemala, Nicaragua y el Salvador con un número aproximado de 10, 000 muertos (Schuster, 1996); en febrero del 2006 un deslizamiento en Filipinas ocasionó diversos daños como 1, 500 personas desaparecidas, 80 personas fallecidas y 300 viviendas que fueron enterradas (Yacat y Dolan, 2006) o en 2010, una lluvia intensa de monzón en China desencadenó un flujo en zonas densamente pobladas provocando más de 1, 700 muertos y cientos de personas desaparecidas (Riebeek, 2010). Este relativo incremento de fenómenos se ha atribuido a diversas causas como es el caso del calentamiento global y variaciones climáticas, a la deforestación, al incremento de la población o al avance de los asentamientos humanos hacia zonas peligrosas. Sin embargo, es prudente cuestionar si existe realmente un aumento en la frecuencia de los fenómenos o por el contrario incrementa la población asentada en zonas inestables y con riesgo de desastre; por lo que el tema de vulnerabilidad y riesgo no pueden dejarse fuera del entendimiento del fenómeno en sí.

Los procesos de remoción en masa (PRM) o gravitacionales son desencadenados por diversos fenómenos tanto naturales y antrópicos, tales como sismos, lluvias intensas, erupciones volcánicas, explosión de minas, colapsos, entre otros. De los anteriores, la precipitación suele ser el fenómeno más frecuente que los origina, dado que el agua infiltrada en los poros del suelo aumenta la inestabilidad de una ladera (Gutiérrez, 2008). A su vez, en las áreas donde se presentan eventos meteorológicos como ciclones tropicales o sistemas convectivos intensos las consecuencias son especialmente devastadoras (Alcántara, 2004).

En México, debido a su localización geográfica y aunado a los altos niveles de vulnerabilidad social, se tiene un cuantioso registro de desastres originados por procesos de ladera, y la mayor proporción en las últimas décadas han sido inducidos por la lluvia (Alcántara, 2004).

Cabe recordar las lluvias intensas en octubre de 1999 ocasionadas por la depresión tropical 11 que afectaron principalmente a los estados de Puebla, Veracruz, Hidalgo, Oaxaca, Chiapas y Tabasco dejando a localidades enteras incomunicadas por PRM y más de 200, 000 personas damnificadas, siendo la Sierra Norte de Puebla la más afectada (Diario Oficial de la Federación, 1999), o el desastre más reciente en septiembre del 2013 en la comunidad de La Pintada, Guerrero donde debido a las intensas lluvias de los huracanes Ingrid y Manuel provocaron la inestabilidad de una ladera, desencadenando un deslizamiento que cubrió la mayoría de las viviendas y alrededor de 70 personas fallecieron (La Jornada Guerrero, 2013).

La Sierra Norte de Puebla (SNP) es una de las regiones en las que año con año presenta algún tipo de PRM y que ha sido estudiada por diversos investigadores por ser un fenómeno recurrente durante la temporada de lluvias. Dicha región es catalogada con altos índices de pobreza por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL, 2012); que sumado a los altos regímenes de precipitación que van en promedio desde los 600 mm a más de 4000 mm anuales en las zonas altas (Vidal y García, 1990) y la accidentada orografía resultado de su ubicación entre tres provincias fisiográficas, la Sierra Madre Oriental, la Planicie Costera del Golfo y el Eje Neovolcánico Transversal; aumenta la condición de riesgo ante de ocurrencia de un desastre (Lugo, 2005).

Dentro de los registros en la SNP los más importantes fueron el de 1999 ya que debido a las intensas lluvias provocadas por la depresión tropical número 11 se registraron más de mil procesos gravitacionales con volúmenes desde unos metros cúbicos a cientos de miles de m³ (Lugo, 2005) que ocasionaron pérdidas humanas, cuantiosas pérdidas materiales y numerosos municipios incomunicados.

Además del ocurrido en el municipio de Zacapoaxtla en octubre del 2005, donde la precipitación acumulada en un solo día fue de 785 mm; más del triple que registra la media mensual de 244 mm. El resultado, fueron procesos gravitacionales en más de cuatro municipios colindantes.

Por lo tanto, para llevar a cabo una correcta prevención y alerta a la población; el conocimiento y entendimiento del fenómeno recurrente es crucial para disminuir el riesgo de desastre por PRM dada la precipitación.

Un umbral, es definido como el valor máximo o mínimo de cierta cantidad que se necesita para que un proceso tenga lugar o pase de un estado a otro (White *et al.*, 1998). Aunque existen numerosas metodologías para la determinación de umbrales de precipitación, Caine (1980) fue el primero en acuñar el término como desencadenante de inestabilidad basada en la intensidad y duración de la precipitación, la cual, sea suficientemente significativa para que el agua se infiltre en los poros del suelo y cambie las propiedades de una ladera. Para ello desarrolló una ecuación general que pueda ser aplicada independientemente de las condiciones físicas del terreno como aproximación al comportamiento de la lluvia.

De los métodos más utilizados están los modelos de regresiones, coeficientes de relación y teoremas condicionales como el de Bayes.

Por ejemplo, el trabajo de Dai y Lee (2000) en Hong Kong, evidencia la relación entre la frecuencia y magnitud de los movimientos de laderas con la duración de lluvias, 12 horas y 24 horas respectivamente, encontrando una mayor relación entre los eventos con volumen aproximado de 4 m³, es decir pequeños, con 12 horas, y más de 30 m³ con precipitaciones de 24 horas. O bien, para el caso de Puerto Rico, Jibson (1989) identifica que 560 mm en 24 hrs, y más 750 mm en más de 4 días son necesarios para que desencadene un flujo de detritos.

Los umbrales probabilísticos son los más usados. Tales son los trabajos de Medina y Cepeda (2011) en El Salvador, Guzzetti *et al.* (2007) para la región central y sur de Europa, Berti *et al.* (2012) para la región Emilia-Romagna en Italia, entre otros.

Actualmente con el desarrollo de las técnicas de teledetección, los umbrales de precipitación son cada vez más útiles para alertar sobre el peligro de un movimiento del terreno, ya que incorporan radares que proporcionan casi en tiempo real información sobre intensidad y duración de la precipitación (Wieczorek y Guzzetti, 1999), incluso algunos trabajos como el de Segoni *et al.* (2014) para Italia, son totalmente automatizados utilizando un procedimiento numérico con más de 25 umbrales.

Tal es la importancia para la prevención de desastres, que diversos países cuentan con un catálogo de umbrales para cada región considerando diferentes variables como tipo de suelo, climas y características geológicas (Wieczorek y Guzzetti, 1999), sin embargo, para México la literatura es escasa.

En México, estudios como el de Sánchez (2011), busca calcular periodos de retorno de los valores máximos de precipitación que desencadenen procesos de remoción en masa, con el fin de planificación urbana en la ciudad de Tampico. Para la SNP, Alcántara (2004) calculó coeficientes de retorno de lluvias que desencadenen PRM, calculando la precipitación acumulada precedente al evento, dividido por la precipitación media anual, y además un coeficiente del evento (precipitación del evento) dividido por la precipitación media anual. Para este caso, un coeficiente total mayor de 0.8 es necesario para desencadenar procesos de remoción en el comienzo de la temporada de lluvias, mientras que al final de la misma, los valores superiores a 0,4 causarían inestabilidad. Dicha inestabilidad, es determinada cuando la precipitación con un máximo de 24 horas supera los 200 mm y cuando las condiciones de humedad del suelo derivadas de precipitaciones anteriores son altas. A su vez, Cunalo *et al.* (2006) sostiene un umbral de 100 mm/día como activador para que suceda un PRM en la SNP, no obstante la información proporcionada es insuficiente y poco aplicable debido a su falta de precisión. Por su parte, Cardoso (2012), emplea un modelo físico utilizando la movilización de Iritanno que toma en consideración para el cálculo del umbral la cantidad de agua infiltrada en el suelo en un tiempo establecido precedente al evento y la intensidad

de lluvia en la SNP. Sus resultados fueron comparados con los empíricos de Caine y Aleotti, (1980, 2004) obteniendo valores de intensidad mayores que estos últimos.

El método usado para este trabajo es el teorema de Bayes. Un método que ha sido utilizado en diversas disciplinas tanto sociales, humanas y físicas con resultados altamente precisos. Es empleado por ejemplo, en diversos países de Europa, Asia y Centroamérica previniendo futuros procesos gravitacionales disminuyendo el riesgo de desastre.

El teorema de Bayes, definido como una ecuación probabilística condicional, permitió incorporar dentro del estudio los valores de incertidumbre con la finalidad de obtener umbrales de precipitación que indiquen una mayor probabilidad de ocurrencia de un proceso de ladera y así ser incorporados dentro de los sistemas de alerta temprana.

Para esto, se utilizó la metodología propuesta por Berti *et al.* (2012), en la cual, se obtuvieron umbrales probabilísticos de precipitación basados en el teorema de Bayes para la región de Emilia-Romagna Italia, para un periodo de 600 años con un total de 9, 000 registros de eventos de remoción en masa; de los cuales 2, 741 fueron asociados a lluvias, y 1, 168 definieron claramente los umbrales.

La obtención de dichos umbrales utilizando una o dos variables fue expresada en cálculos de una o dos dimensiones, siendo esta última definida por milímetros de lluvia y duración en días. Así mismo, se elaboró una modificación a la propuesta de Brunetti *et al.* (2009) con un prototipo de alerta que pueda ser incorporado en los Sistemas de Alerta Temprana de la región, y que en tiempo real permita prevenir a la población, evacuar la zona y evitar un desastre ante determinadas características pluviales.

El trabajo está estructurado en cuatro secciones en las cuales se buscó resolver la pregunta inicial sobre definir umbrales de duración en intensidad de precipitación que desencadenaran movimientos de ladera; se identificaron los eventos de procesos de remoción en masa causados por lluvias en la zona de estudio desde

1989 al 2012, se explicó el comportamiento de la precipitación en la Sierra Norte de Puebla en cuanto duración en intensidad, y se aplicó el teorema de Bayes que permitió definir umbrales probabilísticos de precipitación.

En el capítulo 1 se presenta un panorama general sobre los conceptos básicos manejados en el estudio, referentes a riesgo, procesos de remoción en masa y precipitación. En el capítulo 2 se presenta la localización del área de estudio, las condiciones socioeconómicas de la población, y algunas características físicas como relieve y climatología. Además, se proporciona la definición de umbrales de precipitación, los antecedentes de su sistematización, así como el método de Bayes usado para el trabajo con los procedimientos para el cálculo de una y dos dimensiones . En el capítulo 3 se efectúa la metodología en el área de estudio, el análisis de las características de la precipitación, la obtención de umbrales en cada una de las dimensiones y por último la propuesta del prototipo de alerta para la población. Finalmente, se presentan los resultados y la discusión del método.

CAPÍTULO 1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Peligro de procesos de remoción en masa

Para poder hablar del riesgo de desastre, es necesario relacionarse a diversas definiciones para una correcta utilización de términos, tales como fenómenos naturales, peligro, desastres, vulnerabilidad, riesgo, y alerta.

Un fenómeno natural, es toda manifestación de la naturaleza como resultado de su funcionamiento interno, el cual presenta comportamientos de cierta regularidad o de aparición extraordinaria y sorprendente (Maskrey, 1993). Empero, no todos los fenómenos naturales originan un desastre. Al habitar en una Tierra sumamente dinámica, el ser humano ha presenciado cientos de tormentas o huracanes a lo largo de su historia, pero cuando dicha tormenta se presenta en una región donde antes raramente lo hacía, con una fuerza extraordinaria o debido al incremento de la población hacia zonas de peligro y aunado a la alta vulnerabilidad social, hacen que los efectos de su impacto sean devastadores.

Anteriormente, se tenía la concepción del fenómeno natural como destructor debido a su fuerza y su magnitud, muchas veces relacionado con una fuerza superior o religiosa de la cual era imposible modificar. Esta visión a la cual Kenneth Hewitt denominó la visión dominante dejaba en claro el papel pasivo de una sociedad frente a una amenaza de origen natural (Calderón, 1998); no obstante, han surgido nuevas propuestas como la visión alternativa en la cual el papel de los actores sociales es importante para la ocurrencia de un desastre. Cuando la sociedad se apropia de los espacios y los construye, los convierte en riesgosos (Calderón, 1998) como consecuencia a que son los espacios más accesibles para los grupos sociales pobres.

Los peligros o mayormente denominados amenazas, por su traducción del inglés *hazard* es la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso, ya sea un fenómeno físico o debido a la actividad humana que pueden causar

decesos, daños a la propiedad, interrupción social y económica o degradación ambiental (EIRD, 2004) en un periodo de tiempo y sitio dado.

Existen múltiples interacciones de peligro que pueden ser identificados en cuatro categorías de acuerdo a Gill y Malamud (2014):

1. Interacciones donde se desencadena un peligro
2. Interacciones donde la probabilidad de un peligro es incrementado
3. Interacciones donde disminuye la probabilidad de un peligro
4. Eventos relacionados con la coincidencia espacial y temporal de las amenazas naturales.

El primer caso es el identificado con este trabajo, ya que un peligro de origen natural puede desencadenar cero, uno o múltiples peligros secundarios. Es decir, un evento de lluvia de gran duración e intensidad que se presenta en una región, por sí mismo representa un peligro para la población vulnerable pues puede originar inundaciones, daños a la cosecha o daños a infraestructura; pero además puede desencadenar un peligro secundario como procesos de remoción en masa que a su vez tienen consecuencias. Un peligro secundario desencadenado por un peligro primario (Gill y Malamud, 2014).

La vulnerabilidad se denomina como la condición de susceptibilidad a sufrir un daño y tener dificultad de recuperarse de ello (Maskrey, 1993). Esta situación es determinada por varios factores como es la ubicación de la vivienda en zonas de peligro, por la condición socio económica que a su vez está asociada con las condiciones precarias de vivienda, grupos de edad como niños y adultos mayores, falta de educación sobre el riesgo y la prevención, percepción, entre otros.

El riesgo, es la probabilidad de que suceda un desastre, o en otras palabras, las consecuencias perjudiciales como pérdidas humanas, lesiones, daños a propiedad, medios de subsistencia, interrupción de actividad económica o deterioro ambiental.

Tal probabilidad surge de las interacciones complejas entre amenazas o peligros y vulnerabilidades sociales (EIRD, 2004). Generalmente se expresa como resultado de peligro por vulnerabilidad

Riesgo= Peligro x Vulnerabilidad

Partiendo del entendimiento del concepto de desastre y riesgo como una consecuencia social; y el concepto de amenaza o peligro de origen natural, se puede hablar de la reducción del riesgo de desastre definiendo campos de acción de acuerdo a la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD, 2004):

- Conocimiento y evaluación del riesgo
- Desarrollo del conocimiento-educación, formación e investigación
- Organización, política, legislación y acción comunitaria
- Aplicación de medidas como gestión, planificación y protección.

El primer paso, la evaluación del riesgo, es un tema complejo que necesita la participación de profesionales de ciencias exactas y sociales para un conocimiento detallado de las características cuantitativas y cualitativas del riesgo, de los factores que lo determinan y de sus consecuencias físicas, sociales, económicas y ambientales (EIRD, 2004; Fig. 1).

Estudios del riesgo	PROCESO DE EVALUACIÓN DEL RIESGO		Evaluación del riesgo
	Definición del factor riesgo		
	Amenaza	Vulnerabilidad y capacidades	
	Establece la ubicación geográfica, intensidad y probabilidades	Establece la susceptibilidad y capacidades	
	Estima el nivel del riesgo		
	Evalúa el riesgo		
	Análisis socioeconómico de costo / beneficio		
	Definición de prioridades		
Establecimiento del nivel de riesgo aceptable			
Elaboración de escenarios y medidas			

Fig.1 Principales etapas para la evaluación del riesgo .Elaborado con base en EIRD (2004).

Es así, que el presente trabajo colabora en el primer escalón para la reducción del riesgo ya que aporta el conocimiento sobre el comportamiento del fenómeno a estudiar y establece probabilidades de ocurrencia que sumado a estudios de otros especialistas servirán para identificar los sitios susceptibles y crear así una zonificación apropiada que sirva de base ante futuras decisiones. Además que permita elaborar medidas de prevención y mitigación mientras se disminuye la vulnerabilidad de la población.

1.2. Procesos de remoción en masa

En la literatura existen diferentes definiciones que caracterizan los movimientos gravitacionales o movimientos de ladera abajo, no obstante el más utilizado es procesos de remoción en masa (*mass movement processes*), ya que involucra el movimiento de los materiales formadores de las laderas bajo la influencia de la gravedad. Ésta es la única fuerza importante ya que ningún medio de transporte como el viento, el agua fluyendo, hielo o lava fundida participa en el proceso (Bloom, 1991).

Los términos como procesos gravitacionales (*gravitational processes*), procesos de ladera (*slope processes*) y movimientos de ladera o terreno serán empleados de manera correcta para 'procesos de remoción' (Alcántara, 2000).

En los procesos de remoción en masa se distinguen cuatro tipos de movimientos: caída, deslizamiento, flujo y *creep* o reptación (Pedraza, 1996). O de acuerdo al Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) en caídas, vuelcos, deslizamientos, extensiones laterales, avalanchas, flujos y *creep* (Highland y Bobrowsky 2008).

Desprendimientos o caídas (*fall*; Fig.2), comienza con el desprendimiento de suelo, roca o ambos, de una pendiente pronunciada a lo largo de una superficie sobre la que se ha producido poco o ningún desplazamiento de cizalladura. El material posteriormente desciende principalmente por caída, rebotando o rodando (Highland y Bobrowsky, 2008). Ocurren en laderas principalmente inclinadas, tanto de tipo natural como artificial (Alcántara, 2000).

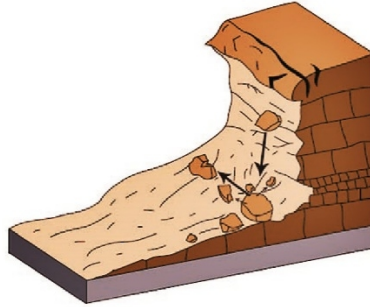


Fig. 2. Esquema desprendimiento de rocas. Obtenido de Highland y Bobrowsky (2008).

Vuelcos o desplome (*topple*; Fig. 3), un desplome es reconocido como la rotación hacia delante de una ladera, de una masa de suelo o roca alrededor de un punto o eje bajo el centro de gravedad de la masa desplazada. Es a veces impulsado por la gravedad que es ejercida por el peso del material arriba de la ladera de la masa desplazada (Highland y Bobrowsky, 2008).

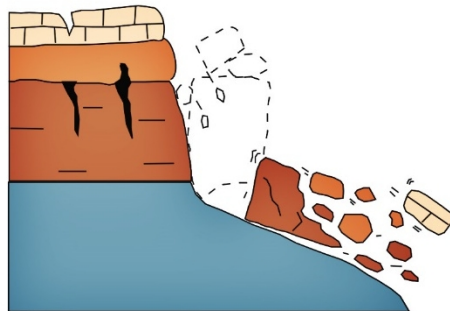


Fig. 3. Esquema vuelco. Obtenido de Highland y Bobrowsky (2008).

Deslizamiento (*slide*; Fig. 4), es un movimiento ladera abajo de un suelo o masa rocosa que ocurre en la superficie de una ruptura o en zonas relativamente delgadas con deformación de cizallamiento intensa. De acuerdo a su movimiento se diferencian en: deslizamientos rotacionales y deslizamientos translacionales (Highland y Bobrowsky, 2008).

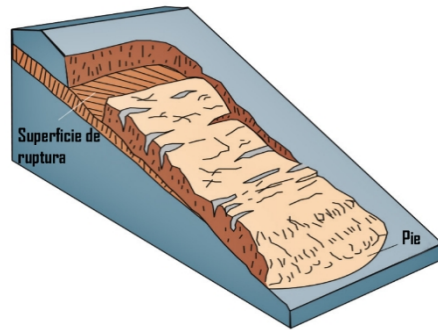


Fig. 4. Esquema deslizamiento translacional. Modificado de Highland y Bobrowsky (2008).

Extensiones laterales (*spread*; Fig. 5), es una extensión de un suelo cohesivo o masa de roca combinada con el hundimiento general de la masa fracturada del material cohesivo en el material subyacente más suave. Pueden resultar de licuefacción o de flujo (y extrusión) del material subyacente más suave (Highland y Bobrowsky, 2008).

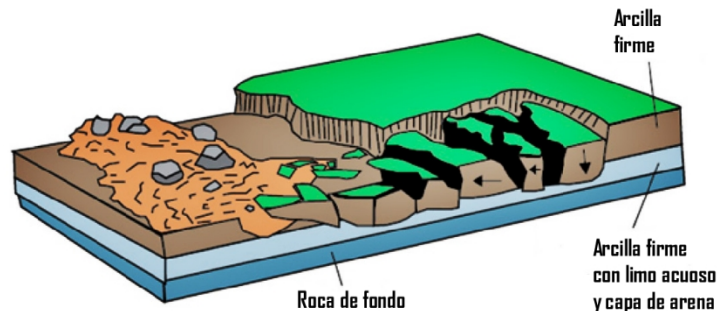


Fig. 5. Esquema extensión lateral. Modificado de Highland y Bobrowsky (2008).

Flujos (*flows*; Fig. 6), un flujo es un movimiento en el espacio continuo en el cual las superficies de cizalla son de corta duración, muy próximos, y por lo general no se conservan. Las velocidades de los componentes en la masa desplazada de un flujo se asemejan a los de un líquido viscoso (Highland y Bobrowsky, 2008).

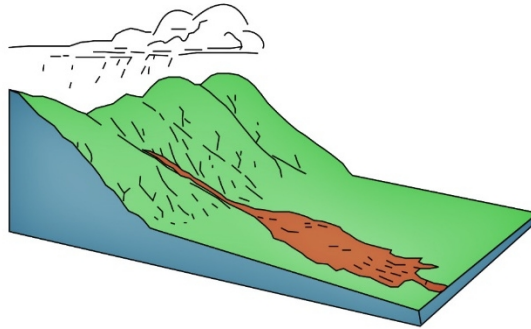


Fig. 6. Esquema flujo de detritos. Obtenido de Highland y Bobrowsky (2008).

Creep; (Fig. 7), es el nombre informal para un flujo de tierra con movimiento imperceptiblemente lento y constante de una pendiente formada de suelo o roca. El movimiento es causado por la tensión de cizallamiento interno suficiente para causar la deformación, pero insuficiente para causar la falla (Highland y Bobrowsky, 2008).

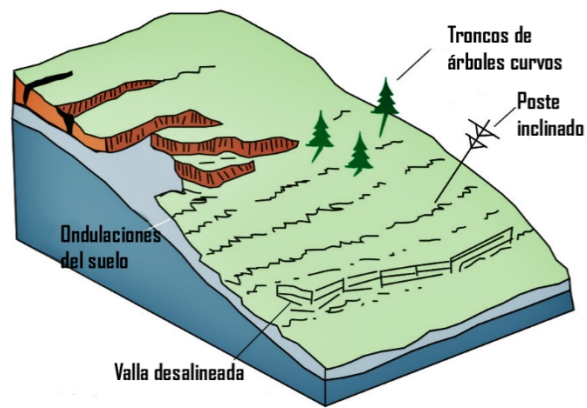


Fig. 7. Esquema flujo de tierra lento. Modificado de Highland y Bobrowsky (2008).

1.3. Causas de los procesos de remoción

La inestabilidad de una ladera es la principal causa para que se produzca un proceso de remoción en masa, puesto que la hace propensa a sufrir un movimiento. De acuerdo al Servicio Geológico de los Estados Unidos (Highland y Bobrowsky, 2008) se establecen dos categorías principales que la originan; los naturales y los resultados de la actividad humana. Los primeros son fenómenos como sismos, actividades volcánicas y los relacionados con agua. Los de causas humanas a su vez, se refieren a aquellas acciones como la expansión hacia zonas inestables, cambios en los patrones de drenaje, deforestación, construcciones, excavaciones, entre otros. Sin embargo, la inestabilidad se determina no solo por el margen de estabilidad, sino por las fuerzas desestabilizadoras externas que afectan la misma (Crozier, 1986).

1.3.1. Factores involucrados en la inestabilidad de las laderas

Además de la gran clasificación de origen natural y antrópico, los factores se dividen a su vez en cuatro tipos, cuyo solos o su combinación origina un cierto grado de inestabilidad de la ladera.

- I. Factores pre-condicionantes: aquellos que son inherentes y estáticos como la estructura geológica. que además de afectar la estabilidad actúan como catalizadores de otros factores desestabilizadores.
- II. Factores preparatorios: son aquellos factores dinámicos como cambio en el nivel de aguas subterráneas o deforestación que hacen susceptible a la ladera al movimiento pero no lo inician.
- III. Factores desencadenantes; son propiamente los que inician el movimiento, tales como fuertes lluvias o movimientos sísmicos.
- IV. Factores sustentadores, que sustentan el control de la duración, la forma y la velocidad del movimiento (Gutiérrez, 2008).

En este trabajo, se usan las dos clasificaciones propuestas por Alcántara y Murillo (2008); factores determinantes y factores desencadenantes.

1.4. Factores determinantes

Los factores determinantes son todos aquellos que condicionan la estabilidad de una ladera como la estructura geológica, la influencia del relieve, la influencia del agua y la influencia del ser humano (Lugo *et al.*, 2005).

Anteriormente, se creía que el principal factor que aumentaba la probabilidad de movimiento del terreno era el grado de inclinación de una pendiente, relacionado directamente con la gravedad; si bien, la gravedad es uno de los agentes que más participa en los procesos exógenos del relieve, puede ser el agente secundario cuando la presencia de agua líquida o sólida actúa sobre diversos cuerpos desempeñando la función de 'medios o intermedios' que acogen, soportan, impulsan y en definitiva movilizan a otros cuerpos (Pedraza, 1996); así mismo se han registrado casos de PRM con tan solo de 1 a 2 grados de pendiente (Highland y Bobrowsky, 2008) lo que demuestra una mayor correlación con características como el tipo de suelo, la distribución de presión del poro, humedad de la superficie del suelo, intemperismo, ablandamiento de los materiales y cambios a largo plazo en la tensión de campo (Fell *et al.*, 2000; Fig. 8).

