

E-Atlas para los riesgos de desastres, aplicación a México:

Metodologías y procesos de implementación



E-Atlas para los riesgos de desastres, aplicación a México:

Metodologías y procesos de implementación:

Janine M. Ramsey

José Francisco Pinto Castillo

Zine El Abidine El Morjani

Steeve Ebener

Robert Colombo Llimona

México, DF, 2013

Códice Roseta, S.A. de C.V

E-Atlas para los riesgos de desastres, aplicación a México: Metodologías y procesos de implementación.

Primera edición, 2013

Copyright © 2013

Publicado por Códice Roseta, S.A. de C.V. Oeste 12, San Luis Tlatilco Naucalpan de Juárez -53630. Estado de México.

Todos los derechos reservados

D.R. © Janine M. Ramsey, PhD. Centro Regional de Investigación en Salud Pública. Instituto Nacional de Salud Pública. 19 Poniente y 4ta Norte, Tapachula, Chiapas, México CP. 30700. E-mail: jramsey@insp.mx; janineramseyw@gmail.com

D.R. © José Francisco Pinto Castillo, MA. Centro Regional de Investigación en Salud Pública. Instituto Nacional de Salud Pública. 19 Poniente y 4ta Norte, Tapachula, Chiapas, México CP. 30700. E-mail: jpacopc@hotmail.com

D.R. © Zine El Abidine El Morjani, PhD. Taroudant poly-disciplinary faculty. Ibn Zohr University BP 271 83000 Taroudant, Morocco. Email: elmorjaniz@gmail.com

D.R. © Steve Ebener, PhD. Gaia GeoSystems. P.O. Box 795 – P.C. 114. Muscat – Oman. E-mail: steve.ebener@gaia-geosystems.org

D.R. © Robert Colombo Llimona, M en SIG. Vulnerability and Risk Analysis & Mapping (VRAM). Emergency and Humanitarian Action. WHO Regional Office for the Eastern Mediterranean Cairo – Egypt. E-mail: eha@emro.who.int

Impreso y hecho en México

ISBN: 978-607-00-6824-9

Prefacio

En la actualidad, cuatro peligros naturales (terremotos, ciclones tropicales, inundaciones y sequías) son responsables del 94% de la mortalidad por desastres naturales a nivel mundial. Estos son responsables de 3.3 millones de fallecidos de 1970 hasta 2010, lo que representa un promedio de 82,500 por año, a pesar de la variación inter-anual y la falta de tendencias temporales claras. Las sequías cobran la mayor proporción de esta mortalidad y los países en vías de o sub-desarrollados sufren la mayor carga, con aproximadamente 1 millón de muertes tan solo en África por sequías. El 85% de las poblaciones expuestas a estos peligros, viven en países con un desarrollo humano bajo o mediano.

La región de América Latina y el Caribe ha sido devastada a causa de las inundaciones, deslizamientos de tierra, tormentas tropicales, huracanes, sequías, terremotos y erupciones volcánicas, dejando como saldo más de 45,000 muertos, 40 millones de damnificados y daños que superan los 32,000 millones de dólares, en los últimos diez años. En México, los cambios climáticos y sobre todo la variabilidad climática en las últimas décadas han provocado una alta vulnerabilidad y un impacto consecuente en 1998, 2003, 2005, 2007, 2008, 2010, y 2012. Los peligros naturales imponen cambios en todos los componentes abióticos de un ecosistema y en consecuencia a ello, afectan los procesos de selección biótica, a nivel de tolerancias, dispersión y las interacciones inter-específicas. La alteración de comunidades de flora y fauna es resiliente según el grado de fragmentación (natural o antrópico), el tiempo y la conectividad con paisajes conservados. Los desequilibrios en las comunidades de flora y fauna, afectan tanto la contaminación como la exposición de especies silvestres con patógenos seleccionados por las actividades antrópicas, y al revés, del humano con patógenos que oportunamente usan nuevos hospederos para su sobrevivencia.