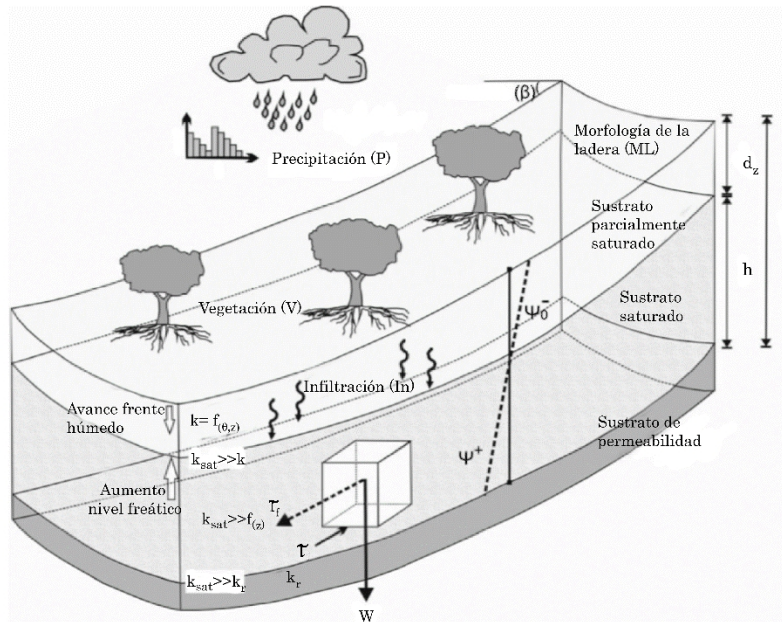


Fig. 8. Representación de fuerzas desestabilizadoras que actúan sobre el perfil de una ladera. Lluvia (p); Intensidad pp. (I); contenido de agua volumétrico (θ); presión de poros positiva (Ψ^+) y negativa o succión (Ψ); permeabilidad (k); peso del suelo (W); vegetación (V); infiltración (In); pendiente de ladera (β); resistencia al cortante (τ); profundidad (Z) y espesor del suelo saturado (h; Aristizabal *et al.*, 2010).

El tipo de suelo y formación geológica son factores estáticos donde la ubicación geográfica es crucial para la probabilidad de ocurrencia y para el tipo de proceso gravitacional que se efectúe al variar las propiedades mecánicas unas de otras; por ejemplo, en un suelo mayor consolidado formado predominantemente por rocas, el agua infiltrada actuará sobre los planos de debilidad que favorece la fragmentación dando paso a desprendimientos y vuelcos. Por otra parte, suelos como regolitos y depósitos superficiales al tener una mayor porosidad por tanto menor cohesión y débil resistencia mecánica favorece a procesos como deslizamientos y flujos (Gutiérrez, 2008).

1.5. Factores desencadenantes

Los factores desencadenantes son aquellos que en corto tiempo contribuyen a que una ladera sea incapaz de resistir su propio peso e inicie el movimiento; tales como fuertes precipitaciones, sismos, vibraciones, colapsos, erupciones volcánicas, entre otros.

Dentro de los factores desencadenantes de origen natural, la saturación de una ladera por agua es la causa primaria de movimientos de ladera (Highland y Bobrowsky, 2008); en particular la precipitación al ser la fuente por excelencia de agua es la más importante, infiltrándose genera un cambio en la consistencia del poro del suelo por la presión del agua y disminuyendo la cohesión lo cual facilita los procesos de remoción (Gutiérrez, 2008). De hecho, aquellas áreas que registran una mayor precipitación anual presentan mayores problemas de estabilidad debido a la saturación por agua proveniente además de flujos subterráneos y materiales más meteorizados que tienen incidencia en las propiedades geo mecánicas del terreno (Cuanalo *et al.*, 2006).

1.6. Condiciones climáticas

El clima es uno de los factores que mayor importancia tiene en el estudio de la ocurrencia de los PRM, ya que se relaciona tanto con los procesos condicionantes como con los desencadenantes de los deslizamientos (Cuanalo *et al.*, 2006); lo que aumenta la importancia de su estudio debido a la variabilidad climática mayor evidenciada en las últimas décadas. Además, es la causa principal del intemperismo de las rocas que origina la formación de suelos residuales, así como de brindar los elementos para que actúen los agentes de la erosión, principalmente el agua (Cuanalo *et al.*, 2006).

El elemento climático de mayor importancia en nuestras actividades socioeconómicas es la lluvia (Magaña, 2004) y no solamente por las cuantiosas

pérdidas económicas y materiales, si no por los cientos de vidas que se pierden año con año debido a algún desastre relacionado con algún fenómeno hidrometeorológico.

1.6.1. Precipitación

Generalmente cuando se producen los momentos más intensos de lluvias de tormenta, se superan ciertos umbrales de intensidad y de duración que originan el desencadenamiento de movimientos en masa (Wieczorek y Guzzetti, 1999). Puede decirse que la lluvia actúa de dos formas diferentes en la estabilidad de las laderas (Aristizábal *et al.*, 2010):

- 1) Eventos de lluvia muy intensos que provocan una reducción de la resistencia al cortante por reducción de la cohesión aparente, generando movimientos inicialmente superficiales
- 2) Eventos de lluvia de larga duración que causan el incremento en la presión de poros sobre una superficie de falla potencial, generando movimientos de masa mucho más profundos y frecuentemente a lo largo de superficies de cizalla pre-existentes.

Esto es, que existe una mayor relación entre las lluvias cortas e intensas con los movimientos superficiales y a su vez las lluvias largas y constantes con movimientos más profundos, por lo que se hace necesario contemplar las lluvias que anteceden el movimiento.

De acuerdo a su origen, la precipitación puede ser de dos tipos: convectiva y estratiforme. En la precipitación convectiva los movimientos del aire son verticales lo cual favorece a una mayor condensación y por tanto precipitaciones más intensas (Valdés *et al.*, 2005). Los fenómenos meteorológicos que tienen inmersas zonas con precipitación convectiva, son los mayores productores de lluvia (Valdés *et al.*, 2005). Estos sistemas convectivos están relacionados con los patrones de

precipitación en diversos puntos de México. En la zona de estudio se pueden presentar dichas lluvias por las características orográficas en las que se encuentra, zona de transición de la Sierra Madre Oriental y el Eje Neovolcánico que también repercute en la transición climática de los templados húmedos y los cálidos húmedos.

Las dos características que influyen para que un evento de lluvia pueda desencadenar sucesos como inundaciones, daños a cultivos, infraestructura o movimientos del terreno son: la intensidad (mm/día) y duración (horas, días) de lluvia.

La intensidad de lluvia es definida como el valor de precipitación acumulada en un periodo, o del índice o tasa de precipitación en un periodo, comúnmente marcado en milímetros por hora (mm/hr). Dependiendo de la duración del periodo de observación, la intensidad de lluvia puede representar una medida instantánea del índice de lluvia, o un valor medio de la precipitación sobre una hora (intensidad horaria), día (intensidad diaria) o largos periodos (Guzzetti *et al.*, 2007).

Aunque llueve en invierno, las lluvias más intensas ocurren en verano, y de forma general se puede decir que la temporada de lluvias en México comienza entre mayo y julio, y concluye entre septiembre y octubre. En la región centro-sur de México y hasta Centroamérica, aparecen dos máximos en la precipitación de verano, uno en junio y otro en septiembre (Magaña, 2004).

Las lluvias de verano están asociadas a una mayor variedad de estructuras meteorológicas entre las que destacan (Magaña, 2004):

- La Zona Inter-Tropical de Convergencia (ZITC) en el Pacífico
- El monzón mexicano
- Las ondas del este

- Los huracanes en el Pacífico, el Caribe y el Golfo de México, que constituyen un elemento esencial en la temporada de lluvias en México.

La extensión superficial, la intensidad y duración de un sistema de precipitación dependen estrechamente de los movimientos verticales del aire. Normalmente se clasifican en dos de acuerdo a Rogers (1977):

- 1) La precipitación estratiforme, continua y de gran extensión, asociada a movimientos ascendentes en gran escala, producidos ya sea por elevación frontal o topográfica, o determinados por una convergencia horizontal a gran escala.
- 2) La precipitación convectiva en forma de chubascos, y localizada, asociada a convección, a escala de los cúmulos, y aire inestable.

La primera, al ser continua evoluciona relativamente lento a diferencia de las convectivas que los movimientos verticales son de mayor velocidad, lo cual favorece a una mayor condensación, mayor formación de gotas de lluvia y, por tanto precipitaciones más intensas (Valdés, *et al.*, 2005).

Los fenómenos meteorológicos productores de precipitación convectiva incluyen desde tormentas convectivas con diámetro de 10 km, hasta sistemas o conglomerados nubosos con cientos de kilómetros como los ciclones y ondas tropicales (Valdés *et al.*, 2005), gran parte del norte de Puebla presenta esta precipitación.

De igual forma, puede distinguirse en tres tipos de precipitación acuerdo al origen; precipitación convectiva, de tipo ciclónico y precipitación orográfica (Barry y Chorley, 1999).

1.6.2. Sistemas Convectivos de Mesoescala

Los Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) de acuerdo a Lin (2008), son un clúster organizado de tormentas que persisten al menos durante varias horas y que producen un área de precipitación continua. Dichos SCM pueden tener forma lineal o circular, con una extensión variable de 10 km² a 1, 000 km²; con un tiempo de vida promedio de 3 horas o más, y que son acompañados de nubes estratiformes que puede surgir o que se mantienen durante varios días.

Las estructuras de tormentas están compuestas a su vez de otras zonas de precipitación a escala sub-sinóptica. Pudiéndose agrupar en cuatro categorías: áreas o zonas sinópticas, zonas grandes a mesoescala, zonas pequeñas a mesoescala y elementos menores (Rogers, 1977).

En muchas regiones del mundo los SCM son el principal contribuyente a la precipitación anual y la principal fuente de lluvias intensas que provocan inundaciones, daños, vientos fuertes y en latitudes medias, violentas tormentas, tornados y granizo (Cotton y Anthes, 1989).

Dentro de los tipos de tormentas convectivas se encuentran (Ray, 1986):

- Tormentas de una célula (*Single-Cell Storms*) que normalmente ocurren en ambientes donde los vientos son relativamente ligeros y la cizalladura vertical del viento es pequeña. Estas tormentas usualmente persisten de menos de hora, son inestables, y relativamente pequeñas (5 a 10 km).
- Tormentas de Supercélulas (*Supercell storms*) son largas intensas y persistentes, normalmente producen más tiempo severo que otros tipos de tormentas. Usualmente ocurren en vientos con fuertes cizalladuras verticales, donde el vector de cizalladura del viento vuelve en sentido horario con altura por debajo de 500 mb (~ 5000 m. de altitud). Ocurren en ambientes que contienen fuertes vientos y cizalladura de viento.
- Tormentas multicelulares: (*Multicellular storms*) Estos sistemas consisten en una serie de células envolventes. Formadas normalmente en o cerca de la

periferia de tormenta en intervalos de 10 a 15 minutos y que finalmente se convierte en la célula dominante del complejo de tormenta. Ocurren en ambientes que contienen altos niveles de energía.

1.6.2.1. SCM en México

Farfán y Zehnder en 1994 mediante el uso de imágenes de satélite y radio sondeos identificaron dos grandes SCM. Los estacionarios, que se concentraron en la parte del Golfo de California y los móviles que se desarrollan y mueven en forma paralela a la Sierra Madre Occidental.

Así mismo, en el estudio de Valdés *et al.*, (2005) se identificó que la mayor proporción de SCM ocurren de mayo a octubre, que corresponde a la principal temporada de lluvias en México. Además de una duración corta, en promedio de 7 horas.

1.6.3. Fenómeno de El Niño, La Niña.

Otro de los fenómenos que está fuertemente relacionado con la variabilidad climática y con la forma en que se presenta la precipitación en México es el ENSO.

El Niño Oscilación del Sur (ENSO) es un fenómeno climático periódico, entre tres a siete años donde la interacción entre atmósfera y el océano se ven alteradas, y que genera anomalías en los patrones normales de circulación atmosférica y corrientes marinas.

Aunque el lugar de ocurrencia es en el Océano Pacífico las consecuencias pueden repercutir en el clima global. Durante los años El Niño, los vientos alisios en el Pacífico que normalmente acumulan las aguas cálidas en las costas de Indonesia y Australia se debilitan, así que mientras las aguas cálidas se concentran en las

costas de Perú y Chile apareciendo nubes cumulonimbos profundas y precipitaciones intensas, en el Pacífico Oeste provocarán menos lluvias y sequías severas (Magaña *et al.*, 1998).

Dentro del fenómeno ENSO existe la contraparte de El Niño; La Niña, la versión fría, que provoca elementos climáticos contrarios; por ejemplo, en Australia e Indonesia su clima tropical es resultado de aguas cálidas y precipitaciones durante todo el año. Cuando se presenta el fenómeno El Niño obtienen lluvias escasas y sequías; pero durante La Niña los vientos alisios soplan con mucho más fuerza lo que provoca aguas más cálidas de lo normal y precipitaciones más intensas que pueden provocar huracanes o inundaciones.

Es importante conocer que los fenómenos El Niño o La Niña afectan directamente en la precipitación de todo México, y de forma diferente en cada una de las estaciones del año. Los inviernos en año El Niño, resultan más fríos y más lluvia en el norte de México; por otra parte los veranos son más secos y cálidos, es decir, por debajo de lo normal (Magaña, 2004).

Durante los veranos La Niña, las lluvias en la mayor parte de México son cercanas a la normal, siendo incluso anómalamente intensa (Magaña, 2004).

En verano, temporada donde el país se ve afectado por huracanes, en años de El Niño aumenta su número en el Pacífico y disminuye en el Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México. Mientras que en años La Niña tal relación tiende a revertirse (Magaña *et al.*, 1998).

Estudios recientes, muestran que la presencia del fenómeno del Niño tiene a disminuir la intensidad de los ciclones en el océano Atlántico, mientras que la presencia de La Niña tiende a presentar una intensificación de estos (Méndez, 2009).

Por tanto dentro del estudio se incorporará un análisis que permita relacionar los eventos de PRM con el incremento de lluvia de un determinado año El Niño o La Niña para aumentar la prevención cuando se presenten.

CAPÍTULO 2. DATOS Y METODOLOGÍA

2.1. Localización de la Sierra Norte de Puebla (SNP)

La SNP se localiza al norte del estado de Puebla entre los 19° 28', 20° 50' de latitud Norte y los 97° 7', 98° 19' de longitud Oeste, (Fig. 9). Colindante con los estados de Veracruz, Hidalgo y Tlaxcala.

Anteriormente era un región con bajos niveles poblacionales; pero a partir de 1940 a esta zona se le dio principal impulso ya que representa un punto estratégico en la comunicación entre el puerto de Veracruz y la Ciudad de México. Es así que con la construcción de la carretera México- Tuxpan, la colonización de dichas zonas ocupadas anteriormente por vegetación significó la llegada de gente de otras localidades vecinas de Puebla y Veracruz (Velázquez, 1995).

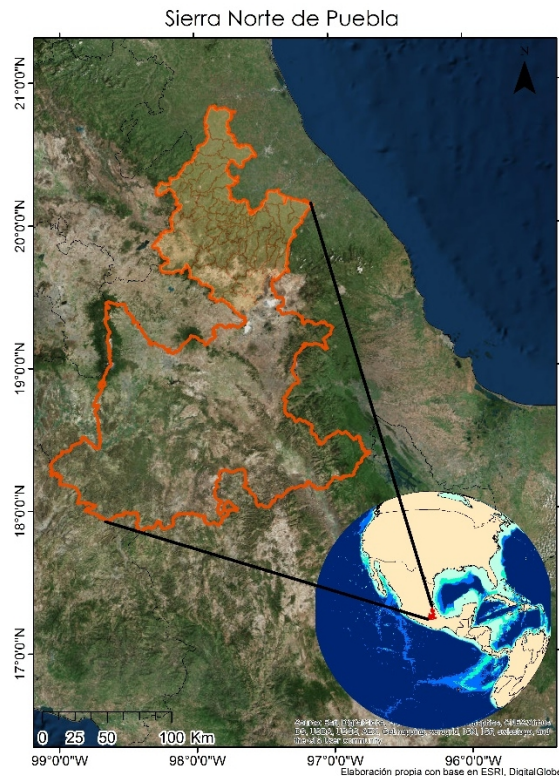


Fig. 9. Localización de la SNP. Elaboración propia con base en ESRI, Digital Globe (2014).

2.2. Condiciones socioeconómicas de la población

Se encuentra dividido en dos regiones socioeconómicas (Fig. 10) con fines de planeación para el desarrollo homogéneo de acuerdo al Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED. s/f). La región I: Sierra Norte o de Huauchinango que se localiza al noroeste del estado comprendiendo 35 municipios; y la región II: Sierra Nororiental o de Teziutlán al noreste del estado que se conforma por 28 municipios.

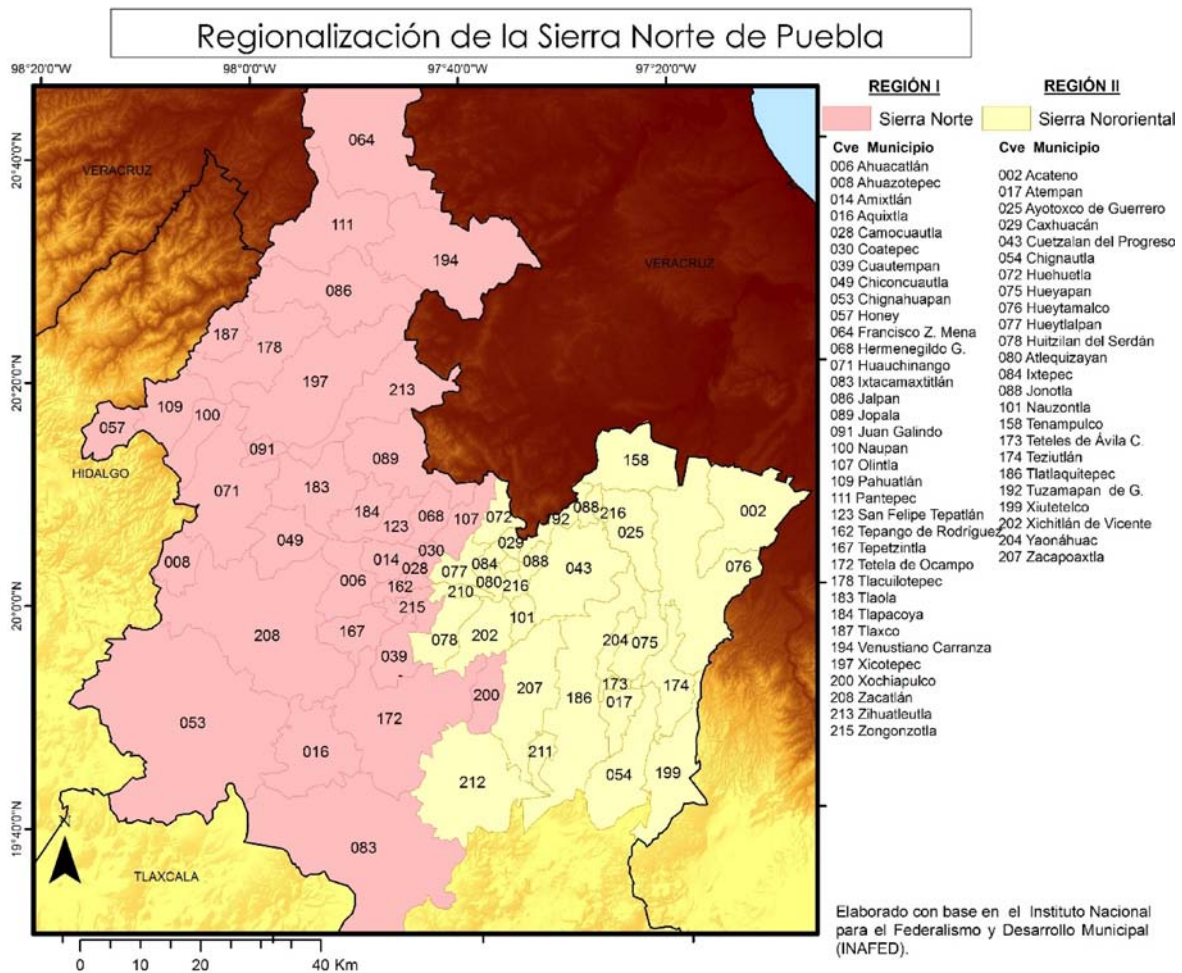


Fig. 10. Regionalización de la SNP. Elaboración propia con base en INAFED (s.f.)

La población total en la Sierra Norte de Puebla es de 1,154,894 habitantes para el año 2010 de acuerdo al INEGI (2012); así mismo, el 2010 gran porcentaje de los municipios tienen una población menor de los 60, 000 habitantes a excepción de los municipios de Zacatlán, Huauchinango y Xicotepec en la Sierra Norte, así como Teziutlán en la Sierra Nororiental con una población mayor de 60, 000 y menor de 200, 000 . De la población que habita la región el 44.52% es indígena siendo el Totonaca y el Nahuatl lo más hablado de acuerdo a la Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas (2002). El 45.6% se dedica al sector primario, 19.2% al sector secundario y 13.7% al terciario, donde la agricultura la actividad más importante. Así mismo, el grado de escolaridad en la región definido como los años promedio cursados es de tan solo 2 a 6 en la mayor parte del territorio, de 6 a 8 en solo 19 municipios y uno solo de 9 a 11 grados (Instituto de Geografía, 2007).

2.3. Relieve

El relieve de la Sierra Norte de Puebla es el resultado de la influencia de los procesos generadores de relieve como la tectónica y el vulcanismo; y los procesos modeladores como la erosión y la acumulación (Fig. 11). La característica que la define es derivada del contacto con tres grandes provincias geológicas-geomorfológicas:

- 1) **Eje Neo-volcánico:** Al occidente y sur, sepultando las rocas mesozoicas con potentes depósitos volcánicos del Neógeno–Cuaternario.
- 2) **Sierra Madre Oriental:** Representa el extremo meridional de la Sierra Madre Oriental, definida por el dominio en la superficie de rocas sedimentarias jurásicas, su clima húmedo tropical y su orientación al NW.
- 3) **Planicie Costera del Golfo:** Hacia el oriente. La ladera montañosa alta y de fuerte inclinación se extiende hacia la costa del Golfo de México y pasa bruscamente a un relieve de lomeríos de pre-montaña formado por rocas del Cretácico Superior y el Paleógeno en estructura monoclinial. Gradualmente desciende y se transforma en una planicie estructural ondulada y de acumulación fluvial y marina (Lugo *et al.*, 2005).

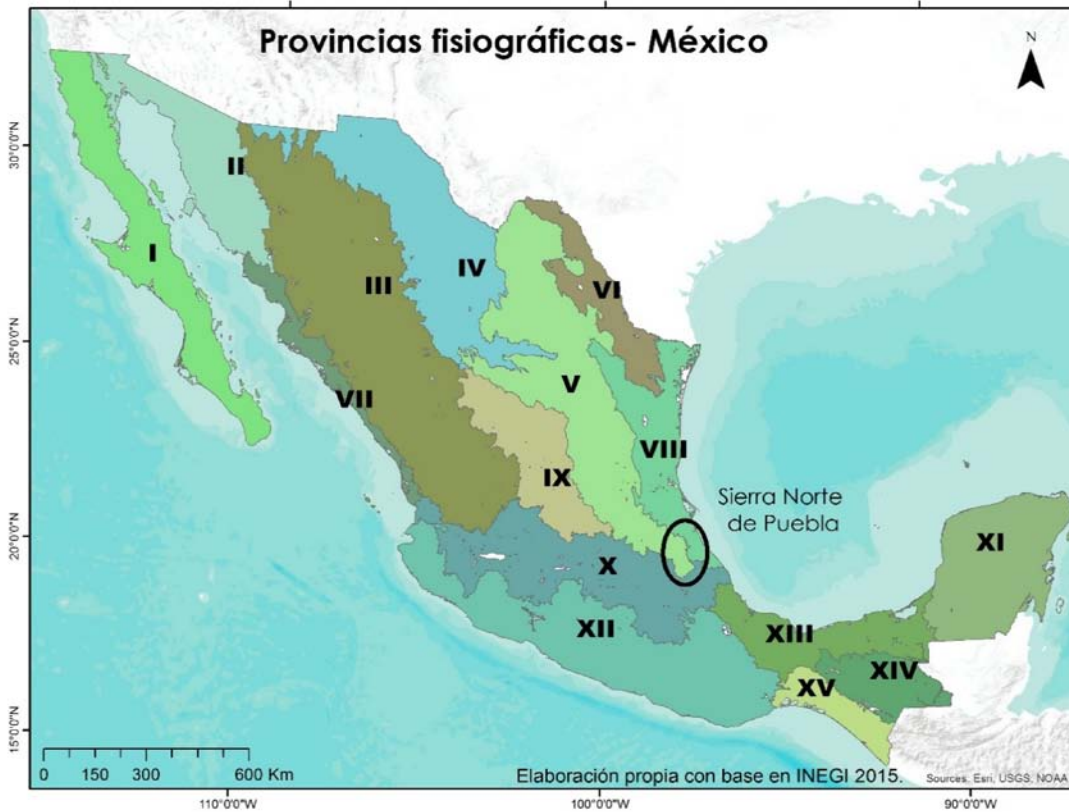


Fig. 11. Localización de la Sierra Norte de Puebla. Provincias fisiográficas en México. I) Península de Baja California; II) Llanura Sonorense; III) Sierra Madre Occidental; IV) Sierras y llanuras del norte; V) Sierra Madre Oriental; VI) Grandes llanuras de Norteamérica; VII) Llanura costera del Pacífico; VIII) Llanura costera del Golfo del Norte; IX) Mesa del centro; X) Eje Neovolcánico; XI) Península de Yucatán; XII) Sierra Madre del Sur; XIII) Llanura costera del Golfo Sur; XIV) Sierras de Chiapas y Guatemala; y XV) Cordillera Centroamericana. Elaboración propia con base en INEGI(2015)

El conjunto de formaciones geológicas para la zona de estudio se pueden clasificar en seis unidades de acuerdo con su estructura:

TIPOS DE FORMACIONES	PERIODO GEOLÓGICO	DESCRIPCIÓN	PROCESO DE REMOCIÓN EN MASA
Esquistos	Paleozoico	Elevaciones menores de 100-350m. Roca plegada, fuerte inclinación, fracturada y con corteza de intemperismo	Deslizamientos y flujos de corta extensión
Rocas sedimentarias plegadas	Triásicas y jurásicas	Lutitas, limolitas y areniscas en estratos de grosor delgado a medio, poca resistencia a la erosión	Procesos de caída y deslizamiento
Calizas, margas y Lutitas	Jurásico, superior y cretácico	Estratos con poca resistencia debido a su estructura	Procesos de caída, deslizamiento y flujo
Calizas masivas	Cretácicas de la formación del Tamaulipas superior	Se presentan en un relieve de mesas con desarrollo cárcico con numerosas dolinas y fracturas. Alta resistencia de rocas a erosión	Deslizamientos de pequeña magnitud.
Lutitas	Cretácico superior	Rocas que no ofrecen resistencia a la erosión, formando lomeríos a poca altura.	Desprendimiento
Rocas volcánicas	Neógeno-cuaternario	Distribución heterogénea en sentido horizontal y vertical de pocos a cientos de metros	

Tabla 1. Elaborado con base en Lugo *et al.*, (2005).

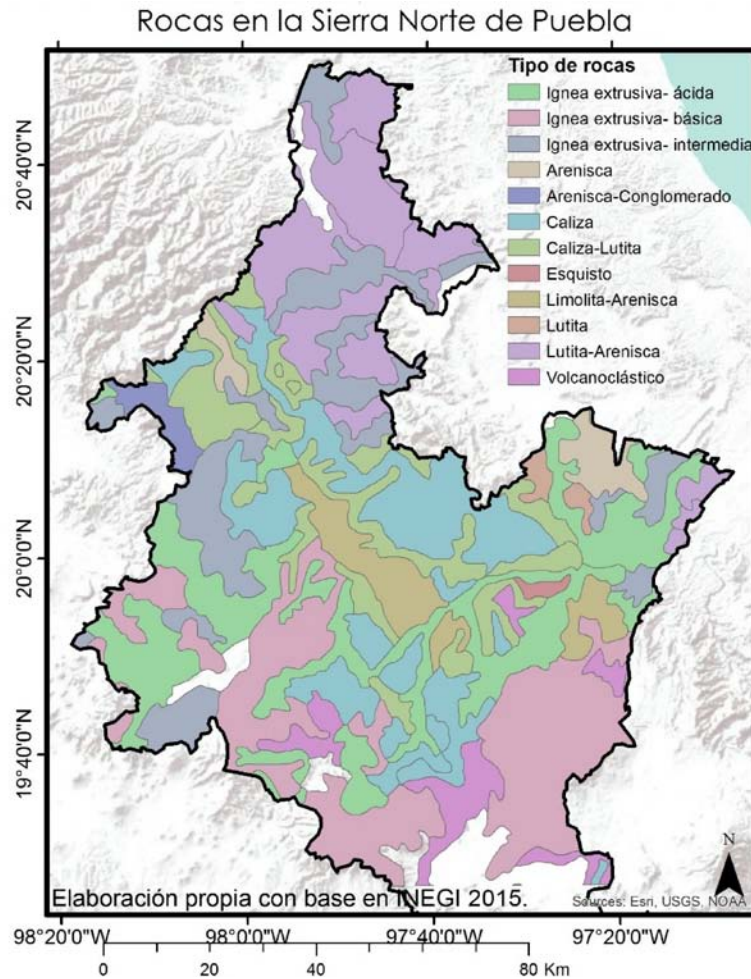


Fig. 12. Tipos de rocas en la Sierra Norte de Puebla. Elaboración propia con base en INEGI, (2015).

Los suelos que cubren las montañas han sido originados por los agentes de intemperismo y desintegración; de los cuales, la temperatura, la humedad y la vegetación han sido determinantes en la descomposición de los minerales que integran las rocas subyacentes, dando origen a suelos cohesivos arcillosos y limosos, y suelos friccionantes como gravas, arenas y limos inorgánicos (Cunalo y Melgarejo, 2002).

De las rocas sedimentarias las formaciones compuestas de calizas de gran espesor tienen una mayor estabilidad cuando la inclinación de la ladera es contraria al buzamiento de los planos estratigráficos (Cunalo y Melgarejo, 2002); a diferencia de las lutitas y limolitas que por su poco espesor son más precarias al ser rocas deleznable y frágiles.

De acuerdo a la composición granulométrica los suelos friccionantes como gravas, arenas y limos inorgánicos, que cubren principalmente las rocas de tipo volcánico son más susceptibles a la erosión por escurrimiento de agua (Cunalo y Melgarejo, 2002). Por otra parte los suelos finos cohesivos como limosos y arcillosos poseen una menor estabilidad ante la infiltración en los poros; empero, la combinación de ambos tipos, arcillas o limos con arenas o gravas, el proceso de inestabilidad es más complejo ya que depende del grado de cohesión respecto al contenido de agua.

De acuerdo al inventario de procesos de remoción en masa elaborado por Alcántara y Murillo (2008) para la región de la SNP se registraron 756 movimientos en el periodo de 2000-2007, de los cuales los deslizamientos obtienen un 55.55% de ocurrencia, seguido por los movimientos complejos, las caídas y desprendimiento, y por último los flujos. El 64.55% de los procesos fueron localizados en rocas ígneas, 26.19% en rocas sedimentarias y en menor proporción en las metamórficas.

2.4. Climatología

De acuerdo a la clasificación de García (1998), a través del Geo-portal de la Comisión Nacional para Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2001) se definen trece climas para la Sierra Norte de Puebla (Fig. 13).

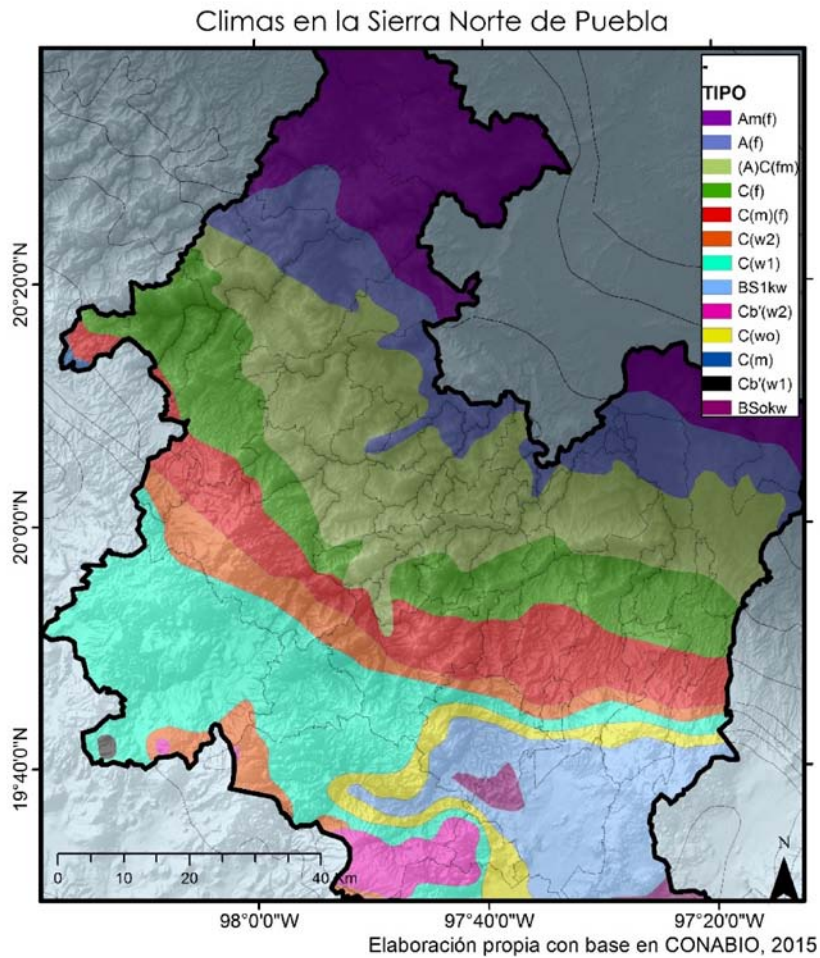


Fig. 13. Climas de la región. **Am(f)**, **A(f)** Cálidos húmedos; **(A)C(fm)** Semicálido húmedo; **C(f)**, **C(m)(f)**, **C(m)** Templados húmedos; **C(w2)**, **C(w1)**, **C(wo)** Templados subhúmedo; **BS1kw**, semiárido templado; **Cb'(w1)**, **Cb'(w2)**, Semifríos y **BSokw**, Árido. Elaboración propia con base en CONABIO, (2015).

- **Am (f)**, Cálido húmedo. Con temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C. Precipitación del mes más seco menor de 60 mm; con lluvias en verano y lluvia invernal con un porcentaje mayor al 10.2% del total anual. Corresponde a aquellos municipios localizados en el norte tanto de la Sierra Norte como Nororiental. Francisco Mena, Pantepec y Venustiano Carranza; y parte de Tenampulco, Hueytamalco y Acateno respectivamente.
- **A (f)**, Cálido húmedo. Con temperatura media anual mayor de 22° C y temperatura del mes más frío mayor de 18° C. La precipitación del mes más seco es por encima de los 40 mm; las lluvias entre verano e invierno mayores al 18% anual. Corresponde a una delgada franja en el norte del estado. Los municipios que en su totalidad tienen este clima son Tuzamapan de Galeana, Jonotla, Zoquiapan y Ayotoxco de Guerrero.
- **(A) C (fm)**, Semicálido húmedo del grupo C. Con una temperatura media anual mayor de 18° C, temperatura del mes más frío menor de 18° C, temperatura del mes más caliente mayor de 22° C. Una precipitación del mes más seco mayor a 40 mm, lluvias entre verano e invierno con porcentaje de lluvia invernal menor al 18% del total anual. Entre los municipios que su totalidad corresponden a este clima son Tlaola, Amixtlán, Hueytlalpan, Ixtepec, entre otros.
- **BS 1kw**, Semiárido, templado. Temperatura media anual entre 12° C y 18° C. Temperatura del mes más frío entre -3° C y 18° C, temperatura del mes más caliente menor de 22° C. Con lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. Entre los municipios que tienen fragmentos de este clima están Cuyoaco y Zautla.

- **BS okw**, Árido, templado. Temperatura media anual entre 12° C y 18° C, temperatura del mes más frío entre -3° C y 18° C. Con lluvias de verano, porcentaje de lluvia invernal entre 5% y 10.2% del total anual. Corresponde a una porción muy pequeña de los municipios de Zautla y Cuyoaco.
- **C (m)**, Templado húmedo. Temperatura media anual entre 12° C y 18° C, temperatura el mes más frío entre -3° C y 18° C y temperatura del mes más caliente bajo 22° C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. Solo se presenta en la parte inferior del municipio de Honey.
- **C (f)**, Templado, húmedo. Temperatura media anual entre 12° C y 18° C. Temperatura del mes más frío entre -3° C y 18° C y temperatura del mes más caliente bajo 22° C. Precipitación en el mes más seco mayor de 40 mm; lluvias todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual. Entre los municipios están Pahuatlán, Teteles de Ávila Castillo, Naupan y Huauchinango.
- **C (m)(f)**, Templado húmedo. Temperatura media anual entre 12° C y 18° C, temperatura del mes más caliente bajo 22° C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual. Municipios como Zacapoaxtla, Zacatlán, Zaragoza, Xochiapulco y Honey tienen en mayor porcentaje este clima.
- **C (w2)**; Templado, subhúmedo. Temperatura media anual entre 12° C y 18° C, temperatura del mes más frío entre -3° C y 18° C y temperatura del mes más caliente bajo 22° C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal

del 5 al 10.2% del total anual. Representa una delgada franja atravesando los municipios de Ahuazotepec, Zacatlán y Tetela de Ocampo.

- **C (w1)**, Templado, subhúmedo. Temperatura media anual entre 12° C y 18° C, temperatura del mes más frío entre -3° C y 18° C y temperatura del mes más caliente bajo 22° C. Con precipitación en el mes más seco menor de 40 mm, lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. Los municipios con este clima predominante se localizan al sur de la Sierra Norte y son Chignahuapan, Aquixtla, e Ixtacamaxtitlán.
- **Cb' (w2)**, Semifrío subhúmedo con verano fresco largo. Temperatura media anual entre 5° C y 12° C, temperatura del mes más frío entre -3° C y 18° C, temperatura del mes más caliente bajo 22° C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm, lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 a 10.2% del total anual. Presentes en una menor proporción.
- **C(wo)**, Templado subhúmedo. Temperatura media anual entre 12° C y 18° C, temperatura del mes más frío entre -3° C y 18° C y temperatura del mes más caliente bajo 22° C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual. Los municipios que presentan este clima son Ixtacamaxtitlán, Ocoatepec, Zautla, Chignautla, Xiutelco y Libres.
- **Cb'(w1)**, Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo. Temperatura media anual entre 5° C y 12° C, temperatura del mes más frío entre -3° C y 18° C, temperatura del mes más caliente bajo 22° C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal del 5 al 10.2% del total anual. Se encuentra en una porción reducida del municipio de Chignahuapan.

Así mismo, puede observarse los rangos de precipitación media anual que se presentan en la región (Fig. 14). Para toda la SNP los valores se encuentran por arriba de los 600 mm anuales, siendo el noreste del estado como los municipios de Ayotoxco y Hueytamalco los que presentan mayores volúmenes de precipitación sobrepasando los 4, 000 mm.

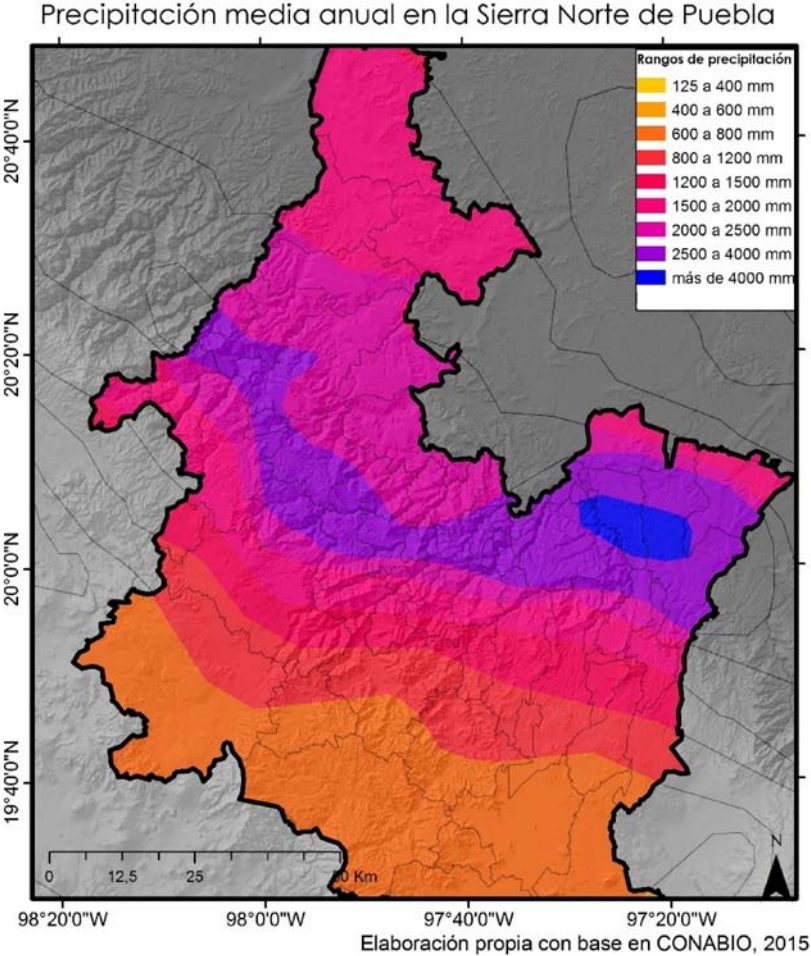


Fig. 14. Rangos de precipitación. Elaboración propia con base en CONABIO, (2015).

2.5. Definición de umbrales

Un umbral es el nivel mínimo o máximo de cierto valor que se necesita para que un proceso tenga lugar o cambie de un estado a otro (White *et al.*, 1998). Para Gill y Malamud (2014) es la cantidad mínima de energía para que un peligro principal pueda desencadenar el riesgo secundario (Gill y Malamud, 2014) y puede ser definido a partir del suelo, precipitación, condiciones hidrológicas, entre otros.

- Un umbral mínimo define el nivel más bajo por debajo del cual un proceso no ocurre.
- Un umbral máximo representa el nivel por encima del cual un proceso ocurre siempre.

Para procesos de remoción en masa, un umbral puede definir la precipitación, humedad del suelo, o las condiciones hidrológicas que, cuando se alcancen o superen, son propensas a desencadenar movimientos del terreno.

Los umbrales pueden ser definidos como físicos y empíricos (Fig. 15). Los modelos físicos se dividen en dos: los basados en procesos que buscan una extensión espacial de ciertos modelos obtenidos de las características del terreno como los modelos de infiltración; y los conceptuales, que se basan en estimaciones de gabinete y aproximaciones conceptuales para el cálculo.

Sin embargo, para estos métodos se precisa una cuantiosa información de la zona como hidrología, geomorfología, edafología, entre otros; y que en al menos en México es difícil su obtención. Por otro lado están los umbrales empíricos, que de acuerdo a su escala pueden ser calculados globalmente, regionalmente o localmente.

Cada uno de ellos posee ventajas y limitaciones; por ejemplo, un umbral global o universal puede ser aplicado en cualquier parte del mundo aún sin poseer muchos

datos de la zona, aunque el grado de incertidumbre es mucho mayor y el umbral puede ser impreciso lo que aumenta la posibilidad de falsos positivos (Medina y Cepeda, 2011). Los umbrales regionales abarcan áreas de pocos a miles de kilómetros de iguales condiciones climatológicas, geomorfológicas, edafológicas, entre otros, y que son adecuados por ejemplo para la SNP, donde los sistemas de alerta se desarrollaran con base a las medidas y estimaciones espaciales cuantitativas de lluvia. Y por último, los umbrales locales que dan información más precisa pero que a su vez necesita una muy completa base de datos de la zona a estudiar y solo se emplean en la zona de estudio.

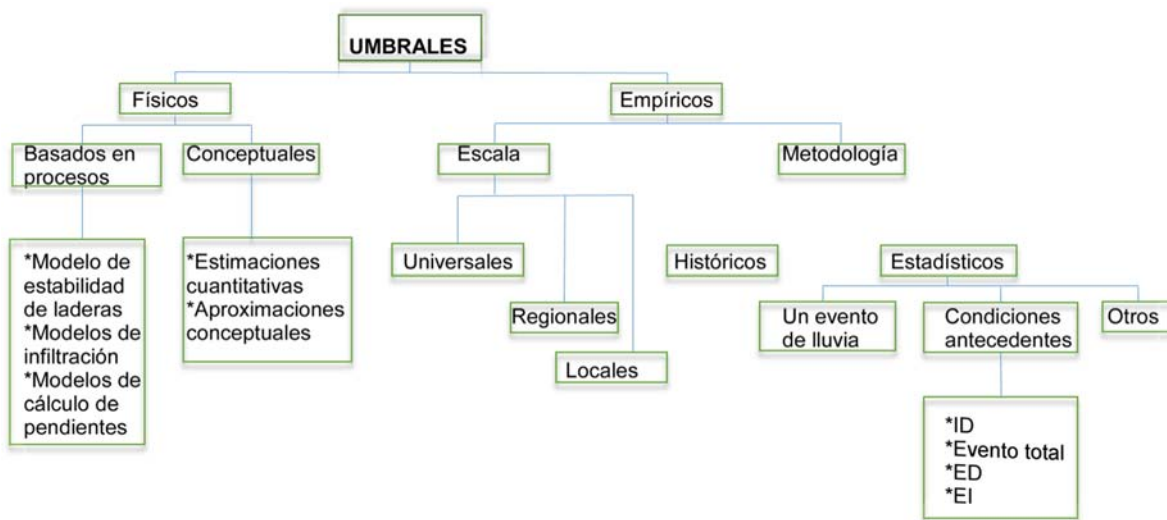


Fig. 15. Clasificación de umbrales que desencadenan PRM . (ID) Intensidad-Duración; (ED) Evento-Duración; (EI) Evento-Intensidad. Elaboración propia con base en Guzzetti *et al.*, (2007).

Los umbrales empíricos se dividen de acuerdo a la metodología; aquellos que son elaborados unicamente con registros históricos y los estadísticos que utilizan una serie de datos para generar una probabilidad.

Para su cálculo, estos últimos pueden utilizar un solo evento de lluvia; las condiciones antecedentes al evento tomando variables como Intensidad y Duración de precipitación durante y antes del evento (ID); solo el evento total, el uso del evento y la duración (ED) o el del evento y la intensidad (EI). De ellos el más utilizado en la literatura es el de ID (Guzzetti *et al.*, 2007).

El primero en hablar de umbrales de precipitación fue Caine (1980) ya que elaboró un límite de forma general por medio de registros publicados de deslizamientos superficiales y flujos asociados con la intensidad y duración de lluvia. De acuerdo a lo que se creía en este tipo de procesos, los más probables son aquellos en donde el agua infiltrada tiene una relación directa con la inestabilidad de una pendiente y elaboró la siguiente fórmula:

$$I = 14.82 D^{-0.39}$$

Donde I = Intensidad (mm hr⁻¹)

D = Duración de lluvia (hr)

Esta puede ser aplicada para los eventos de duraciones entre 10 minutos y 10 días, ya que antes o después de este rango aumenta la probabilidad de incertidumbre.

Así como Caine (1980), diversos autores han calculado ecuaciones globales, regionales y para cada país con excepción de México. Algunos umbrales tomados de la recopilación histórica elaborada por Guzzetti *et al.* (2007) se encuentran detallados en la tabla 2.

#	ESCALA / REGIÓN	TIPO	ECUACIÓN	RANGO	AUTOR
1	G Mundo	Deslizamiento superficial y flujo de detritos	$I = 14.82 \times D^{-0.39}$	$0.167 < D < 500$	Caine (1980)
2	R Puerto Rico	Flujo de detritos	$I = 66.18 \times D^{-0.52}$	$0.5 < D < 12$	Jibson (1989)
3	R Brasil	Flujo de detritos	$I = 63.38 - 22.19 \times D^{1.0}$	$0.5 < D < 2$	Jibson (1989)
4	G Mundo	Flujo de detritos	$I = 30.53 \times D^{-0.57}$	$0.5 < D < 12$	Jibson (1989)
5	R Lombardy, N. Italia	Todos los tipos	$I = 20.1 \times D^{-0.55}$	$1 < D < 1000$	Ceriani <i>et al.</i> (1992)
6	G Mundo	Deslizamiento de suelo	$I = 10 \times D^{-0.77}$	$0.1 < D < 1000$	Clarizia <i>et al.</i> (1996)
7	L Mettman, Oregon	Todos los tipos	$I = 9.9 \times D^{-0.52}$	$1 < D < 170$	Montgomery <i>et al.</i> (1997)
8	G Mundo	Deslizamiento superficial	$I = 0.48 + 7.2 \times D^{-1}$	$0.1 < D < 1000$	Crosta y Frattini (2001)

Tabla 2. Umbrales de duración-intensidad para el desencadenamiento de PRM. Escala: G, umbral global; R, umbral regional y L, umbral local. Elaborado con base en Guzzetti *et al.*, (2007).

2.6. Descripción del método de Bayes

Umbrales probabilísticos del teorema de Bayes

Si bien en la literatura existen diversos métodos para obtener umbrales de precipitación; debido a las condiciones de la región se calculará un umbral regional por medio del teorema de Bayes, ya que es una aplicación directa de las probabilidades condicionales; es decir, de la probabilidad que algún evento A (movimiento de ladera) se dé dada la ocurrencia de algún evento B (precipitación; Berty *et al.*, 2012).

El teorema ha sido utilizado en diversos campos disciplinares tanto económicos, sociales, administrativos, médicos además de ciencias exactas. Es una herramienta útil para aquellos tomadores de decisiones que están sujetas a un riesgo (Córdor, 1989).

Dentro de los umbrales estadísticos cuando se tiene una sola entrada (precipitación) y se obtienen diversas salidas (movimiento o no movimiento) es preferible recurrir a un modelo probabilístico para la creación de umbrales dado que un modelo determinista resulta inaplicable (Berty *et al.*, 2012).

Entre las ventajas que tiene la base probabilística es que incorpora la variabilidad y la incertidumbre en el modelo. Esto ayudará a proporcionar referencias sobre la fiabilidad del umbral. Además que provee una posible distribución de la cantidad prevista proporcionando una mejor perspectiva para la estimación de eventos extremos (Berty *et al.*, 2012). Otra de las ventajas de la utilización del teorema de Bayes es que se puede generar diversas combinaciones de los parámetros del modelo que reflejen los umbrales más probables, y a partir del mismo generar estadísticas de variación para diferentes eventos con determinadas condiciones de intensidad y duración de lluvia, y proveer así una medida de confianza sobre las predicciones del modelo (Medina y Cepeda, 2011).