Los peligros naturales no son eventos simples, sino son fenómenos complejos de componentes naturales (p.ej. precipitación excesiva que provocan inundaciones), y que pueden ser alterados por factores naturales (anomalía climática) o fenómenos antrópicos adicionales (deforestación, cambio en uso de suelo, desarrollo urbano, etc.). El conocimiento sobre los determinantes y componentes secundarios de un peligro permite desarrollar modelos para definir, medir y comparar entre áreas y períodos de tiempo, así como las necesidades de aplicación de la información (diseño de estrategias de mitigación y adaptación). Sin embargo, el desarrollo de modelos predictivos requiere acceso a datos precisos, sensibles, y series de tiempo de siete años como mínimo, lo que no siempre se encuentra registrado o disponible en diversas bases de datos. Aún cuando se define el registro y almacenamiento de datos como una inversión prioritaria, la aplicación de modelos mediante sistemas de información geográfica requiere una política clara para su uso en las estrategias de planeación, prevención, mitigación o adaptación. Sobre todo, el público necesita comprometerse a participar y monitorear el proceso de evaluación de peligros mediante los modelos, para asegurar la toma de decisión estratégica informada y socialmente aceptable, ya que el público es a la vez el blanco y el beneficiario de un sistema adecuado de medición y de evaluación. El manejo de peligros en el marco del desarrollo social se refiere a la medición de los efectos potencialmente dañinos de todos los eventos naturales peligrosos, lleguen o no a ser considerados como un “desastre”, y el análisis de estos peligros para una evaluación del riesgo. Solo con una sistematización de los procesos de medición y análisis se pueden construir y planear la prevención, la mitigación y la adaptación del impacto de estos riesgos.

A pesar de la calificación de "naturales", todos los peligros tienen ciertos elementos de participación o contribución humana directamente o indirectamente, debido a modificaciones de espacios naturales o de comunidades bióticas originales. Para estos efectos, es preciso distinguir entre tres conceptos: evento físico, el cual es un fenómeno natural que, de hecho, no afecta a los seres humanos porque sus efectos no entran en contacto con ellos y no es considerado como peligro natural. Un peligro natural es un fenómeno natural, que ocurre en un área poblada o áreas con infraestructura que pueden ser dañadas. Y por último, un desastre natural, es un peligro natural que causa un número inaceptable de muertes o daños a propiedades. En áreas donde no existen intereses humanos a vulnerar, los fenómenos naturales no constituyen un peligro ni causan desastres, excepto en el marco de un enfoque ecosistémico, donde lo antropocéntrico no es el único enfoque de peligro o vulnerabilidad, y existe la consideración de peligros y de la vulnerabilidad ecológica. Indirectamente, todo riesgo o desastre al ecosistema afecta a la población humana, y a la salud ambiental.

Un desastre es un concepto aplicado a eventos que producen efectos negativos extremos, no-esperados o no-deseados, especialmente desde la perspectiva antropocéntrica. Los desastres ocurren en áreas que podemos definir por la presencia, la frecuencia o la intensidad de un peligro. Los desastres provocan un impacto negativo sobre el ecosistema, lo que afecta directamente o indirectamente a la población humana y a la biodiversidad. Independientemente del grado del peligro, si la vulnerabilidad de la población es alta, en cualquier de sus componentes (por tamaño de población, condiciones sanitarias, daño económico, ausencia de rutas o modos de comunicación, etc.), el fenómeno será designado como un desastre. Existen diversas formas de clasificar los desastres, por su origen, por la magnitud de la amenaza o por la forma de su inicio. Por consideración general, la forma de inicio de alguna manera también determina la prontitud sobre la cual debe implementarse una evaluación rápida y las acciones de respuesta de forma inmediata. Quizás el más representativo en este tipo de clasificación y por el nivel de impacto en la población es un sismo.