2.6.1. Una dimensión

El teorema de Bayes en casos de una dimensión, está definido como:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)}$$

Donde:

P (B|A)= Probabilidad condicionante de B dado A. Es decir, la probabilidad de observar un evento de lluvia de características B cuando ocurre un movimiento de ladera (A).

P(A)= Probabilidad *a priori* de A. Es decir, la probabilidad de que ocurra un movimiento de ladera independientemente si se presenta o no un evento de lluvia de magnitud B.

P (B)= Probabilidad marginal de B. Es la probabilidad de observar un evento de lluvia de magnitud B. Es decir, la probabilidad de que se observe una lluvia de magnitud B independientemente si se presenta o no un movimiento de ladera.

P (A|B)= Probabilidad condicionante de A dado B. Es decir, la probabilidad de observar un movimiento de ladera cuando ocurre un evento de lluvia de magnitud B.

La probabilidad bayesiana está calculada en términos de frecuencias relativas de la siguiente forma:

$$P(A) \approx \frac{N_A}{N_R}$$

$$P(B) \approx \frac{N_B}{N_R}$$

$$P(B|A) \approx \frac{N_{(B|A)}}{N_A}$$

Donde:

N_R = Es el total de números de eventos de lluvia registrados durante dado periodo de tiempo.

N_A = Es el total de números de movimientos de ladera ocurridos durante dicho periodo.

N_B = Es el número de eventos de lluvia de magnitud B

$N_{(B|A)}$ = El número de eventos de lluvia de magnitud B que resultaron en movimientos de ladera.

El principal aspecto de la inferencia de Bayes es que se usa la probabilidad *a priori* y marginal. Es decir, no se obtiene la probabilidad basada únicamente en los eventos de lluvia que desencadenaron movimientos sino planteando escenarios a futuro. Será expresado en el siguiente ejemplo.

La tabla 3, es elaborada a partir de los datos de la estación climatológica Cuetzalan del Progreso. Suponiendo que del total de eventos de movimientos de ladera presentados en la región sólo 4 de 6 presentaron la condición de lluvia B con una intensidad $I \geq 50$ mm/día. El primer cálculo de probabilidad podría ser simplemente

dividir $4/6$, no obstante, el resultado 0.66 es incorrecto porque nos indica la probabilidad de $P(B|A)$, es decir la probabilidad de observar un evento de lluvia de intensidad B cuando un movimiento ocurre; y no $P(A|B)$ que es la probabilidad de observar un movimiento de ladera cuando determinada lluvia de magnitud B ocurre.

ORDEN	FECHA	DURACIÓN (días)	INTENSIDAD (mm/día)	MOVIMIENTO DE LADERA
1	27/08/1991	1	19,5	No
2	4/10/1999	2	122,5	Si
3	30/06/2005	4	14,2	No
4	5/10/2005	4	255,9	Si
5	11/07/2007	2	15,1	Si
6	10/07/2010	4	103,5	Si
7	10/09/2010	18	35,7	Si
8	21/09/2010	2	68,0	No
9	4/05/2011	3	57,6	Si
10	20/06/2011	8	12,5	No

Tabla 3. Ejemplo de base de datos. Estación Cuetzalan, Puebla. Elaboración propia con base en CONAGUA, Estación 21032.

En este mismo ejemplo, supongamos que durante cierto periodo hubo un total de 100 eventos de lluvia, de los cuales 45 cumplieron con nuestra condición, nuevamente $B \equiv I \geq 50$ mm/día. Por tanto nuestro $P(A) = 100/6$ que es igual a 0.06 ; el $P(B)$ que sería tomando la intensidad de $I \geq 50$ mm/día = $100/45$ que es igual a 0.45 ; la $P(B|A)$ calculada anteriormente con un resultado de 0.66 , dará una probabilidad $P(A|B)$ de 0.08 .

Entre los beneficios de dicho cálculo es que permite combinar condiciones de un evento de lluvia con diferentes rangos de intensidades. En el ejemplo anterior, solo se utilizó una $I \geq 50$ mm pero la intensidad puede ser propuesta de acuerdo a las características de la precipitación de cada región.

2.6.2. Dos dimensiones

El Teorema de Bayes en casos de dos dimensiones, está definido como:

$$P(A|B, C) = \frac{P(B, C|A) \cdot P(A)}{P(B, C)}$$

Donde:

B, C= Indica la probabilidad conjunta de las dos variables (Intensidad y duración)

B≡ **I** Intensidad de lluvia

C≡ **D** Duración de lluvia

P (B, C|A)= Probabilidad condicionante de B y C dado A. Es decir, la probabilidad de observar un evento de lluvia de características B y C cuando ocurre un movimiento de ladera A.

P(A)= Probabilidad *a priori* de A. Es decir, la probabilidad de que ocurra un movimiento de ladera independientemente si se presenta o no un evento de lluvia de magnitud B.

P (B, C)= Probabilidad marginal de B y C. Es la probabilidad de observar un evento de lluvia de magnitud B y C. Es decir, la probabilidad de se observe una lluvia de intensidad B y duración C, independientemente si se da o no un movimiento de ladera.

P (A|B, C)= Probabilidad condicionante de A dado B y C. Es decir, la probabilidad de observar un movimiento de ladera cuando ocurre un evento de lluvia de magnitud B y C.

Se repetirá la misma ecuación como en una dimensión pero en vez de utilizar los valores de los eventos que su lluvia fue de intensidad $I \geq 50$ mm/día, solo podrán ser contabilizados si también cumplen con la condición de $D \geq 5$ días. Para el análisis se utiliza como ayuda la figura 16 tomando los datos de la tabla 3.

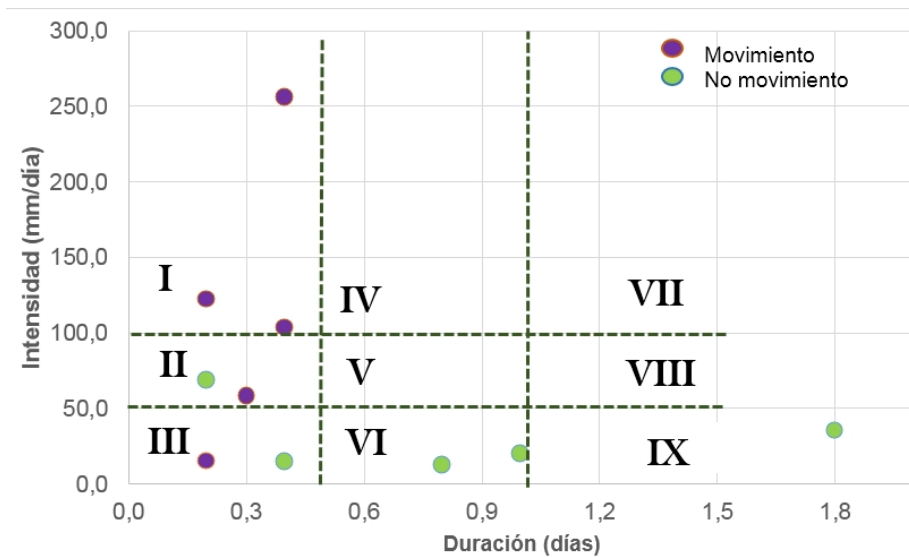


Fig. 17. Ejemplo de cuadro para análisis de dos dimensiones. Nueve cuadrantes hechos con diferentes parámetros de rangos de intensidad y duración de lluvia. Los días son expresados como decimales para mejor visualización. Elaboración propia con base en CONAGUA, Estación 21032.

Con esta combinación resultan nueve cuadrantes de acuerdo a las condiciones de B y C que se aplican dentro de la probabilidad. Por ejemplo, se elaboraron 3 rangos de intensidad de lluvia $0 \leq I < 50$, $50 \leq I < 100$, y $I > 100$ mm/día. Así mismo 3 rangos de duración de lluvia $0 \leq D < 5$, $5 \leq D < 10$, y $I > 10$. Para el cálculo del cuadrante 2, es evidente el 50% de probabilidad debido a los pocos datos, pero, cuando se obtienen numerosos eventos, el cálculo puede tornarse más complejo.

En este ejemplo tenemos 10 eventos de los cuales $P(A) = 6/10 = 0.6$; $P(B,C) = 2/10$ dando como resultado 0.2, $P(B,C / A) = 1/6 = 0.16$ y por último $P(A|B,C) = 0.16 \cdot 0.6 / 0.2 = 0.5$, es decir la probabilidad de observar un movimiento de ladera cuando un evento de lluvia sea de 50 a 100 mm/día, de 1 a 5 días .

Siguiendo con la metodología de Berty *et al.* (2007) con la probabilidad de procesos de remoción en masa de acuerdo a las dos dimensiones de lluvia, duración e intensidad se procede al análisis visual que dará como resultado el umbral probabilístico comparándolo con el modelo determinístico propuesto por Guzzetti, *et al.* (2007). Para el análisis se utiliza el programa computacional MatLab.

CAPITULO 3. RESULTADOS

3.1. Procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla

Para el trabajo se utilizó la base de datos del Sistema de Inventario de Efectos de Desastres (DesInvertar); un catálogo a cargo de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (LA RED) donde se encuentran disponibles los desastres por cada país, clasificado por causas de origen. Además de la búsqueda de noticias en periódicos locales sobre procesos de remoción en masa registrados en la Sierra Norte de Puebla para el periodo de 1989 a 2012 cuyas causas fueran relacionadas directamente a la precipitación del mes de mayo a noviembre (Tabla, 4).

De los eventos de PRM con mayor importancia en cuanto a daños ocasionados está el fenómeno de 1999 que causó afectaciones en más de 27 municipios dejando decenas de localidades incomunicadas y cientos de procesos de remoción en masa; o las fuertes lluvias en septiembre del 2006 que desencadenó la inestabilidad del cerro Necaxatépetl en el municipio de Juan Galindo que cayó sobre dos microbuses, un camión, dos pipas y una camioneta dejando más de 11 lesionados, 2 desaparecidos y 4 muertos (Jornada, 2006; Fig. 17). O los estragos del huracán Dean de categoría 5 el 22 de agosto del 2007 que obtuvo declaratoria de desastre en 74 municipios de Puebla, causando procesos gravitacionales en 8 municipios.

CVE	MUNICIPIO	FECHA	REGIÓN	DESCRIPCIÓN	LONGITUD	LATITUD	FUENTE
071	Huachinango	25/10/1989	SN	En la carretera Tulancingo Huachinango	-98.0524°	20.1396°	DesInventar- El Universal
174	Teziutlán	15/08/2000	SNO	En el tramo carretero Teziutlán-Atempan, a la altura de San Mateo	-97.3735°	19.8266°	El Universal
071	Huachinango	5/10/2005	SN	Derrumbe en el cerro Acatlán, en Huachinango rumbo a Cuautlile	-98.0096°	20.1996°	www.noticiaspuebla.wordpress.com

Tabla 4. Construcción a partir de registros de procesos de remoción en masa cuya causa esté relacionado a lluvias. SN, Sierra Norte; SON, Sierra Nororiental. Elaboración propia.



Fig. 17. Derrumbe en el municipio de Juan Galindo. Disponible en La Jornada de Oriente (2006)

El total de la búsqueda histórica fueron 163 eventos distribuidos en toda la región de 1989 al 2012. De los 44 municipios, el municipio de Huauchinango encabeza la lista ya que presentó 17 procesos de remoción en masa de importante magnitud desencadenados por lluvias; seguido por Zacapoaxtla y Teziutlán en la Sierra Nororiental, y Zacatlán en la Sierra Norte (Figs. 18-19).

Es importante aclarar que para el correcto cálculo de probabilidad regional, aquellos municipios que registraron dos o más PRM en el mismo día pero diferente localización, fueron tomados como un solo evento puesto que fueron desencadenados por el mismo evento de lluvia.

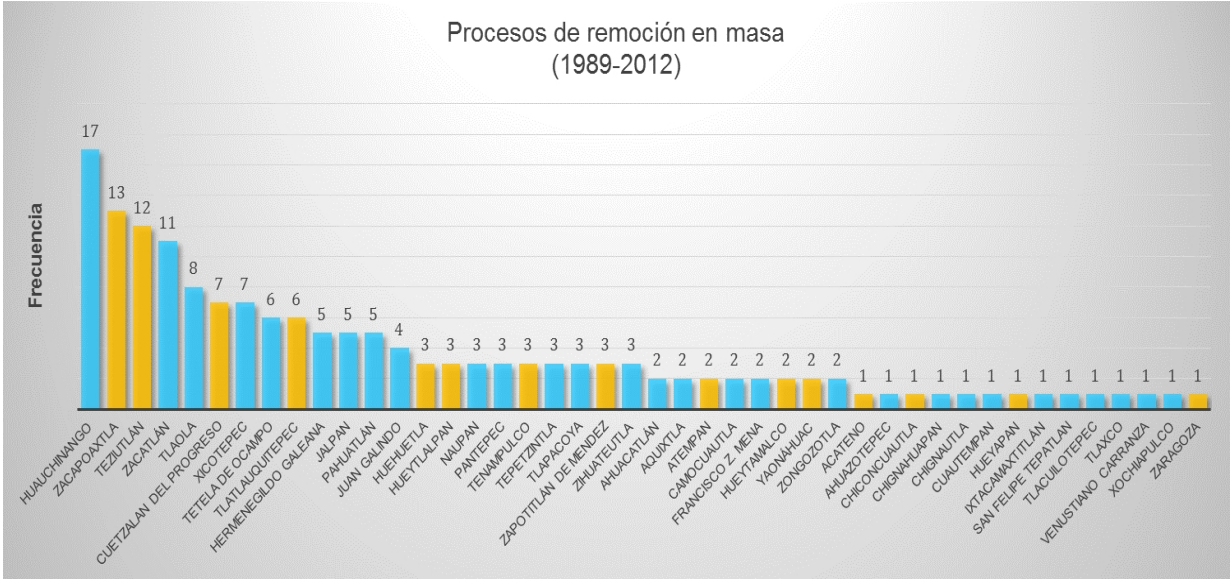


Fig. 18: Frecuencia de eventos de procesos de remoción en masa en cada municipio durante el periodo de 1989 al 2012. Región I: Sierra Norte (Azul), Región II: Sierra Nororiental (Naranja). Elaboración propia.

Frecuencia de movimientos de ladera por municipio (1989-2012)

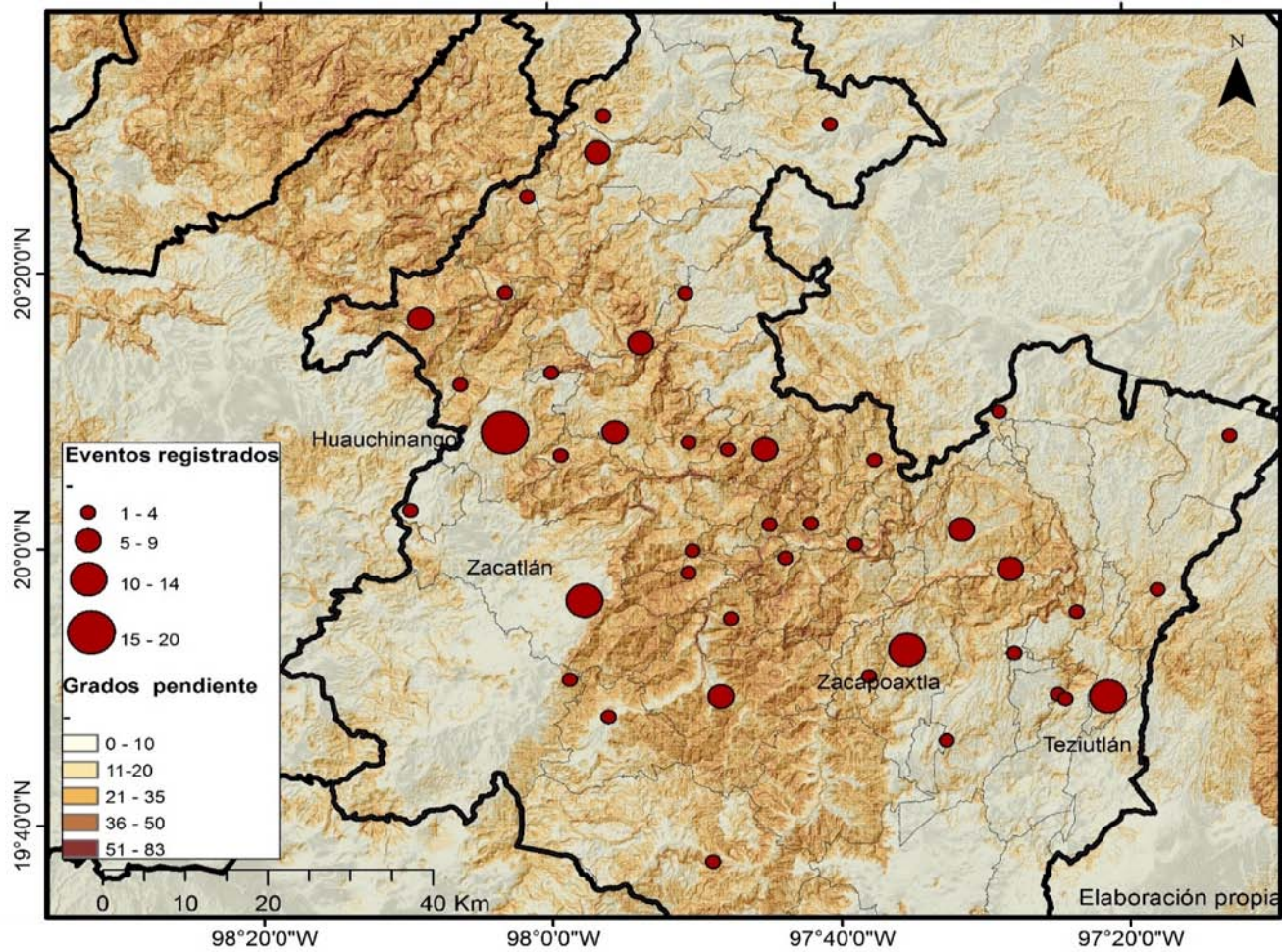


Fig. 19. Distribución espacial del número de eventos de procesos de remoción en masa reportados de 1989 al 2012. Elaboración propia.

Con la descripción textual del sitio de ocurrencia que proporcionaron los medios locales, se obtuvo la coordenada aproximada tomando como referencia las descripciones de topónimos, kilometraje de carreteras y poblados circundantes, con ayuda de ArcGis y Google Earth.

Una vez con las coordenadas se hizo la localización de puntos en ArcMap10 con el fin de obtener la cartografía correspondiente a la ubicación de los eventos (Fig. 20). Se digitalizó la red de estaciones meteorológicas correspondientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y estaciones automatizadas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Forestales (INIFAP) y se seleccionó solo aquellas que cumplieran con una buena base de datos históricos, más de treinta años de funcionamiento y más de 85% de datos para el caso de los datos obtenidos del Extractor Rápido de Información Climática (ERIC) para la formulación de la climatología del lugar.

Así mismo, se relacionaron las variables de topografía y grados de pendientes con un Modelo Digital de Elevación por dos motivos, la primera es que diversos investigadores mencionan que entre 28° y 45° cuando las laderas son muy abruptas los deslizamientos generados son muy numerosos, sobre todo en relación con fuertes lluvias (Gutiérrez, 2008); y la segunda es que permitió un panorama general de las condiciones del terreno que sirvió para asignar el área de influencia de cada estación meteorológica. Es decir, se realizó a un análisis visual espacial tomando como referencia la topografía del terreno y la distancia (Fig. 20); además un buffer de 10 km del PRM a la estación meteorológica más cercana, con el propósito que ésta fuera capaz de reportar las condiciones de lluvia que desencadenaron el movimiento.

Es interesante observar que la mayor proporción de PRM fueron localizados en zonas con mayor pendiente debido a la intersección del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Oriental.

Procesos de remoción en masa reportados en la Sierra Norte de Puebla para el periodo 1989-2012

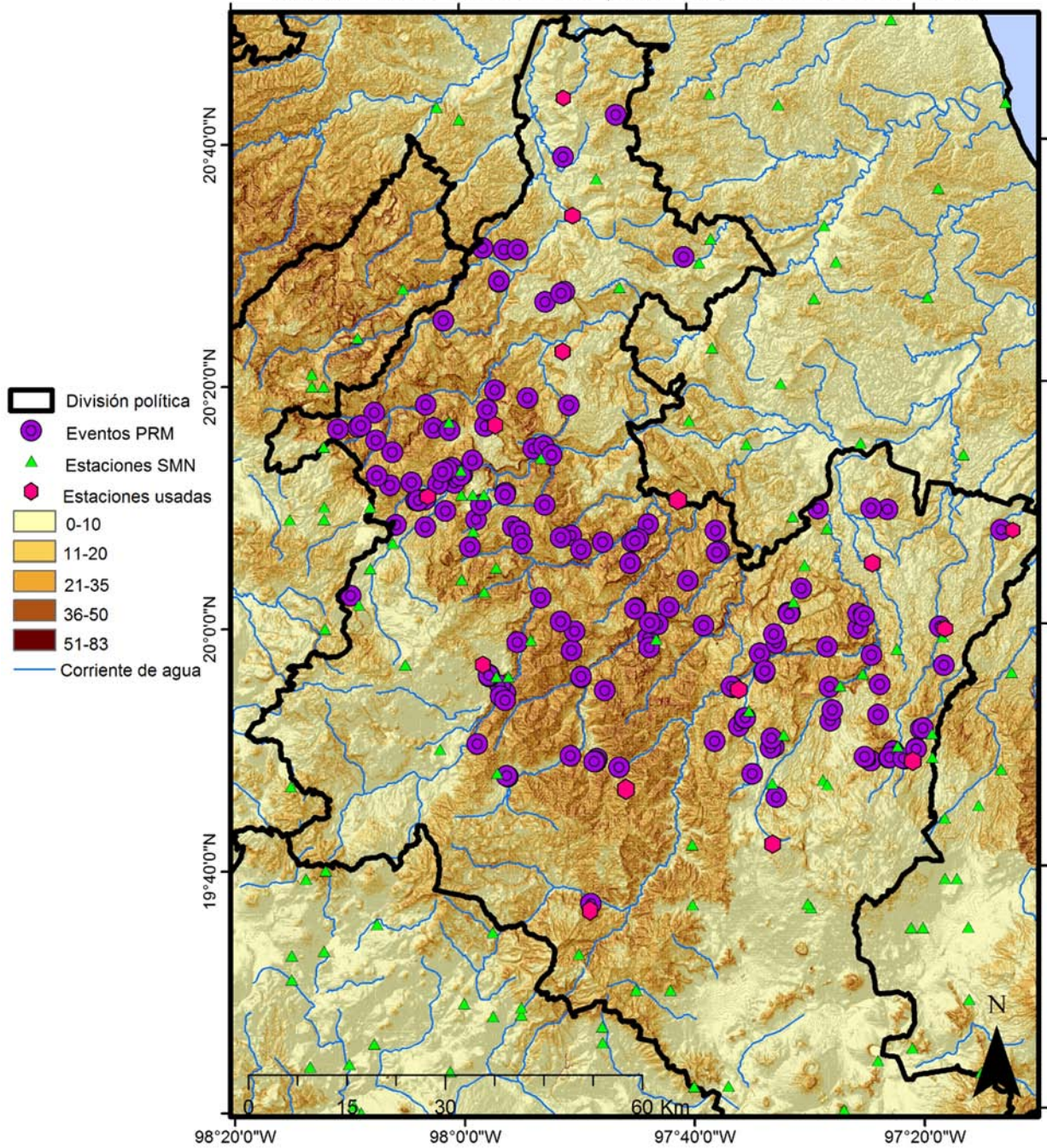


Fig. 20. Eventos de procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla. Elaborado con un Modelo Digital de Elevación 30m, grados de pendientes de 0 a 83° y estaciones meteorológicas (CONAGUA). Elaboración propia.

3.2. Características de la precipitación

El patrón estacional de eventos de PRM indica que el mes con mayor ocurrencia de PRM es julio, seguido por el mes de octubre. Por su parte, mayo y noviembre al ser el inicio y final de la temporada reportaron menores incidentes (Fig. 21). De acuerdo a la base de datos del SMN en la región, los meses más lluviosos son julio y septiembre, a pesar, la precipitación acumulada y la duración de cada evento tienen relación directa con el desencadenamiento de PRM.

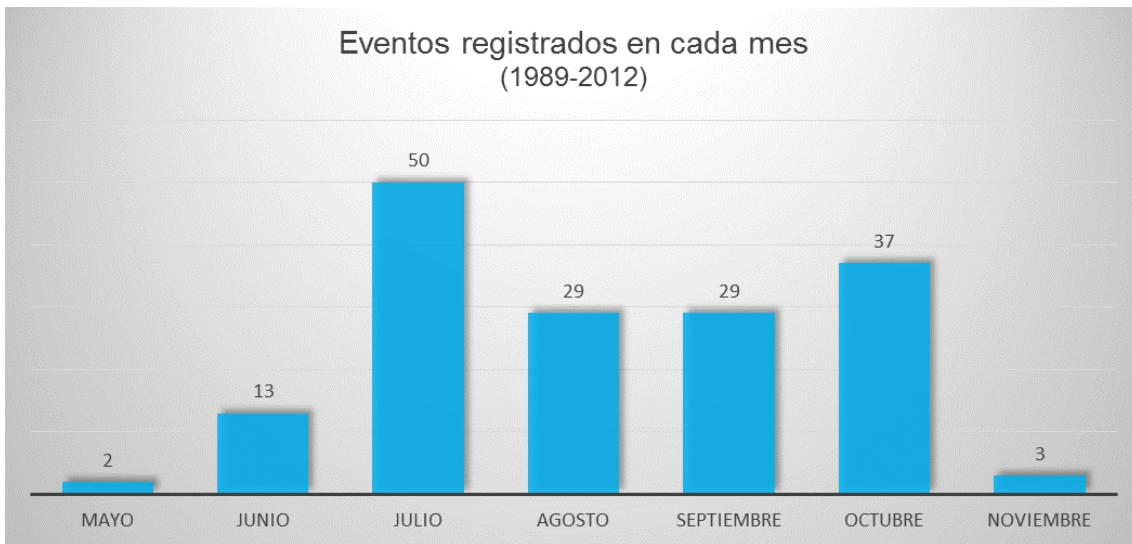


Fig. 21: Frecuencia de eventos por mes. Elaboración propia.

Posteriormente, para analizar el comportamiento diario de la precipitación asociada con PRM, se procedió a elegir un año que registrara alto número de movimientos de ladera en los últimos años. Se eligió el año 2008 porque presentó diversos fenómenos hidrometeorológico asociados a lluvias intensas, tales como 8 ciclones tropicales, 52 frentes fríos, 37 ondas tropicales y 5 tormentas invernales (SMN, s.f.).

Se utilizaron dos Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) en el área de estudio y se obtuvo la precipitación acumulada por cada hora del día promedio de cada mes (Anexo 1). De acuerdo a los datos obtenidos se elaboró la figura 22 en la cual se observa que aún con las variaciones propias de cada mes, las horas donde

se presenta mayor precipitación son por las tardes entre las 15 y las 22 horas, siendo las 4 y 5 de la tarde más frecuente en la región de la Sierra Nororiental (Estación Teziutlán) y las 7 y 8 de la noche para la Sierra Norte (Estación Huauchinango; Fig. 23).

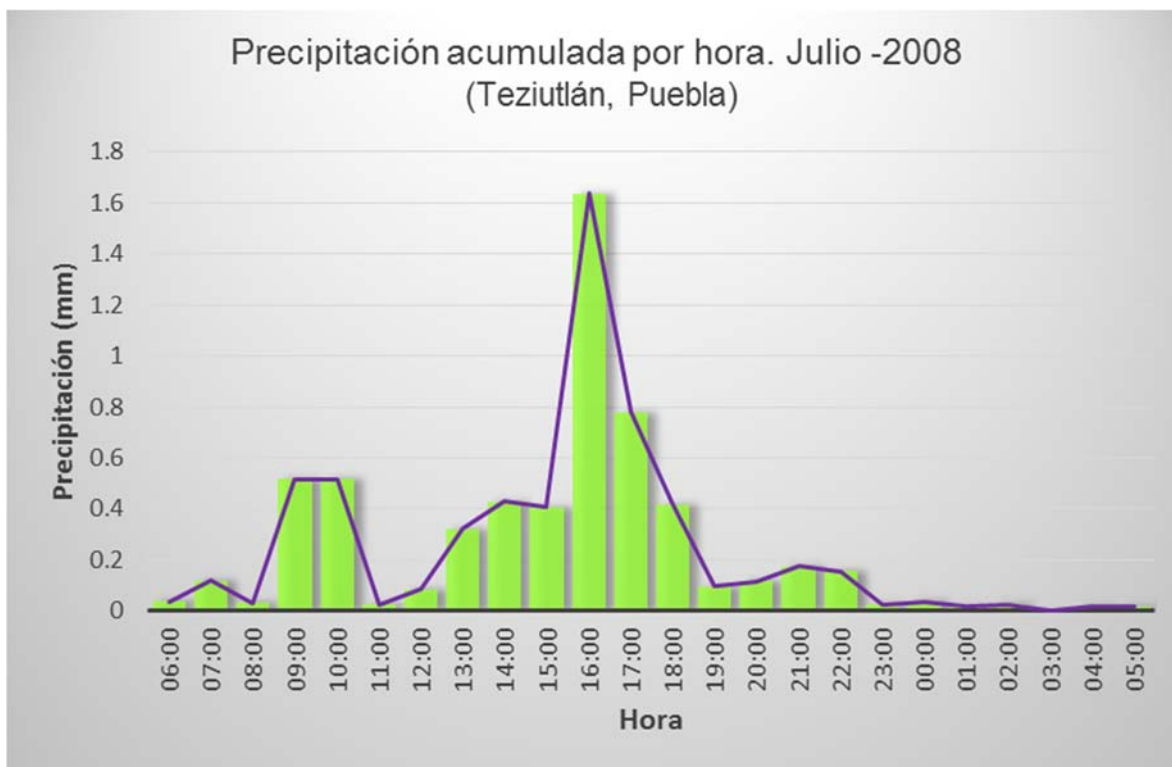


Fig. 22. Horas de mayor ocurrencia de precipitación en la Sierra Nororiental para julio del 2008. Elaboración propia con base en INIFAP, s.f. Estación meteorológica Teziutlán, Puebla (21089).

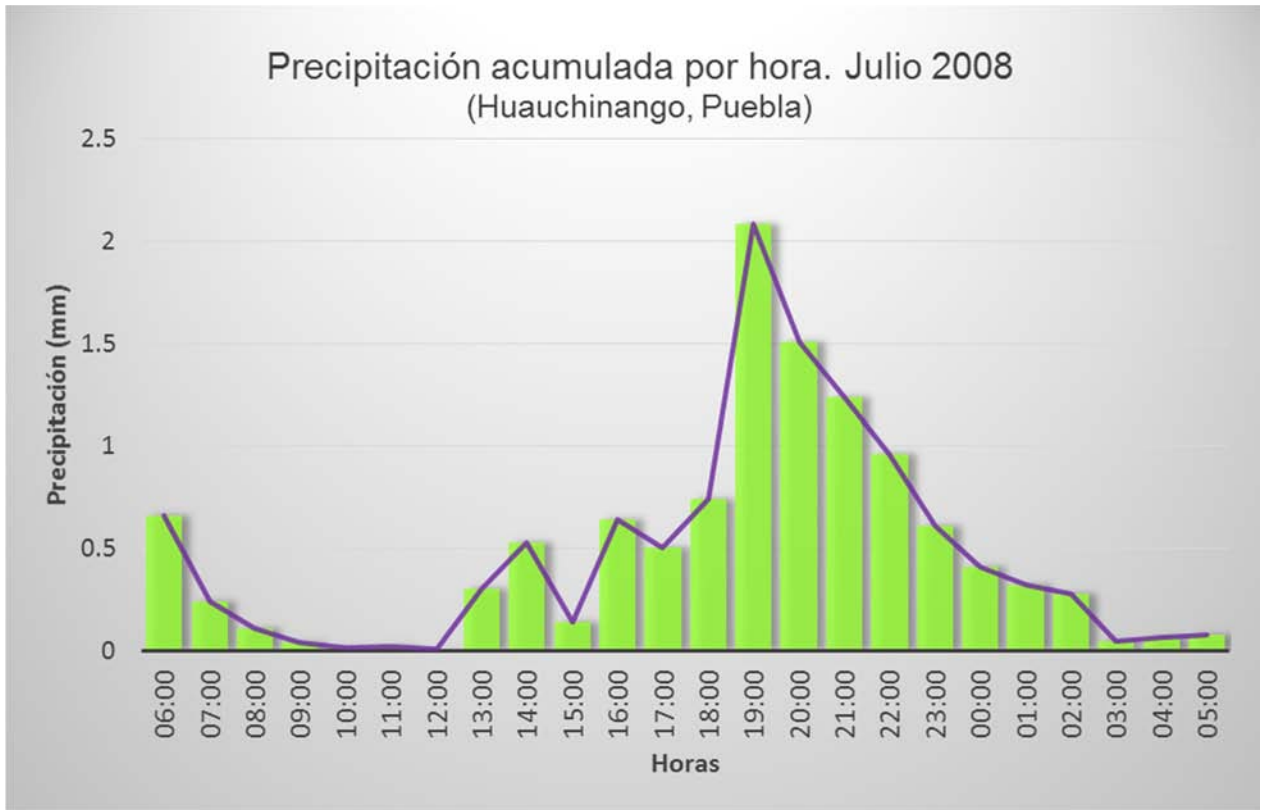


Fig. 23. Horas de mayor ocurrencia de precipitación en la Sierra Norte para julio del 2008. Elaboración propia con base en INIFAP, s.f. Estación meteorológica Huauchinango, Puebla (21090).

Este análisis permite conocer las horas promedio en que existe un mayor riesgo de desastre originado por lluvia, obteniendo predicciones meteorológicas de las próximas lluvias y emitir alertas si fuera necesario. El comportamiento está fuertemente ligado a los Sistemas Convectivos de Mesoescala que se presentan en la región relacionada a su vez con la lluvia orográfica resultado del aire húmedo proveniente del Golfo de México.

3.2.1. Huracanes

Las lluvias de verano están asociadas a la ZITC, al monzón mexicano, a las ondas del este y a los huracanes provenientes del Pacífico y Atlántico (Magaña, 2004). De los cuales, los huracanes son aquellos que más se relacionan en el incremento abrupto y recurrente de la intensidad de precipitación.

Las fuentes hemerográficas coincidieron con la presencia de huracanes, frentes fríos, entre otros. Al respecto se identificó los eventos de PRM que fueran desencadenados por algún ciclón tropical de acuerdo a la información histórica proporcionada por el SMN y fueron clasificados de acuerdo a los años ENSO (Fig. 25). Pudo observarse que del total de movimientos de ladera, 107 estuvieron relacionados directamente con ciclones tropicales, es decir el 65.24%. Del total de 164 eventos, 41 fueron relacionados con las lluvias de depresiones tropicales, 26 con huracanes, 22 por tormentas tropicales, 10 por ondas tropicales, y 8 por frentes fríos. Lo que indica la necesidad de extremar la prevención cuando exista la alerta de estos fenómenos acercándose a las costas mexicanas.

3.2.2. El Niño /La Niña

Otro de los fenómenos de baja frecuencia que modula las lluvias en la región centro-sur de México y por tanto vinculado con los PRM, es el fenómeno del Niño-Oscilación del Sur o ENSO (por su sigla en inglés).

Para examinar el impacto del ENSO se calculó el promedio de precipitación acumulada trimestral en años normales y con la presencia del ENSO con datos sobre anomalías obtenidos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA; Fig. 24); lo que corrobora, que la precipitación acumulada en los años La Niña es significativamente superior respecto a la normal, al contrario de los años El Niño donde persiste una clara disminución.

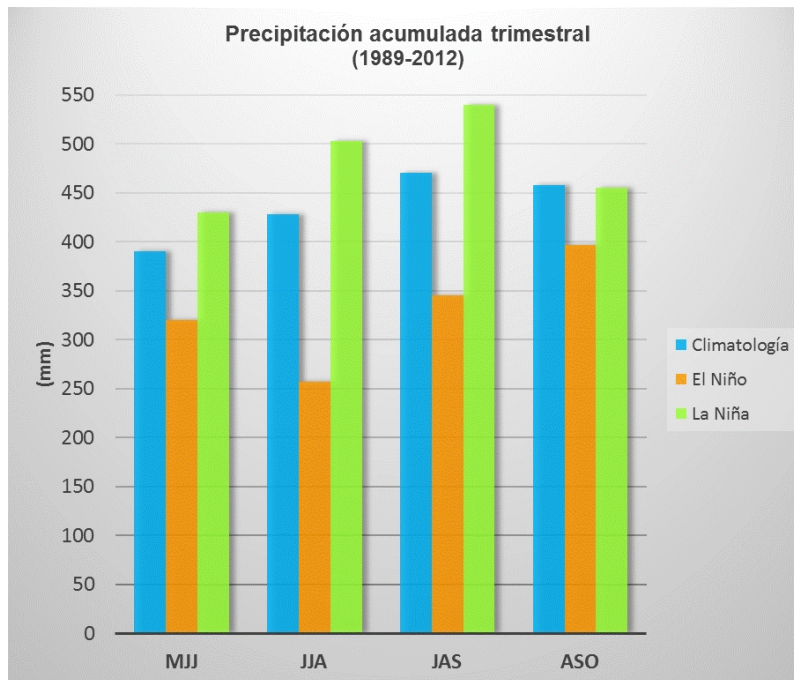


Fig. 24. Precipitación trimestral en años normales de la climatología, bajo condición El Niño y La Niña. Elaboración propia con base en SMN, (s.f).

Así mismo, con la información correspondiente de la frecuencia de PRM en cada año se procedió a verificar su correlación con el fenómeno ENSO. Como se puede apreciar en la figura 25; el número de eventos de procesos gravitacionales tiene una relación directa con La Niña, ya que 113 eventos de 163 ocurrieron en la presencia de ésta, es decir el 69.3%; 34 en años donde el promedio de precipitación se mantiene dentro de la media y 16 en años donde se reportó el fenómeno de El Niño.

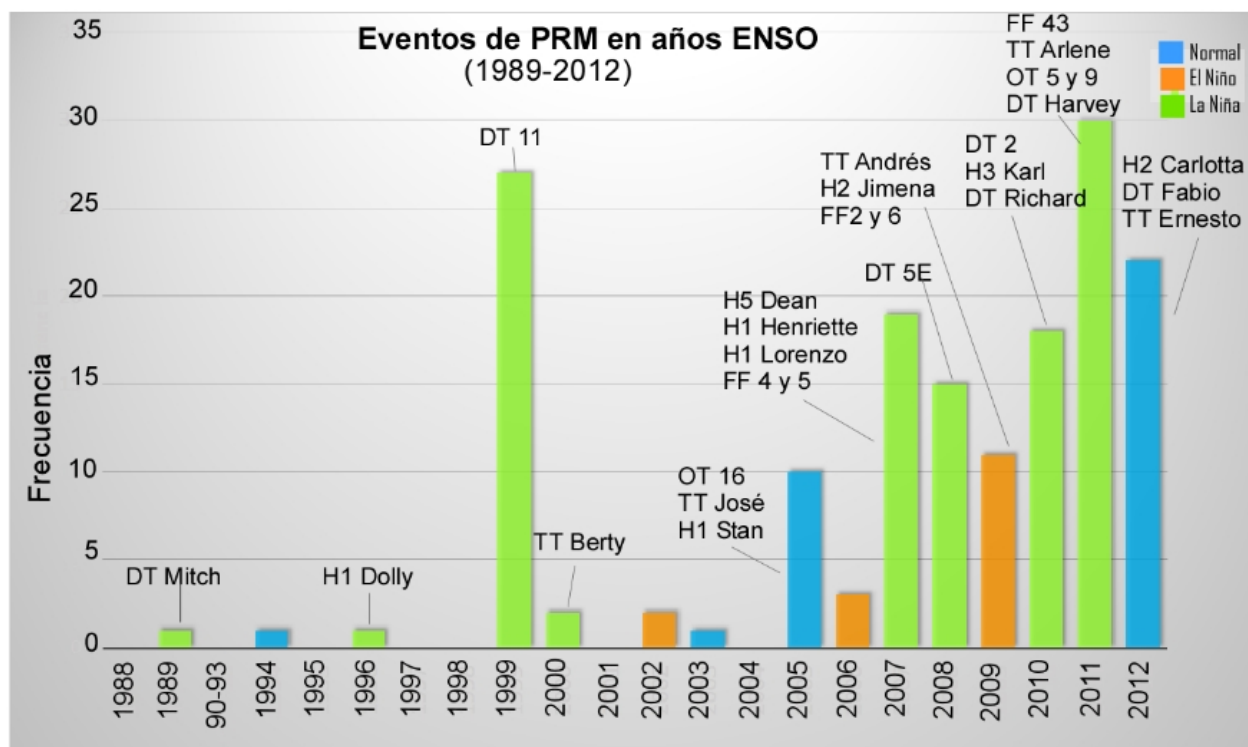


Fig. 25. Frecuencia de eventos de PRM por año bajo condiciones normales de climatología del lugar, en año El Niño y en año La Niña. Además de ciclones y fenómenos tropicales. (DT) Depresión Tropical; (H #) Huracán categoría # ; (TT) Tormenta tropical; (FF) Frente Frío; (OT) Onda Tropical. Elaborado con base en SMN, y NOAA, (2015).

3.3. Cálculo de la probabilidad Bayesiana

Se consideraron 15 estaciones meteorológicas de las previamente asignadas al inicio de la metodología (Fig. 20) seleccionadas bajo ciertos parámetros como calidad de los datos, cercanía del lugar de ocurrencia del PRM a la estación (buffer de 10 km) y el relieve, buscando su distribución homogénea en la región. Los datos obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) fueron en promedio hasta el año 2009 y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) para los años 2010, 2011 y 2012 según fuera el caso. La principal limitante es la falta de representación espacial en el área de estudio y la inoperatividad de las estaciones.

Con los datos de precipitación acumulada por cada día de los 23 años de estudio correspondientes, se procedió con el control de calidad de los datos, y se retiraron los meses que no correspondieran a la temporada de lluvia, es decir, de diciembre al mes de abril.

En aquellos municipios que poseían dos o más estaciones meteorológicas se eligió la de mayor porcentaje de datos, buena calidad y mayor cercanía al lugar donde se originó el PRM.

Se analizó cada uno de los eventos aislados definiendo su duración, y la precipitación acumulada desde días anteriores al evento, dicha acumulación fue definida visualmente en una gráfica a partir de un incremento abrupto en precipitación y el inicio a partir de tres días de menos de 0.5 mm de lluvia.

Posteriormente se trazó un umbral aproximado que desencadenara el movimiento de ladera. Para ello se dividieron en tres tipos;

- 1) **Bien definidos**, aquellos eventos donde es apreciable el umbral que desencadenó el movimiento con un incremento de precipitación acumulada (Fig. 26).
- 2) **Inciertos**, cuando el umbral no es claramente distinguido. Presentan dos o más aumentos contundentes en toda la duración del evento de lluvia pero no corresponde al día del movimiento (Fig. 27).
- 3) **Indefinidos**, cuando no es apreciable un umbral de desencadenamiento, con una precipitación acumulada invariable (Fig. 28).

En la figura 26 puede observarse un aumento de lluvia diaria bien definida de 40 mm acumulada para el 20 de agosto y que incrementó hasta los 180 mm para el día 26 de agosto, fecha en que se registró un PRM en el municipio de Tetela de Ocampo.

Los movimientos suscitados los días 9 y 10 de julio en Francisco Mena, resultaron de una precipitación acumulada en aumento progresivo desde el 28 de junio, lo que dificulta definir claramente un umbral, catalogándolo como incierto (Fig. 27), lo que puede derivarse a otras causas como el tipo de suelo, vegetación, entre otros factores.

A su vez, un movimiento el 15 de agosto en dos municipios; Chignautla y Teziutlán, reportaran para dicho día 160 mm de lluvia acumulada; a pesar de ello, durante tres días anteriores no hubo ocurrencia de precipitación en la región y el día 9 de agosto existió un incremento abrupto de lluvia pero no desencadenó movimiento (Fig. 28). Este es un ejemplo de un umbral indefinido.

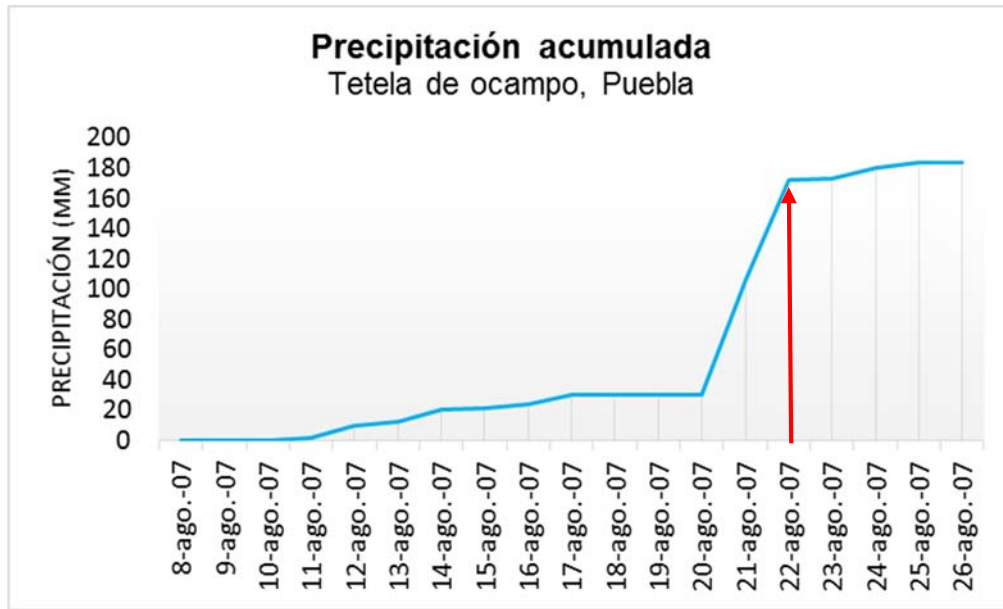


Fig. 26. Ejemplo de lluvia desencadenante bien definida. La flecha roja indica el día en que se suscitó el PRM. El umbral es apreciable con más de 160 mm de precipitación acumulada. Elaboración propia con base en el SMN, (2007).

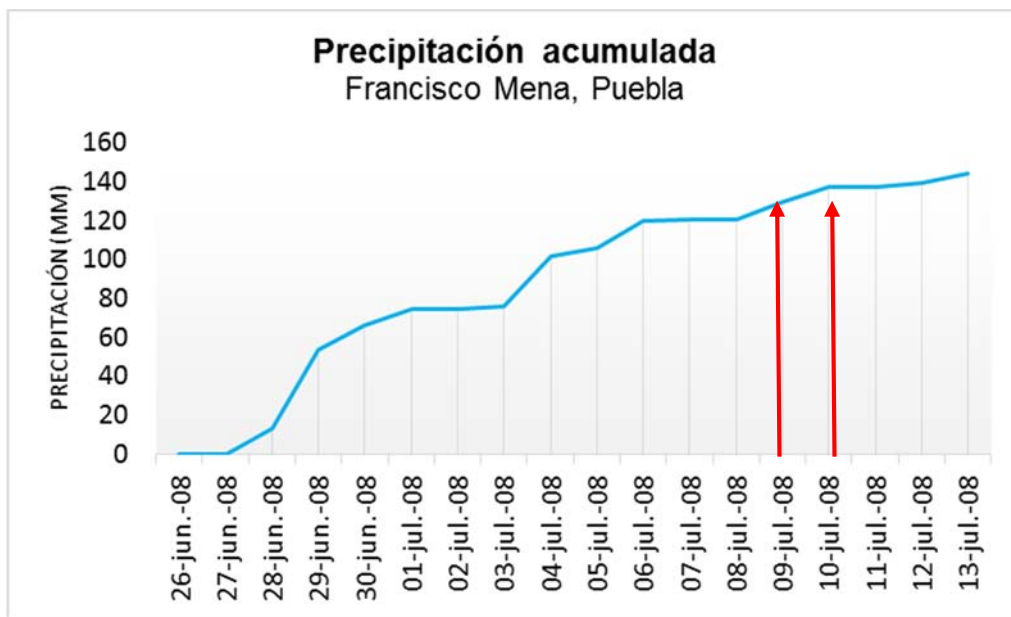


Fig. 27. Ejemplo de lluvia desencadenante incierta. Las flechas rojas indican los días 9 y 10 de julio de 2008 en que se suscitó el PRM. El umbral es apreciable con 120 mm de precipitación acumulada. Elaboración propia con base en el SMN, (2008).

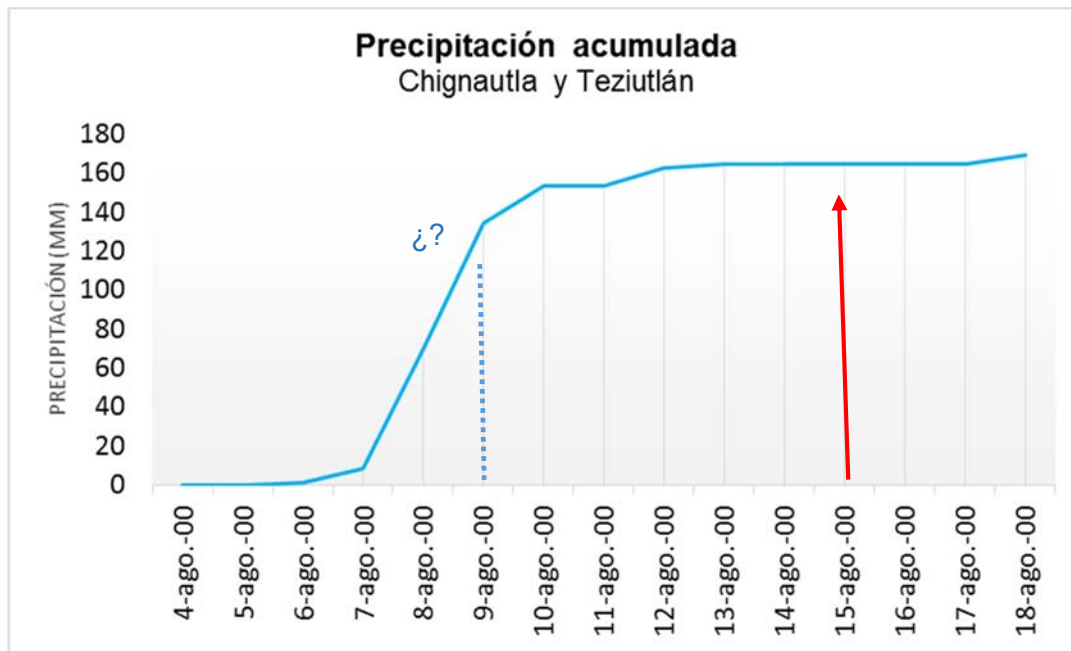


Fig. 28. Ejemplo de lluvia desencadenante indefinida. La flecha roja indica en que se suscitó el PRM. La línea punteada indica el incremento abrupto de lluvia sin movimiento. Elaboración propia con base en el SMN, (2000).