Los desastres naturales afectan el desarrollo social de una forma importante, ya que generalmente existe una asociación directa entre vulnerabilidad y el grado de impacto. La población que menos tiene medidas de protección, capacidad de respuesta, o resiliencia, tendrá mayor afectación por el peligro, lo que se traduce en un mayor desastre. Los países que enfrentan patrones similares de peligros naturales, desde inundaciones hasta sequías, sufren impactos distintos por el desastre, ya que el impacto depende en parte sobre las decisiones del modelo de desarrollo en cada país. Conforme los países aumentan su nivel de vida, tienen mayor recurso para inversión en vivienda o medidas refractarias a un sismo. Sin embargo, a veces el impulso para el desarrollo provoca el crecimiento no planeado de asentamientos humanos, lo que puede traducirse en mayor mortalidad.

Existe una literatura e información creciente sobre el tema de peligros, cuyo lenguaje y uso mediante la traducción de términos, provoca problemas lingüísticos y semánticos en este tema. Es preciso entonces definir lo que se refiere a un peligro (a veces designado como amenaza) y cómo este difiere de "riesgo". Especialmente en el marco de la clasificación o percepción de desastres, es importante entender el componente de vulnerabilidad que marca la capacidad de respuesta, de mitigación o de adaptación frente a algún peligro. Para fines de este documento, usamos la definición de peligro como la expresión de un área física expuesta a un fenómeno, como previamente mencionado. El riesgo es una medida de probabilidad

de impacto potencial por un peligro, dada una vulnerabilidad de la población o de un ecosistema. Desde la perspectiva humana, si no hay población viviendo en una región donde existe alto peligro, no hay riesgo inmediato por algún fenómeno. Sin embargo, esta visión excluye el impacto espacial más amplio o en un periodo de tiempo que puede desencadenar en un desequilibrio físico a largo plazo. Al igual, si la población expuesta a un peligro reduce su vulnerabilidad mediante estrategias de prevención o de adaptación, el riesgo que resulta de un peligro puede resultar mínimo.

A pesar de la dificultad para predecir la ocurrencia de la mayoría de los peligros naturales, y a la vez de modelar la vulnerabilidad humana y ecológica. El contar con la capacidad de modelar riesgo para una zona y una población humana, permitiría reforzar la planeación de protección civil contra diversos desastres. Los modelos precisos y con fundamento en evidencia permiten abogar para inversión en planes de contingencia, el desarrollo de capacidad de respuesta, y la identificación, planeación y priorización de actividades de mitigación de acuerdo a las características del área. La toma de decisión para la reducción de riesgo de desastres, fundamentada en evidencias, permite de forma socialmente aceptable, dar acceso equitativo a todos los sectores de la población y atender rezagos actuales en servicios e infraestructura. Los mapas que resultan de los modelos de peligros ofrecen información para el tomador de decisión, para respaldar la inversión en la capacidad de respuesta, y que éste fuera geográficamente explícita y ajeno a sesgos políticos.

En el entendimiento que la evaluación y la planeación de una respuesta a los fenómenos requieren conocimiento preciso sobre la ubicación en espacio y tiempo de ellos, la Organización Mundial de la Salud emprendió primero en los países del Medio Oriente un esfuerzo de desarrollo de modelos de peligro y una reflexión sobre los componentes de la vulnerabilidad (incluyendo explícito para la salud pública), para la creación de un Atlas de riesgo para desastres. Un grupo de académicos desarrollaron modelos para analizar la distribución espacial de cinco peligros naturales que tienen un impacto directo en la salud poblacional (inundación, deslizamientos, olas de calor, viento extremo, eventos sísmicos). Los modelos originales para estos peligros han sido mejorados, adaptados a las tendencias abióticas pertinentes al continente americano, y por último ajustados para un manejo actual mediante sistemas de aplicaciones espaciales nuevos.