Analizando cada uno de los eventos, se definieron las lluvias desencadenantes, identificando que 67 fueron bien definidos, 46 inciertos y 35 como indefinidos (Anexo 2).

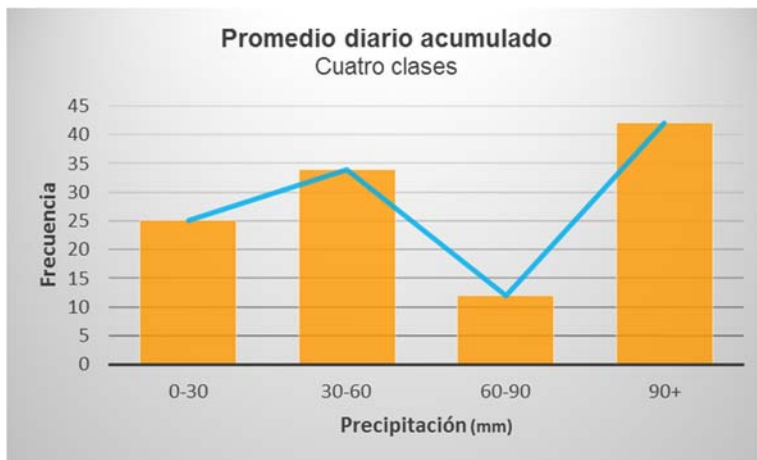
3.4. Cálculo de una dimensión

Como se explicó en el capítulo 2, el análisis bayesiano de una dimensión evalúa la relación de la variable B para explicar un evento A. Para su aplicación A es definido como la ocurrencia de un proceso de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla y B la variable que caracteriza un evento de lluvia, puede ser duración o intensidad, en este caso fue aplicada a intensidad.

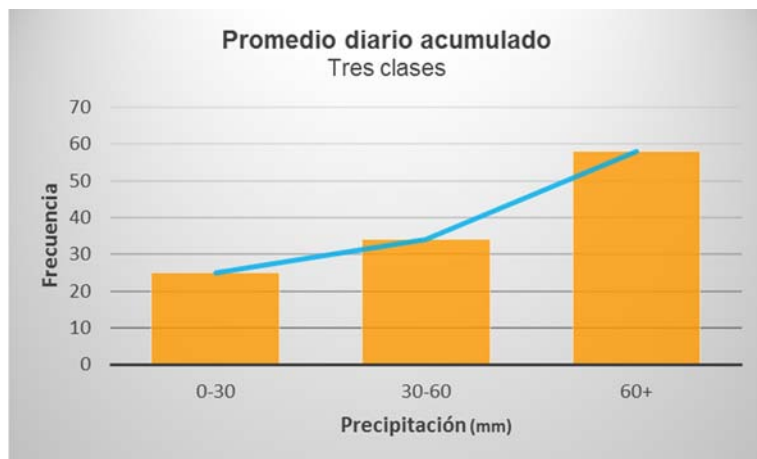
Antes de comenzar propiamente con el cálculo se hizo diversas pruebas sobre los rangos que se introducirían para el cálculo de la probabilidad condicional y que

explicaran mejor las características de precipitación de la región. Para ello se hicieron tres o cuatro clases (Fig. 29) con diversos rangos de precipitación que se registró el día del movimiento o incluso tres días antes, tomando el valor más alto.

a)



b)



c)

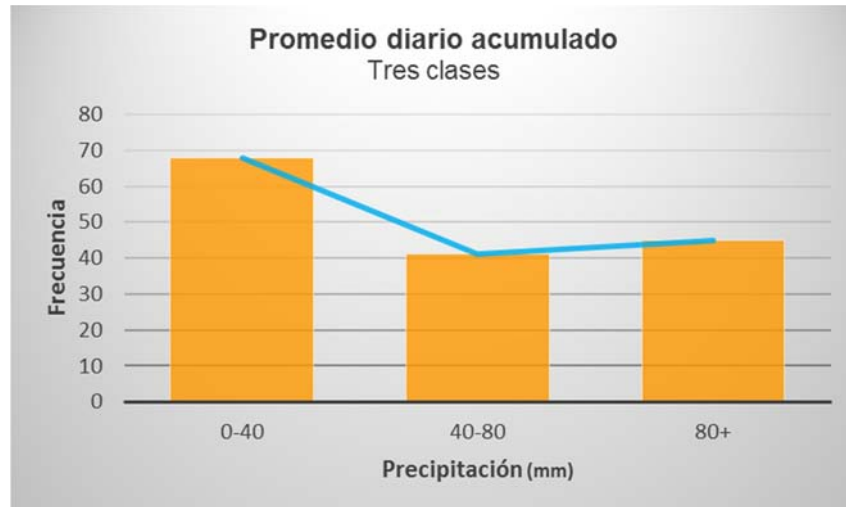


Fig. 29. Diferentes tipos de rangos de precipitación a) cuatro clases cada 30 mm, b) tres clases cada 40 mm y c) tres clases cada 30 mm. Elaboración propia.

A consideración se decidió tomar las tres clases de 30 mm; de 0 a 30 mm, de 30 a 60 mm y más de 60 mm, ya que mejor reflejó las características de la región y que mejor distribuyó los datos.

Se calculó entonces la probabilidad condicional para cada una de las estaciones elegidas para consecutivamente agruparlas en una versión final.

El tratamiento será ejemplificado con la figura 30 que corresponde a la estación meteorológica de Zacatlán, Puebla.

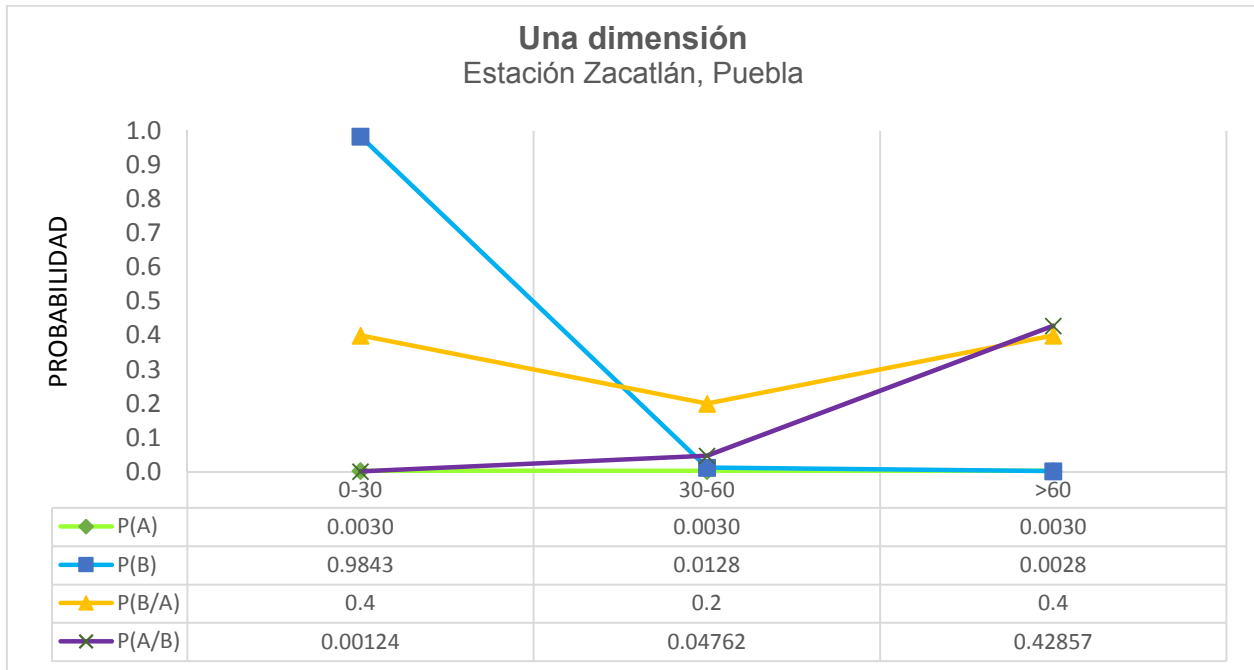


Fig. 30. Cálculo de probabilidad de una dimensión para tres intensidades de lluvia. Elaboración propia.

$P(A)$ fue definido como $N_A/N_R = 15/4919 = 0.003$, que es la probabilidad *a priori* de un PRM, representado por el número de movimientos en la región, entre el número de eventos totales de lluvia en el periodo de 1989 a 2012.

$P(B)$ fue definido como $N_B/ N_R = 4842/4919 = 0.98$ para la intensidad de 0 a 30 mm, $N_B/ N_R = 63/4919 = 0.01$ para intensidades de más de 30 a 60 mm, y $N_B/ N_R = 14/4919 = 0.002$ para intensidades de más de 60mm. Que indica la probabilidad marginal, representado por el número de eventos de lluvia registrados en un periodo de tiempo en cada uno de los tres rangos definidos, entre el total de eventos de lluvia.

$P(B/A)$ fue definido como $N_{(B/A)}/ N_A = 6/15 = 0.4$ para intensidades de 0 a 30 mm, $N_{(B/A)}/ N_A = 3/15 = 0.2$ en intensidades de más de 30 a 60 mm y $N_{(B/A)}/ N_A = 6/15 = 0.4$ para intensidades de más de 60 mm diarios. Indica la probabilidad condicional de B dado A, representado por los PRM que se registraron durante cada uno de los

tres rangos definidos, entre el número total de PRM reportados en la región durante el periodo de tiempo.

$P(A/B)$ fue definido como $N_{(B/A)}/N_B = 6/4842 = 0.001$ para intensidades de 0 a 30 mm, $N_{(B/A)}/N_B = 3/63 = 0.047$ para intensidades de más de 30 a 60 mm y finalmente $N_{(B/A)}/N_B = 6/14 = 0.428$ para intensidades de más de 60 mm diarios. Esto indica la probabilidad condicional o *a posteriori*, es decir, la probabilidad de A dado B y que es representado por el número de PRM que se registraron durante cada uno de los tres rangos definidos, entre el número de eventos de lluvia en cada uno de los rangos.

Se elaboró así el cálculo para cada una de las estaciones por separado (Anexo 3), y se agruparon en la figura 31 obteniendo la base total del compilado.

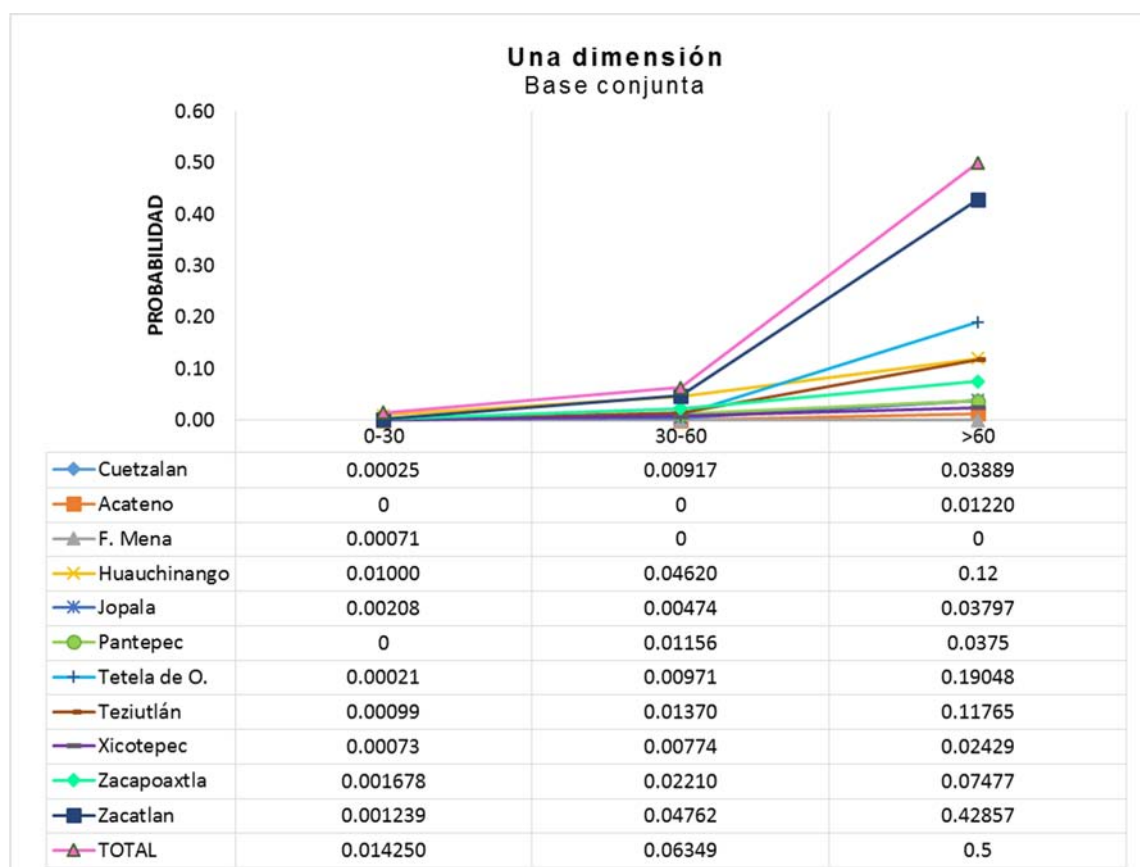


Fig. 31. Probabilidad condicional para 3 intensidades de lluvia. Base de datos formada por el total de estaciones meteorológicas elegidas. Elaboración propia.

El resultado es representado por la línea rosa del total, en ésta puede apreciarse que la probabilidad condicional para intensidades de lluvia de 0 a 30 mm es de menos del 0.01; es decir, la probabilidad de que un movimiento de ladera ocurra cuando llueve dadas las características de intensidad.

Es importante señalar que el número fue bajo, debido que aunque la mayoría de eventos de lluvia en la región son por debajo de los 30 mm muy pocos movimientos se suscitaron durante dichos días. Para intensidades diarias mayores de 30 hasta los 60 mm la probabilidad aumenta, sin embargo, sigue por debajo del 0.1 contrastando con la probabilidad de casi 0.5 que suceda un movimiento cuando la intensidad es por encima de los 60 mm.

Si bien, esta probabilidad ofrece un panorama sobre la intensidad; la mayor limitante es que deja fuera del cálculo otra variable importante de la precipitación que es la duración, ya que podría suscitarse que un determinado día precipite 90 mm sin algún movimiento, y una semana alrededor de 40 mm diarios y si desencadene un PRM. Para dicho impedimento se propuso el cálculo de dos dimensiones.

3.5. Cálculo de dos dimensiones

La ecuación de Bayes nos permite incorporar las dos variables que interesan de la precipitación para la probabilidad conjunta de desencadenar un PRM. Sin embargo, pueden ser utilizadas otras variables como lluvia precedente; empero esto dependerá de la interpretación previa que demuestre un mejor poder explicativo.

Previamente se hizo un análisis visual de los datos espacializando las dos variables; duración e intensidad de lluvia con base logD-logI. Los umbrales convencionales generalmente se obtienen de esta manera, trazando un límite inferior de los eventos de precipitación que desencadenan movimientos, o mediante fórmulas estadísticas que dan como resultado una tendencia lineal como los trabajos de Caine y Jibson (1980,1989) que su funcionamiento fue explicado en el capítulo 2.

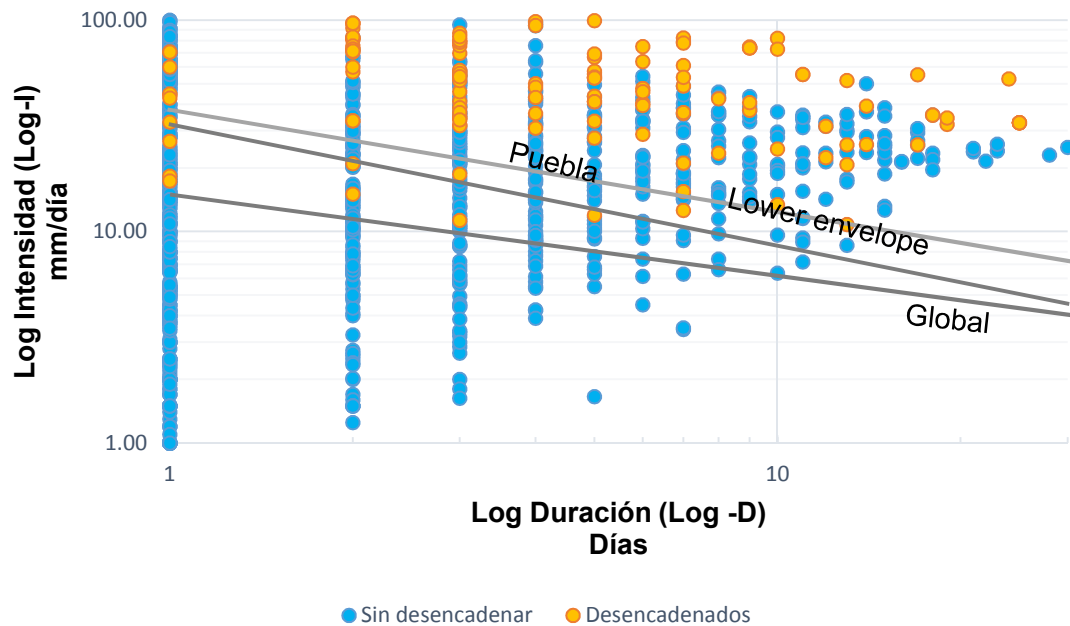


Fig. 32. Análisis de dos dimensiones, Log-I, Log-D. Puebla, umbral propuesto para la SNP diseñado visualmente, Lower envelope* (Jibson, 1989) y umbral mundial-Global (Caine, 1980). Elaboración propia.

Como se aprecia en la figura 32, el umbral de *Lower envelope** propuesto por Jibson (1989) como $I=30.53 \times D^{-0.57}$, define una línea por cual, los valores inferiores no desencadenan algún proceso de remoción en masa. A pesar de ello, al ser un umbral de escala global puede tener mayor grado de incertidumbre. De igual forma se compara con otro umbral global propuesto por Caine (1980) como $I= 14.82 \times D^{-0.39}$, define claramente una nula probabilidad de movimiento por debajo del umbral pero tiene la limitante de indicar valores muy generales de intensidad que corresponden a menos de 100 mm por un día. Por lo que se propone elevar el umbral para la SNP, con la finalidad de obtener un mayor acercamiento a la probabilidad de desencadenamiento.

***Lower envelope**. Es propuesto por Jibson en el año de 1989 utilizado como modelo en Puerto Rico. Su traducción en español definida como “menor dotación” o “envolvente inferior” no define realmente en concepto por lo que se decidió adoptar la palabra inglesa.

Consecutivamente se hizo el cálculo de la ecuación para cada una de las estaciones nuevamente y para la base conjunta. Para lo cual se decidió dividir el espacio en 9 rangos 3x3; Duraciones de 0 a 10 días, más de 10 a 20 días y más de 20 días; una intensidad de 0 a 30 mm, más de 30 hasta 60 mm y mayor de 60 mm. Lo que dio como resultado nueve tipos de combinaciones para el cálculo condicional (Tabla 5).

Teziutlán, Puebla.									
mm	0-30	30-60	>60	0-30	30-60	>60	0-30	30-60	>60
días	1 a 10	1 a 10	1 a 10	10 a 20	10 a 20	10 a 20	20-30	20-30	20-30
P(A)	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077				
P(B,C)	0,815	0,098	0,049	0,037	0,001		0	0	0
P(B,C A)	0,237	0,263	0,391	0,038	0,006		0	0	0
P(A B,C)	0,022	0,205	0,610	0,079	0,333	0	0	0	0

Tabla 5. Cálculo de dos dimensiones, para la estación Teziutlán. Resultado de nueve probabilidades condicionales. Elaboración propia.

En el ejemplo de la tabla 5, se realizó el cálculo para la estación de Teziutlán. B representado por la intensidad de lluvia y C como duración.

P(A) definido como la probabilidad *a priori*, fue denominada bajo la ecuación N_A/N_R ; es decir, el número de eventos de PRM entre el total de eventos de lluvias.

P (B,C) definido como la probabilidad marginal, fue denominada bajo la ecuación $N_{B,C}/N_R$; es decir, el número de eventos de lluvia de intensidades 0 a 30 mm para el primer cuadrante, y que a su vez la duración hay sido de 1 a 10 días, entre el total de eventos de lluvias durante dicho periodo.

P(B,C|A) definido como la probabilidad condicional, fue denominada bajo la ecuación $N_{(B,C|A)}/N_A$; es decir, el número de eventos de PRM que ocurrieron con intensidades de lluvia de 0 a 30 mm y de 1 a 10 días, entre el número total de movimientos registrados en dicho periodo.

$P(A|B,C)$ definido como la probabilidad *a posteriori* o condicional, bajo la ecuación $N_{(B,C|A)/N_{B,C}}$; es decir el número de movimientos registrados cuando se presentó un evento de lluvia de entre 0 a 30 mm y con duración de 1 a 10 días, entre el total de eventos de lluvia de dicha intensidad y duración que se presentaron en el periodo de tiempo.

Los resultados de cada estación por separado pueden apreciarse al final del documento (Anexo 4). Como último paso se procedió a la elaboración de la base de datos conjunta obteniendo los siguientes resultados (Tabla 6).

Probabilidad final-bidimensional									
mm	0-30	30-60	>60	0-30	30-60	>60	0-30	30-60	>60
Días	1 a 10	1 a 10	1 a 10	10 a 20	10 a 20	10 a 20	20-30	20-30	20-30
P(A)	0,155	0,155	0,155	0,155	0,155		0,155		
P(B,C)	0,549	0,194	0,175	0,056	0,013		0,013		
P(B,C A)	0,103	0,314	0,442	0,077	0,026		0		
P(A B,C)	0,029	0,250	0,390	0,214	0,308	0	0	0	0

Tabla 6. Base final de estaciones conjuntas. Cálculo de dos dimensiones para la región de la SNP. Resultado de las nueve probabilidades condicionales. Elaboración propia.

A partir de la probabilidad de Bayes, se pudo obtener la probabilidad para cada uno de los escenarios condicionales, alcanzando una mayor probabilidad de ocurrencia de un PRM con lluvias superiores a 60 mm y de 1 a 10 días; a su vez, la probabilidad disminuye cuando precipita con intensidades de 0 a 30 mm y de 1 a 10 días. Así mismo, son obtenidas probabilidades de 0 con lluvias superiores de 20 a 30 días con intensidades mayores de 30 mm, que por lo general corresponden a eventos de alta intensidad pero poca duración.

Por último se elaboró un histograma automatizado utilizando el software Matlab que permitió el ingreso de los datos, espacializando las dos dimensiones con su respectiva probabilidad (Fig. 35). Así mismo, se graficó un nuevo umbral propuesto para la SNP que mejor define la probabilidad de deslizamiento de acuerdo a la intensidad y duración.

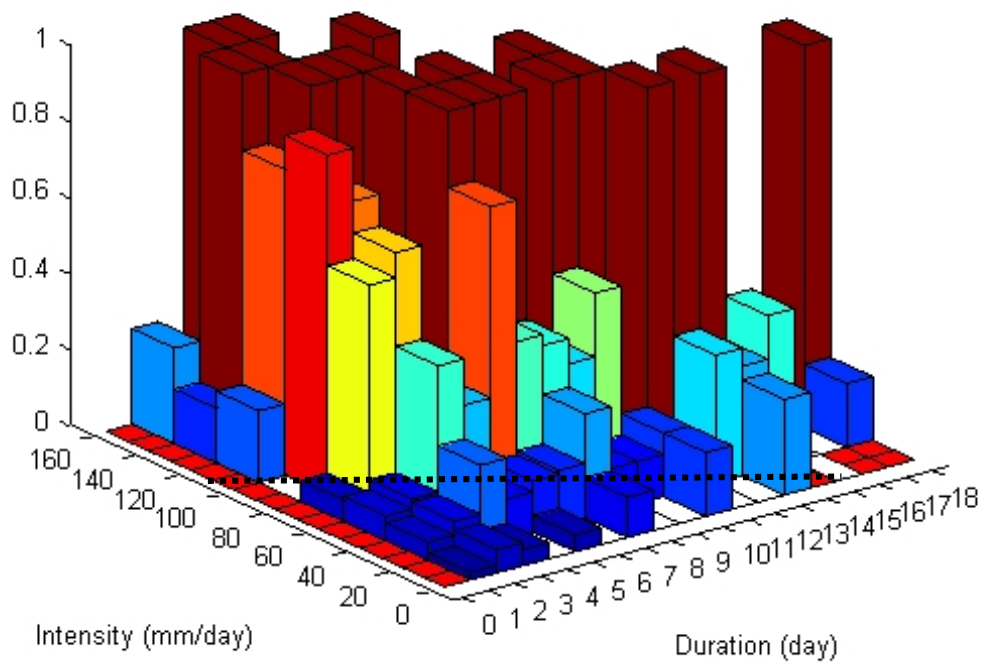


Fig. 35. Histograma final de cálculo de dos dimensiones, intensidad y duración. El eje vertical indica la probabilidad calculada para cada uno de los escenarios. La línea punteada indica el umbral por el cual aumenta la probabilidad de desencadenamiento de movimiento en la SNP, dicha línea fue diseñada visualmente. Los recuadros blancos indican la falta de datos para el cálculo de probabilidad y los recuadros rojos la nula probabilidad de que suceda un movimiento bajo dadas condiciones pluviales. Elaboración propia.

Finalmente, es posible apreciar las ventajas del método al permitir integrar la probabilidad condicional dentro del estudio, tomando en cuenta la incertidumbre de un escenario a futuro. La relativa facilidad del método es que permite incorporar las variables que el usuario necesita de acuerdo a su objetivo; no solo referentes a precipitación, por lo que sería interesante integrar por ejemplo el tipo de suelo como parte de un estudio más complejo.

3.6. Propuesta de un modelo de alerta a la población

Con los resultados de probabilidad se tiene que dar el siguiente paso que es alertar a la población; para esto, se propone una modificación al prototipo propuesto por Brunetti *et al.* (2009). Dicho paso es probablemente el más importante en la prevención del riesgo de desastre, para lo cual es necesario una serie de etapas.

- 1) Primero, de acuerdo a las estaciones más significativas de la región que son propuestas 15 al inicio del capítulo por la homogénea distribución y confiabilidad; se calculará la lluvia acumulada para las próximas 24, 48, 72 y 96 horas, a partir de que se emita la alerta de impacto de un ciclón tropical, sistemas convectivos entre otros, y en un mes con mayor probabilidad o en presencia de fenómeno La Niña.
- 2) De acuerdo a la intensidad que será obtenida en el paso anterior para cada periodo de tiempo se obtendrá la probabilidad condicional de $P(A|B,C)$. El resultado será clasificado en 4 tipos: 1) muy por debajo del umbral, 2) bajo el umbral, 3) en el umbral, 4) sobre el umbral 5) o muy por encima del umbral para la región de la SNP

Clase	Definición	Probabilidad
1	Muy por debajo del umbral	0-0.3
2	Bajo el umbral	0.03-0.25
3	En el umbral	0.25-0.40
4	Sobre el umbral	0.40-0.50
5	Muy por encima del umbral	0.50-1

Fig. 36. Propuesta de clasificación de umbrales. Elaboración propia.

- 3) Si se muestra una probabilidad muy por encima del umbral es conveniente preparar el boletín (Fig. 37) que pueda ser entregado a las autoridades correspondientes para que tomen las medidas necesarias. Identificando aquellos municipios que presenten mayor riesgo.

Este es el ejemplo de la utilización del cálculo de probabilidad aplicado directamente en la prevención del riesgo. Posteriormente el proceso puede ser realizado de manera automática para trabajar en tiempo real con la información proporcionada por Estaciones Meteorológicas Automatizadas, y con imágenes satelitales. Así mismo, puede ser diseñado el algoritmo que permita realizar el cálculo de la probabilidad de Bayes de manera sistemática.

Con la nueva información obtenida la propuesta de clasificación de umbrales puede ser modificada obteniendo valores que permitan un mayor acercamiento a la realidad; con la principal finalidad de utilizar el prototipo y prevenir futuras pérdidas materiales y sobre todo humanas.

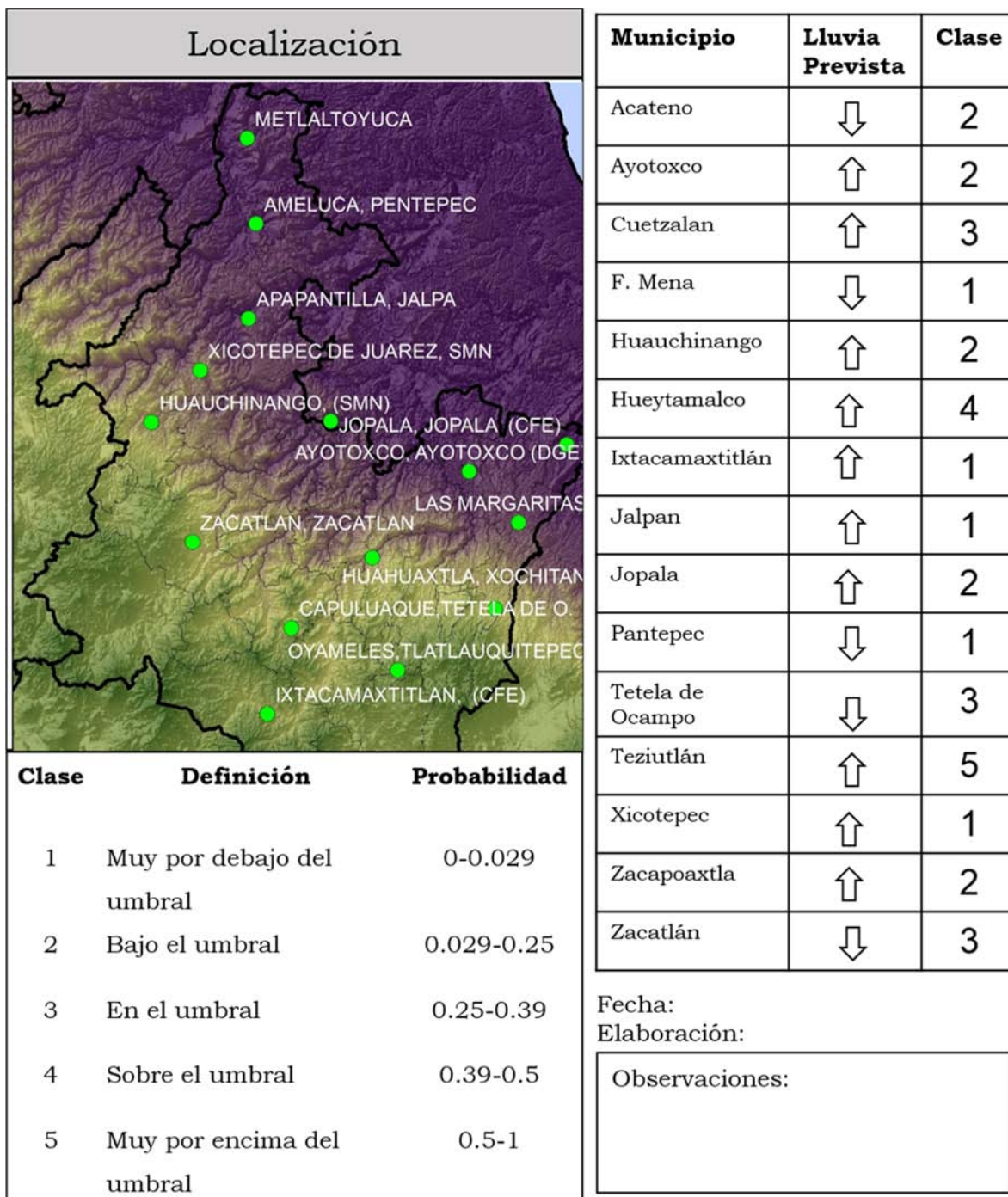


Fig. 37. Prototipo de alerta ante procesos de remoción en masa desencadenados por lluvias en la Sierra Norte de Puebla. Elaboración propia con base en Brunetti *et al.* (2009)

RESULTADOS

Para el periodo de 1989 al 2012 se obtuvo un registro de 163 procesos de remoción en masa tanto en la Sierra Norte como en la Sierra Nororiental. Dichos eventos fueron relacionados a causas pluviales, al suscitarse en verano principalmente en el mes de junio y octubre.

La precipitación de la región es causada tanto por ciclones tropicales, y lluvias orográficas inmersas en grandes Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM). Al respecto, las horas de mayor precipitación son desde las 15 hasta las 22 horas local; siendo las 16 y 17 horas local, más frecuente en la Sierra Nororiental y las 19 y 20 horas local para la Sierra Norte. Del total de eventos, 65.24% estuvieron relacionados directamente con la presencia de ciclones tropicales tanto en el Atlántico como el Pacífico, siendo las depresiones tropicales las más recurrentes para el desencadenamiento de PRM. De igual forma se identificó que el 69.3% de los eventos se suscitaron en años La Niña, 20.8% en años normales, y 9.8% durante años El Niño.

Para el análisis de los datos se eligieron 15 estaciones distribuidas homogéneamente en la región y que debido a la cercanía del PRM pudiera identificar las características de lluvia que desencadenaron el movimiento. Posteriormente se hizo un análisis de los eventos aislados graficando su duración y la precipitación acumulada desde días anteriores al evento, buscando que el aumento abrupto de lluvia coincidiera con el día en que se originó un movimiento, definido como umbral. Cada una de los eventos se agruparon en tres tipos, 67 fueron bien definidos, 46 inciertos y 35 indefinidos, lo que nos mostró que si es posible encontrar una relación entre intensidad y la aplicación del umbral. Aquellos que no fueron claramente definidos, esclarecen el papel de otras variables como tipo de suelo, vegetación, humedad del suelo, entre otros, en el desencadenamiento de procesos de remoción.

Utilizando el teorema de Bayes para el cálculo de una dimensión, se consideró la variable de intensidad de lluvia en tres clases, de 0 a 30 mm, de 30 a 60 mm y más de 60 mm con la finalidad de obtener $P(A/B)$ de cada una de las estaciones y elaborar la base agrupada final. Se obtuvo la probabilidad *a priori*, marginal y condicional, que para intensidades mayores de 60 mm es de 0.5; probabilidad muy por encima de 0.06 para eventos de lluvia de 30 a 60 mm y de 0.01 para eventos menores de 30 mm de lluvia. Es decir, indica la probabilidad de que se produzca un PRM bajo dichas condiciones de lluvia pero que a su vez deja de lado otra variable importante que es la duración, por lo que se aplicó el método a dos dimensiones.

De esta manera fue calculada la probabilidad condicional para nueve posibles escenarios, con duraciones de 1 a 10 días, de 10 a 20 días y más de 20, así como intensidades de 0 a 30 mm, de 30 a 60 mm y más de 60 mm. El resultado $P(A|B,C)$ indica que la mayor probabilidad de desencadenarse un movimiento de ladera es cuando se presentan lluvias por arriba de los 60 mm con duración de menos de 10 días, posteriormente 0.3 cuando se presentan intensidades de 30 a 60 mm pero con duraciones de más de 10 hasta 20 días; reportando una menor probabilidad cuando intensidades de menos de 30 mm se efectúan en un lapso de menos de 10 días. De acuerdo a la base de datos de PRM, ningún evento fue reportado con presencia de lluvia con duraciones de más de 20 días lo que aclara la relación con los eventos extremos que agudizan la precipitación tales como ciclones tropicales.

El último paso fue la elaboración de un prototipo modificado de Brunetti *et al.* (2009) en el cual se establecen cinco clases de umbrales que permiten utilizar la probabilidad condicional para predecir futuros movimiento de acuerdo a la precipitación de días posteriores.

DISCUSIÓN

Entre las ventajas que ofrece el método de Bayes están: la posibilidad de ser empleado en casi cualquier fenómeno natural en el cual esté implicado un riesgo; la versatilidad de incorporar en el estudio las variables necesarias que mejor se adecuen al entendimiento del fenómeno; la capacidad de elaborar umbrales adecuados a la escala requerida; la relativa facilidad del método y la integración del valor de la incertidumbre en el método. De igual forma, aunque el método ha sido utilizado en diversos países con alta confiabilidad en México no existen estudios que lo utilicen, lo que hace necesario su incorporación.

En este trabajo, el método permitió incluir las dos variables más importantes de la precipitación relacionadas con el desencadenamiento de procesos de remoción en masa como lo es la intensidad y duración de lluvia en la obtención de probabilidades *a priori*, marginales y principalmente condicionales, ya que en estas últimas el papel de la incertidumbre es crucial para elaborar mejores medidas de prevención de desastres.

En general, la principal limitante de los umbrales es la obtención de la información y la elección de variables a utilizar. Por ejemplo, los umbrales de tipo físico incorporan otras variables relevantes para el cálculo de probabilidad de movimiento haciendo mucho más completo el estudio como pendiente, tipo de suelo, humedad, entre otros. Sin embargo, son difíciles de construir por la cantidad de información que se necesita y que en ocasiones no existe. Así mismo, la escala puede verse como limitante ya que es más exacto construir un umbral local por cada municipio, o regional para la Sierra Norte y para la Sierra Nororiental, no obstante en México y sobre todo en Puebla, a pesar de tener un gran antecedente de desastres ocasionados por lluvias no se cuenta con suficientes estaciones meteorológicas, que además cuenten con datos confiables e información actualizada. Por tanto la mejor opción quizás es el uso de datos estimativos de precipitación de percepción remota como los radares meteorológicos y satelitales.

Entre las futuras acciones a desarrollar, está incluir dentro del estudio mayores rangos que integren la probabilidad condicional, es decir, en este estudio bidimensional se utilizaron nueve rangos de intensidad y duración de precipitación, pero podrían construirse un número mayor que exprese de mejor forma la probabilidad. A su vez, es necesario incorporar los trabajos hechos de diversos especialistas sobre pendientes, zonas de población, vegetación entre otros, realizando una evaluación multicriterio, que permita identificar además de la precipitación los factores desencadenantes de cada zona y que permita ser adaptado incluso a una tercera dimensión del método de Bayes. Por último sería necesario realizar un método de comprobación de dichos umbrales que permita modificar los parámetros si es necesario.

CONCLUSIÓN

Finalmente, la localización de la SNP entre tres provincias fisiográficas así como la cercanía al Océano Atlántico dotan características que aumentan el riesgo de PRM y debido a la población altamente vulnerable de sufrir un desastre. Algunos fenómenos hidrometeorológicos como la presencia de La Niña y ciclones tropicales modifican la precipitación de la región haciéndola mucho más intensa y duradera que en condiciones normales. La duración y la intensidad son las variables de precipitación que mejor relación tienen en el desencadenamiento de algún movimiento de ladera por lo que la obtención de umbrales de dichas variables es de gran relevancia; así mismo, el método de la inferencia Bayesiana nos permitió obtener probabilidades condicionales que se adaptan a los escenarios futuros y que permitirán ser aplicados en los Sistemas de Alerta Temprana de la región.

BIBLIOGRAFÍA

Alcántara, I., 2000. Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas*, **41**, México, 7-25.

Alcántara, I., 2004. Hazard assessment of rainfall-induced landslide in México. *Geomorphology*, **61**, México, 19-40.

Alcántara, I. y Murillo, F., 2008. Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. *Investigaciones geográficas*, **66**, México, 47-64.

Aleotti, P., 2004. A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, **73**, Italia, 247-265.

Aristizábal, E., Martínez, H. y Vélez, J., 2010. Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Revista académica Colombiana de Ciencias*, **34**, Colombia, 209-227.}

Instituto de Geografía, 2007. Grado de escolaridad en *Atlas Nacional de México*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Barry, R. y Chorley, R., 1999. *Atmósfera, tiempo y clima* (7ª Ed). Omega, Barcelona, 441 pp.

Berti, M., Martina, M., Franceschini, S., Pignone, S., Simoni, A., y Pizziolo, M., 2012. Probabilistic rainfall thresholds for landslide occurrence using a Bayesian approach. *Journal of Geophysical research*, **117**, Italia, 1-20.

Bloom, A., 1991. *Geomorphology, A systematic analysis of late Cenozoic landforms* (2ª Ed). Prentice Hall, USA, 532 pp.

Brunetti, M., Peruccacci, S., Rossi, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., Mondini, A., Salvati, P., Tonelli, G., Valigi, D. y Luciani, S., 2009. A

prototype system to forecast rainfall induced landslides in Italy. En: *1er seminario Italiano sobre deslizamientos*, Italia, 157-161.

Calderón, G., 1998. *Geografía de los Riesgos, Fundamentos económicos y sociales*. Tesis de Doctorado. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, 618 pp.

Cardoso, G., 2012. Relación entre la precipitación y los flujos de derrubios de la Sierra Norte de Puebla En: XXII Congreso Nacional de Hidráulica (Guerrero, 2012). AMH, México. Disponible en: <http://www.revistatlaloc.org.mx/>

Caine, N., 1980. The rainfall intensity: duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler*, physical geography, **62**, EE.UU., 23-27.

Cóndor, I., 1989. *Teoría de la Probabilidad y aplicaciones Estadísticas*. Editorial San Marcos. Disponible en: <https://books.google.com.pe/books?id=-ZNtJau4IplC>

Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, 2001. Cartografía elaborada con información de García, E. 1998. *Climas (Clasificación de Koopen, modificada por García)*, escala 1:1000000. CONABIO, México. Disponible en <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas, 2002. *Nahuas de la Sierra Norte de Puebla, pueblos indígenas del México contemporáneo*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, México. Disponible en www.cdi.gob.mx

Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas, 2006. *Regiones indígenas de México*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, México. Disponible en www.cdi.gob.mx.

Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, 2012. *Características sociodemográficas de México por municipio, 2010*, escala: 1:250000. CONABIO, México. Disponible en <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social, 2012. *Resultados de pobreza en México 2012 a nivel nacional y por entidades federativas*. CONEVAL, México. Disponible en www.coneval.gob.mx

Crozier, M. 1986. *Landslides, causes, consequences and environment*. Croom Helm, Inglaterra, 252 pp.

Cotton, W. y Anthes, R., 1989. *Storm and clouds dynamics*. Academic Press, Inc, EE.UU., 883 pp.

Cuanalo, O. y Melgarejo, G., 2002. Inestabilidad de laderas, Sierra Norte y Nororiental del Estado de Puebla. *Elementos: Ciencia y Cultura*, **9**, México, 51-55.

Cuanalo, O., Quezada, P., Aguilar, A., Olivan, A. y Barona, E., 2006. Sismos y lluvias, factores detonantes de deslizamientos de laderas en las regiones montañosas de Puebla. *E-Gnosis*, **4**, México, 1-14.

Dai, F. y Lee, C., 2000. Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. *Engineering Geology, China*, 253-266.

DesInventar. S.f. Sistema de Inventario de Efectos de Desastres. Software. Disponible en <http://online.desinventar.org>

Diario Oficial de la Federación., 1999. *Declaratoria de desastre 05/10/1999*. SEGOB. Disponible en www.dof.gob.mx

EIRD., 2004. *Vivir con el riesgo. Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres*. Secretaría Interinstitucional de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres. Naciones Unidas. Disponible en www.eird.org.

EM-DAT The International Disaster Database, 2014. *Lista de desastres por país* [en línea]. Disponible en www.emdata.be/staff.

Extractor Rápido de Información Climatológica. S.f. Base de datos nacional, software. CONAGUA.

Farfán, L. y Zehnder, J., 1994. Moving and stationary Mesoscale Convective Systems over northwest Mexico during the southwest area Monsoon project. *Wea*, **9**, EE. UU, 630-639.

Fell, R., Hungr, O., Leroueil y Riemer, W., 2000. Geotechnical engineering of the stability of natural slopes, and cuts and fills in soil. En: GeoEng, Conferencia internacional en geotécnicas e ingeniería geológica, Australia.

Gill, L. y Malamud, B., 2014. Review and visualizing the interactions of natural hazard. *Agu Journal*, **52**, Inglaterra, 680-722.

Gutiérrez, M. 2008. *Geomorfología*. Pearson-Prentice Hall, España, 898 pp.

Guzzetti, F., Peruccacci, S. y Rossi, M., 2007. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **98**, Italia, 1-48.

Highland, L. y Bobrowsky, P., 2008. *The landslide handbook-A guide to understanding landslides*. Geological Survey Circular, EE.UU., 129 pp.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010, *Censo de Población y vivienda 2010*. Disponible en www.inegi.com

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Forestales, S.f. *Red de estaciones meteorológicas*. INIFAP. Disponible en <http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/>

Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, S.f. *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México*. INAFED. Disponible en: <http://www.inafed.gob.mx>

International Strategy for Disaster Reduction, 2004. *Living with Risk. A global review of disaster reduction initiatives*, vol. II. ONU, EE.UU.

Jibson, R. 1989. Debris flows in southern Puerto Rico. *Geological Society of America*, special paper **236**, EE.UU, 29-55.

La Jornada. [Periódico en línea]. Disponible en www.lajornada.unam.mx

La Jornada Guerrero. [Periódico en línea]. Disponible en www.lajornadaguerrero.com.mx

Lin, Y., 2008. *Mesoscale dynamics*. Cambridge University, EE.UU., 630 pp.

Lugo, J., Zamorano, J., Capra, L., Inhbar, M. y Alcántara, I., 2005. Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: Causa y efectos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **22**, México, 212-218.

Magaña, V., 2004. El cambio climático global. Comprender el problema: p. 19-27. En Martínez, J. Fernández, A. compiladores. *Cambio climático. Una visión desde México*. SEMARNAT, México.

Magaña, V. (Editor), 2004. *Los impactos del niño en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM, México, 229pp. Disponible en http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/libros/el_nino/

Magaña, V., Pérez, J. y Conde C., 1998. El fenómeno de El Niño y la oscilación del sur, sus impactos en México. *Ciencias*, **51**, México, 14-18.

Magaña, V., Méndez, J., Morales, R., Millán, C., 2004. Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México: p. 203-213. En Martínez, J., Fernández, A. compiladores. *Cambio climático. Una visión desde México*. SEMARNAT. México. 525 pp.

Maskrey, A. (Comp), 1993. *Los desastres no son naturales*. Red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina. Disponible en www.desenredando.org

Medina, Z. y Cepeda, J., 2011. Clasificación Probabilística de umbrales de lluvia para predecir deslizamientos de tierra. *76 Rev. Int. De Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, **12**, 1-8.

Méndez, R., 2009. Efecto de Fenómeno El Niño y de la Oscilación del Atlántico Norte en las Temporadas Ciclónicas del Océano Atlántico. *Revista Umbral*, **1**, Puerto Rico, 233-237.

National Oceanic and Atmospheric Administration, 2015. *Cold and warm episodes by season*. NOAA. Disponible en www.cpc.ncep.noaa.gov

Pedraza, J., 1996. *Geomorfología: Principios, Métodos y Aplicaciones*. Editorial Rueda, España, 414 pp.

Ray, P. (Editor), 1986. *Mesoscale Meteorology and Forecasting*. American Meteorological Society, EE.UU., 793 pp.

Red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina, S.f. Inventario de desastres, software. LA RED. Disponible en www.desinventar.org

Riebeek, H., 2010. *Landslide in Zhouqu, China*. NASA. Disponible en: <http://earthobservatory.nasa.gov/>

Rogers, R., 1977. *Física de las nubes*. Editorial Reverté, España, 248pp.

Sánchez, D., 2011. Precipitaciones extremas y sus implicaciones en procesos de remoción en masa en la planificación urbana de Tampico, México. *Cuadernos Geográficos*, **48**, México, 135-159.

Schuster, R., 1996. The 25 most catastrophic landslides of the 20th century, en Chacon, I. y Fernandez (eds.), *Landslides, proceedings of the 8th International Conference & Field Trip on Landslides*. USGS, España. Disponible en www.landslides.usgs.gov/learn/majorls.php

Servicio Meteorológico Nacional. S.f. *Información histórica de huracanes*. Comisión Nacional del Agua. Disponible en www.sm.cna.gob.mx

Segoni, S., Rosi, A., Rossi, G., Catani, F. y Casagli, N., 2014. Analysing the relationship between rainfalls and landslides to define a mosaic of triggering thresholds for regional-scale warning systems. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, **14**, Italia, 2637-2648.

Valdés A., Cortés, M. y Pastrana, J., 2005. Un estudio explorativo de los Sistemas Convectivos de Mesoescala de México. *Investigaciones Geográficas*, **56**, México, 26-42.

Velázquez, E. 1995. *Cuando los arrieros perdieron sus caminos*. Colegio de Michoacán, México, 196 pp.

Vidal, R. y García, E., 1990. *Precipitación media anual, IV. 4.6*. Atlas Nacional de México, vol. II. UNAM, México.

White, I., Mottershead, D. y Harrison, S., 1998. *Environmental Systems*, (2ª ed.) Chapman & Hall, Inglaterra.

Wieczorek, G. y Guzzetti, F., 1999. A review of rainfall thresholds for triggering landslides. *Editoriale Bios*, Italia, 407-414.

Yacat, N y Dolan, S., 2006. *Socorro para los sobrevivientes de los deslizamientos de tierra*. UNICEF. Disponible en www.unicef.org.

ANEXO

1) Principales horas de precipitación

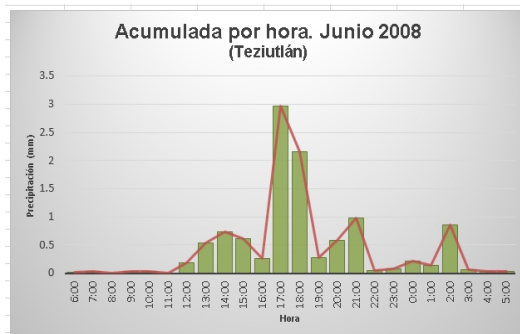
Teziutlán

Mayo



Huauchinango

Junio



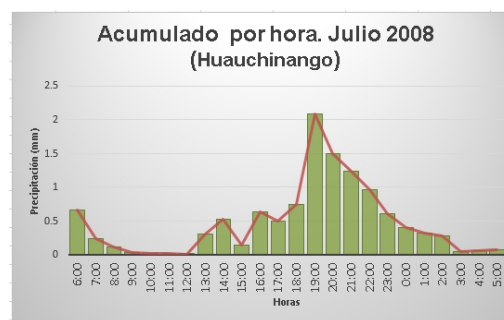
Junio



Julio



Julio



Agosto



Agosto



Septiembre



Septiembre



Octubre



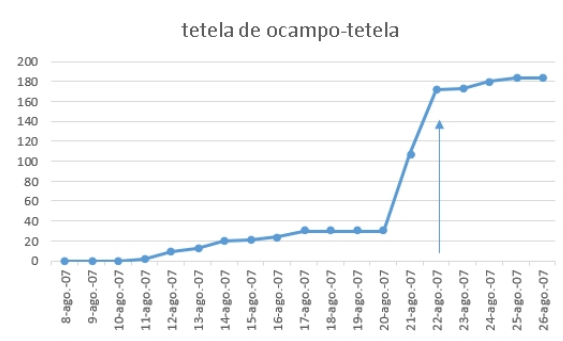
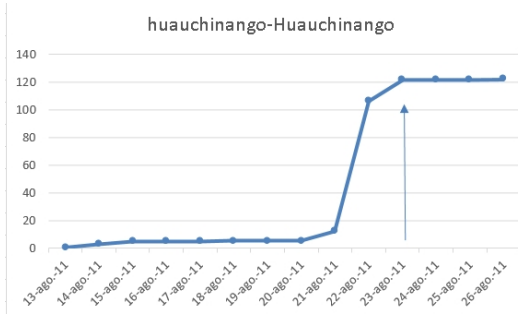
Octubre



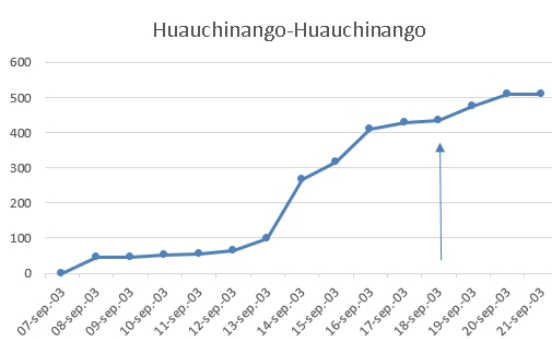
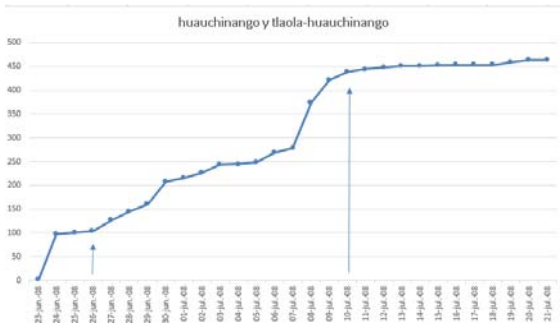
Acumulado de precipitación por hora en verano, para dos estaciones meteorológicas. Huauchinango en la Sierra Norte de Puebla y Teziutlán para la Sierra Nororiental. Año elegido para el análisis 2008. Información obtenida de Estaciones Meteorológicas Automáticas 21090 y 21089 respectivamente. (INIFAP).

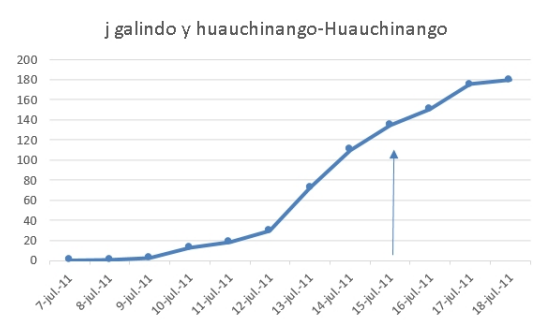
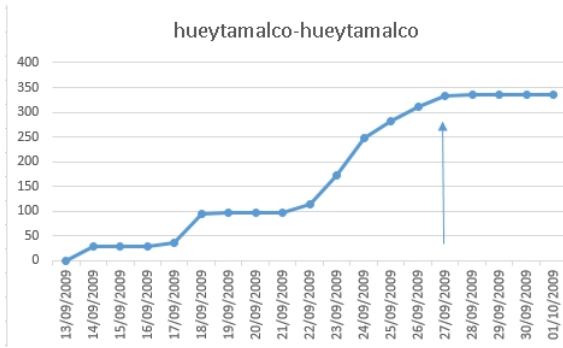
2) Eventos Bien definidos, inciertos e indefinidos.

Bien Definidos

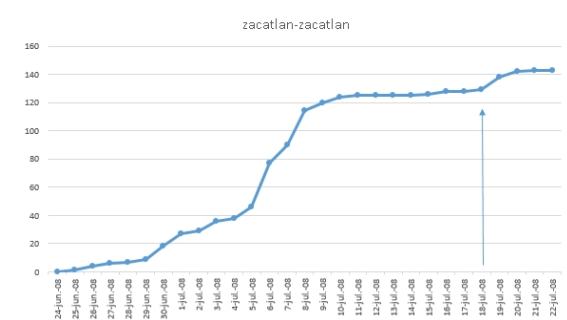
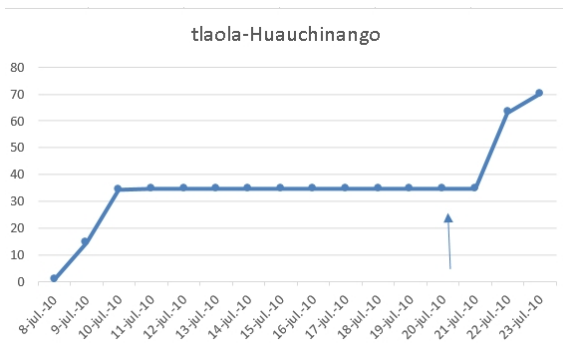


Inciertos



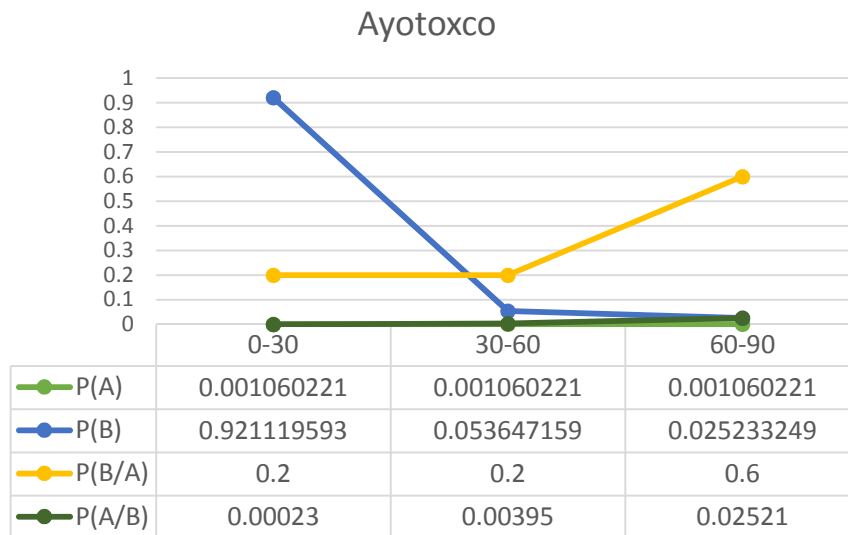
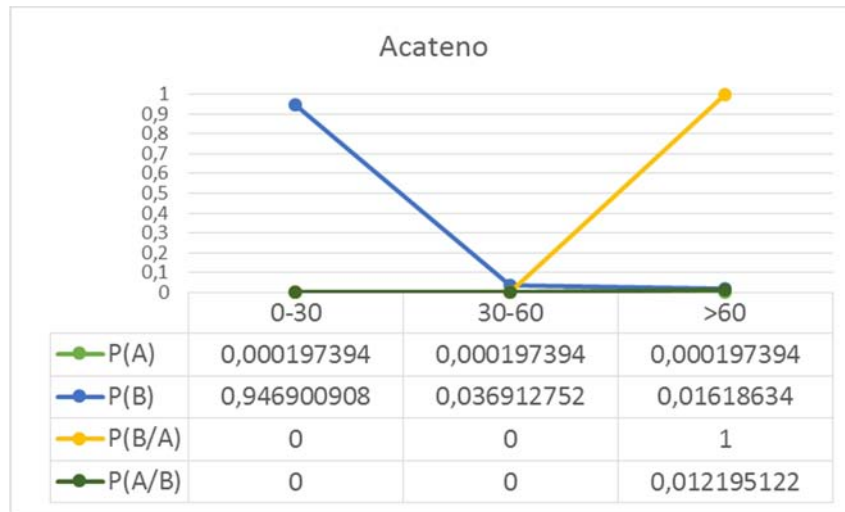


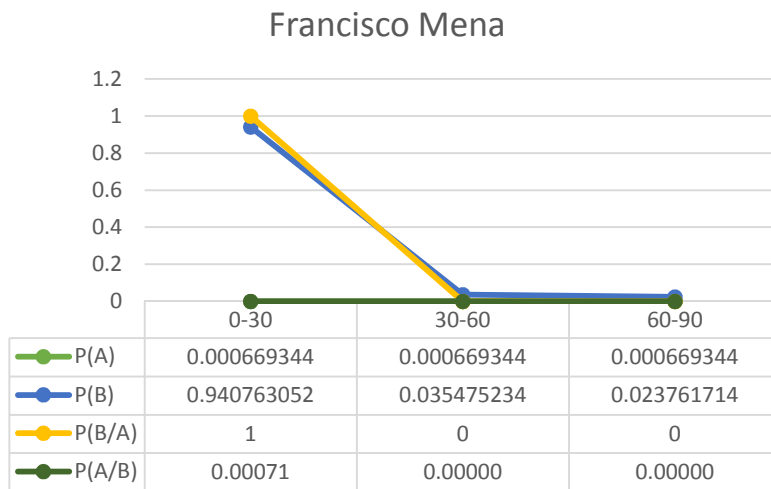
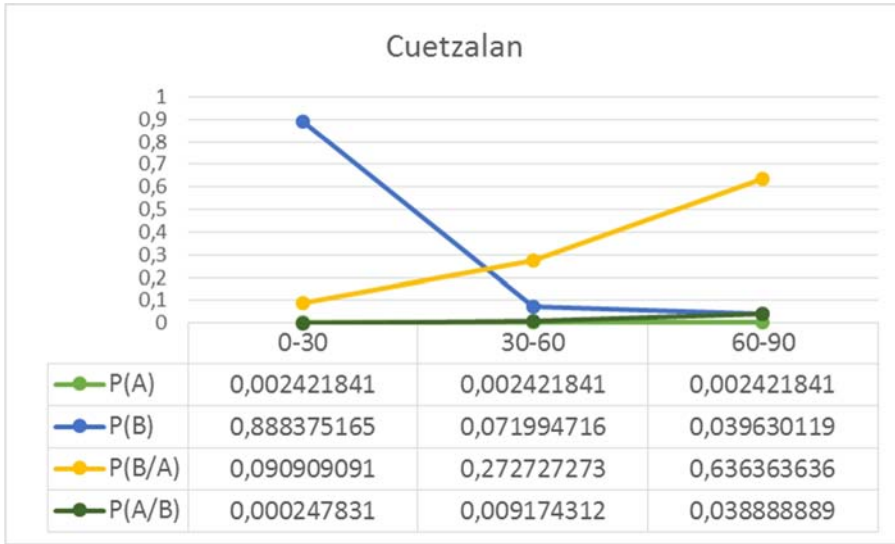
Indefinidos



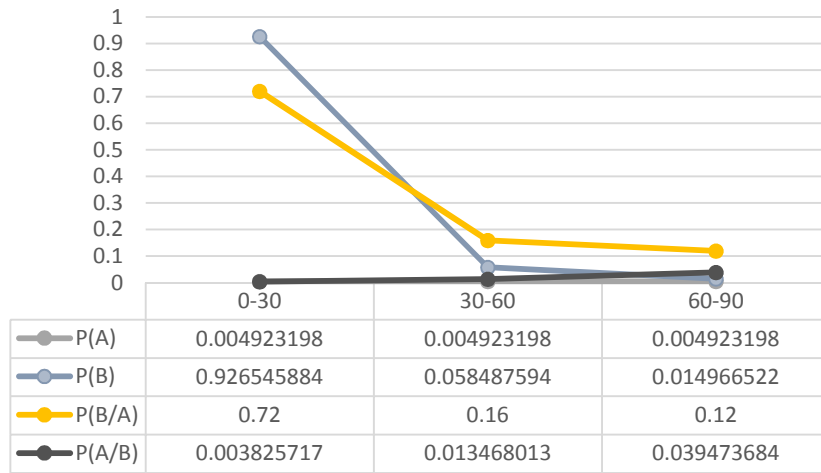
Ejemplos de eventos bien definidos, inciertos e indefinidos. Precipitación diaria acumulada por cada estación meteorológica; la flecha azul indica el día en que se reportó un proceso de remoción en masa.

3) Cálculo de una dimensión

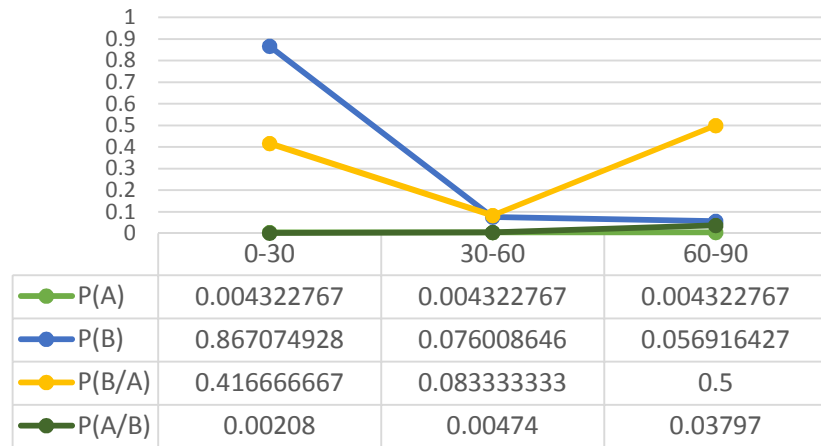




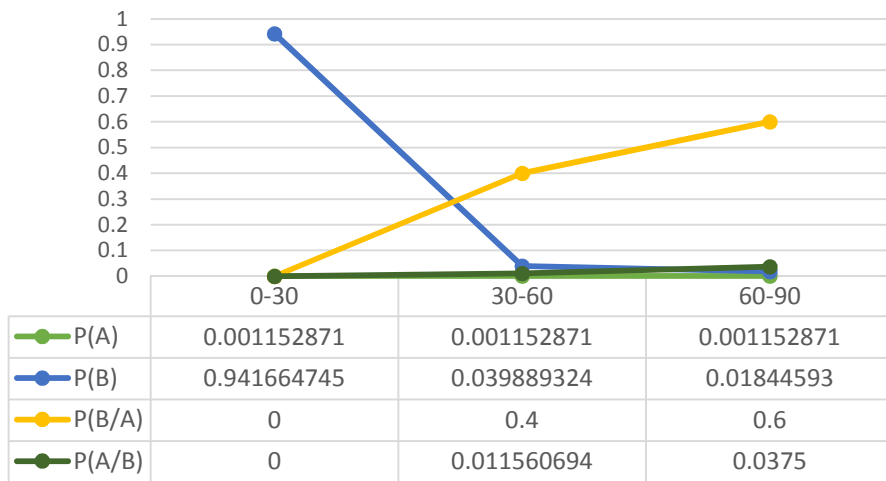
Huauchinango



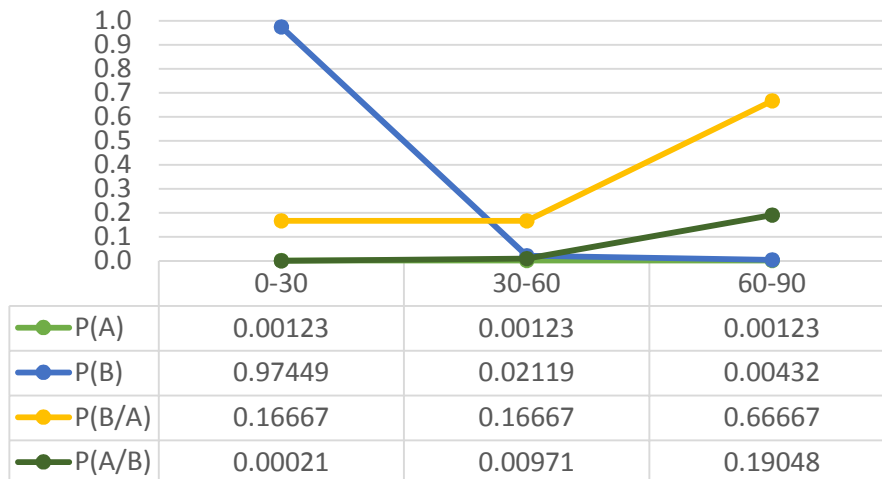
Jopala



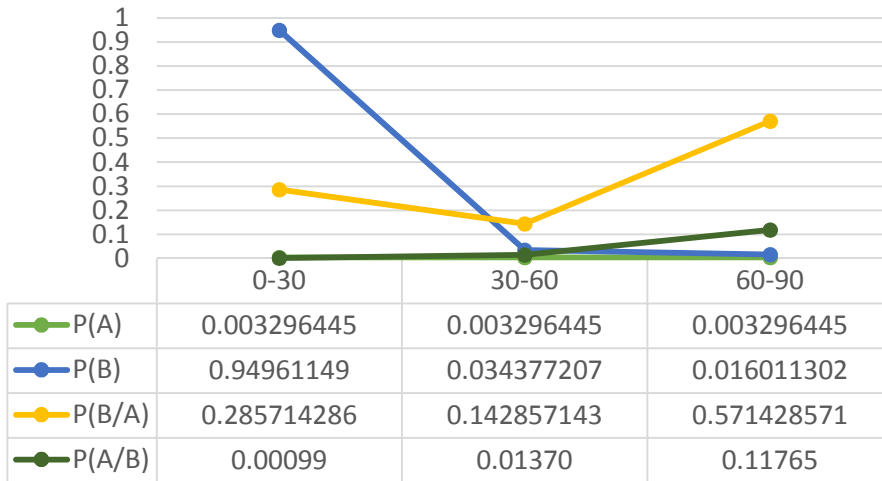
Pantepec



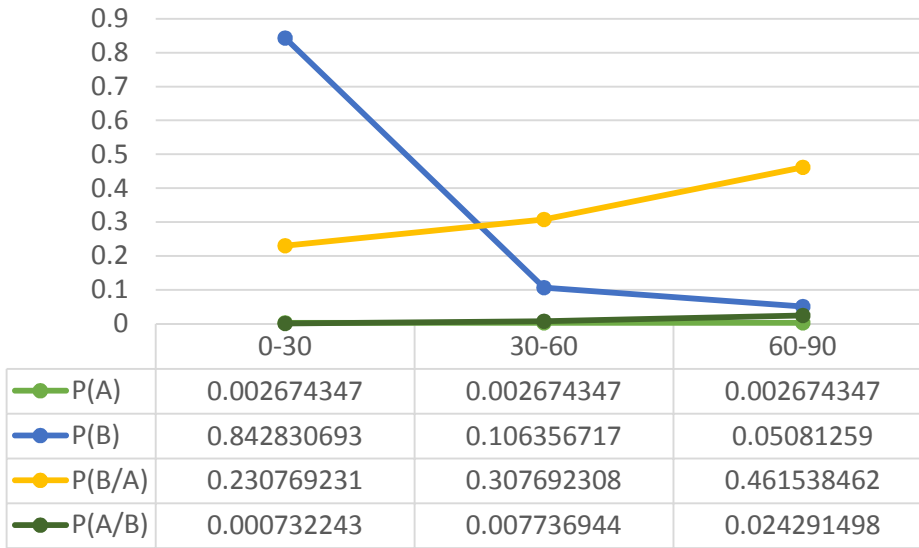
Tetela de Ocampo



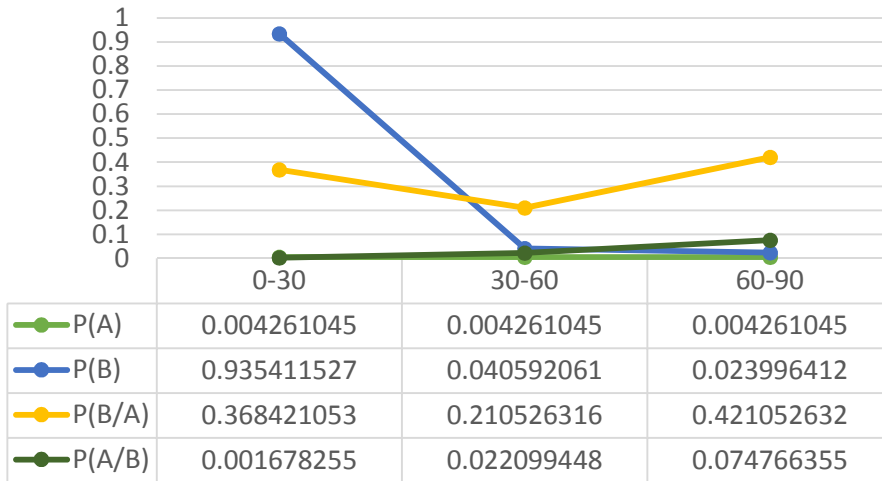
Teziutlán



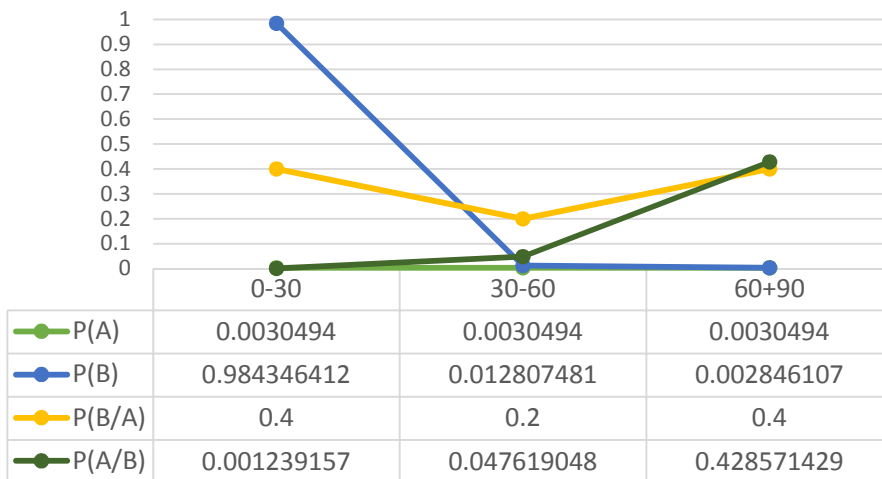
Xicotepec

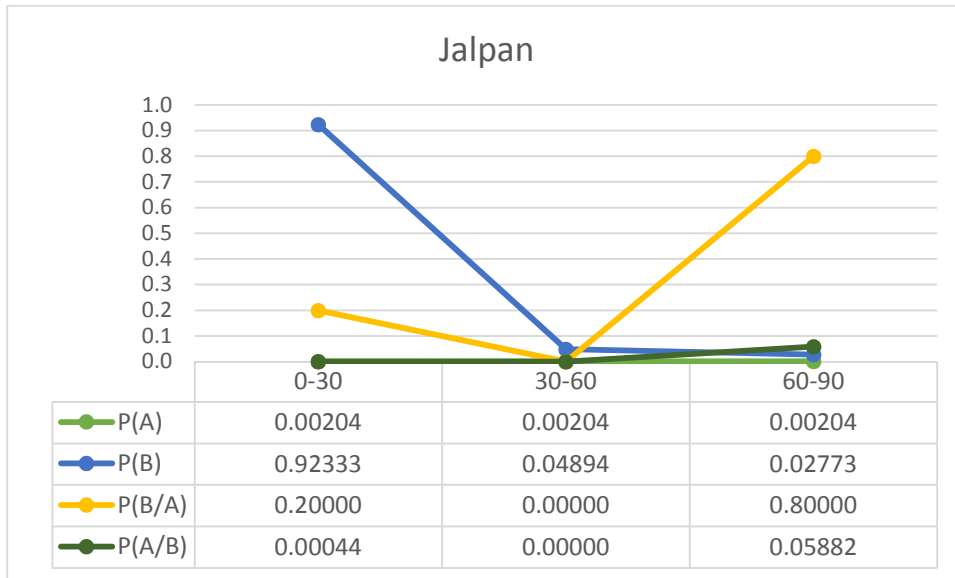


Zacapoaxtla



Zacatlán





Cálculo de una dimensión para estaciones meteorológicas elegidas representativas en cada municipio. Los resultados fueron obtenidos para tres rangos de precipitación cada 30 mm. La línea verde oscura indica la probabilidad de que un proceso de remoción en masa suceda cuando precipite en cada uno de los rangos de intensidad establecidos P (A/B).

4) Dos dimensiones

Cuetzalan									
	0-30 mm 0 a 10 días	30- 60mm 0 a 10días	>60mm 0 a 10días	0-30 mm 10 a 20días	30- 60mm 10 a 20días	>60mm 10 a 20días	0-30 mm 20-30 días	30- 60mm 20-30 días	>60mm 20-30 días
P(A)	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063
P(B,C)	0,700	0,152	0,071	0,044	0,017	0	0,002	0	0
P(B,C A)	0,237	0,263	0,391	0,032	0,006	0	0	0	0
P(A B,C)	0,021	0,109	0,351	0,046	0,024	0	0	0	0

Zacatlán									
	0-30 mm 0 a 10 días	30- 60mm 0 a 10días	>60mm 0 a 10días	0-30 mm 10 a 20días	30- 60mm 10 a 20días	>60mm 10 a 20días	0-30 mm 20-30 días	30- 60mm 20-30 días	>60mm 20-30 días
P(A)	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072		0,072	0,072	0,072
P(B,C)	0,894	0,037	0,031	0,038	0,000		0,001	0	0
P(B,C A)	0,237	0,263	0,391	0,013	0,006		0	0	0
P(A B,C)	0,019	0,513	0,910	0,024	1,000	0	0	0	0

Xicotepec									
	0-30 mm 0 a 10 días	30- 60mm 0 a 10días	>60mm 0 a 10días	0-30 mm 10 a 20días	30- 60mm 10 a 20días	>60mm 10 a 20días	0-30 mm 20-30 días	30- 60mm 20-30 días	>60mm 20-30 días
P(A)	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051			
P(B,C)	0,635	0,177	0,067	0,080	0,021	0			
P(B,C A)	0,237	0,263	0,391	0,032	0,006	0			
P(A B,C)	0,019	0,076	0,299	0,020	0,016	0	0	0	0

Cálculo bidimensional para 3 estaciones con datos más representativos. $P(A|B,C)$ indica la probabilidad de que suceda un proceso de remoción en masa cuando las características de precipitación y duración en cada uno de los rangos establecidos se presenta.