La tarea de modelar y evaluar el peligro de desastres naturales es compleja e incluye una amplia gama de procesos computacionales que a su vez requiere mucha información temática espacial y temporal de diferentes fuentes. La geografía y los sistemas de información geográfica ofrecen la plataforma idónea para integrar diferentes tipos de datos, realizar un análisis mediante modelos, y eventualmente, aplicar los métodos en diferentes regiones y continentes. Estudios previos sobre la distribución de peligros naturales fueron desarrollados por el proyecto de “Natural Disaster Hotspots (NDH)” del Banco Mundial y mediante el desarrollo de índices de riesgo para desastres (Disaster Risk Index, DRI) por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y la UNEP-GRID. Debido a que la Plataforma para Acción de Hyogo (HFA) identificó la medición de riesgo como una de cinco prioridades de acción, la Organización Mundial de la Salud desarrolló un primer volumen del Atlas para motivar los Ministros de Salud (en 21 países del Medio Oriente) y otros usuarios sanitarios a mejorar su capacidad para el manejo de desastres. La expectativa de las organizaciones internacionales ha sido que el Atlas sea usado para sustentar mayor inversión en la protección civil y sanitaria, y esta sea fuente para generar mejores

evidencias en apoyo a la planeación de la capacidad de respuesta, para la planeación de la mitigación, evitar daños, y la evaluación de daños por desastres.

Para cumplir con las necesidades y restricciones de información, se desarrollaron nuevos modelos de peligros en el marco del Atlas que usan bases de datos disponibles en dominio público y para generar mapas de la distribución espacial de intensidad a escala de países y/o regiones. Esta nueva competencia de resolución fina fue posible debido al uso de periodos diferentes de parámetros climáticos, lo que permite evaluar eventos durante periodos más largos, la novedad de una resolución de 1 km, y una amplia lista de parámetros que permiten el mapeo de distribución para cada peligro con un nivel de confianza alta. La adaptación de los modelos de peligros del Medio Oriente a la República Mexicana incluye la utilización de mejores capas de información: mientras que algunas capas para algunas zonas originales del VRAM fueron 1:5000 000 y una resolución de 1 km, los datos que se utilizaron en los modelos ahora aplicados a México están en escalas de 1:1, 000,000 y 1:250, 000, y una resolución de 1 kilómetro y de 90m para las capas de raster. Una modificación adicional ha sido el traslado de procedimientos al ArcGIS 9.x.

El uso de los mapas y la información del Atlas para una toma de decisión fundamentada impone una evaluación clara de las limitaciones de la metodología. La calidad de los datos usados en los modelos es el primer tema para considerar, ya que en ciertas regiones pueden ser incompletos, o ser ausentes para zonas costeras o islas. Estos problemas pueden afectar ciertas capas de información, y para diferentes periodos, así como para ciertos modelos sin afectar a todos. La resolución de datos disponibles afecta en menor grado los modelos de olas de calor, y a mayor grado los de inundaciones, viento extremo y deslizamientos, por el cual se recomienda cautela para interpretaciones a niveles locales o de micro-variaciones.

Este manual ha sido preparado como un documento de referencia para quienes trabajan en el campo del análisis de información geográfica y de modelos para definir áreas de peligro para desastres naturales. Es una guía de identificación de información y bases de datos, la fusión de ellos, y la aplicación de procedimientos de cálculo y análisis, para desarrollar cartografía. Debido a la poca disponibilidad de información uniforme en espacio y en series de tiempo, la resolución espacial es de 1 km o 90m según la interpolación de algunas capas de datos. La información aquí presentada está específicamente orientada a estudios de planificación regional, en áreas de algunos cientos o de cientos de miles de kilómetros cuadrados, y complementa otra información para la planificación que típicamente es obtenida y analizada durante el curso de un estudio. Los métodos han sido seleccionados por su utilidad en el proceso de planificación regional. El Manual está dividido en siete partes, la primera siendo una introducción general de la metodología de análisis, y cada capítulo adicional el modelo para un fenómeno hidro-meteorológico, geológico o sísmico, respectivamente. El último capítulo presenta la aplicación de los modelos a nivel del estado de Oaxaca. Cada capítulo contiene los procedimientos de modelaje para cada peligro. El texto está acompañado por un CD en el cual se encuentra una versión electrónica del libro, además de los anexos electrónicos correspondientes y complementarios para realizar los análisis de peligros. Además, incluye un extenso conjunto de referencias, en los diversos capítulos que permite leer sobre la metodología e información previamente generada que validan los modelos.

Reconocimientos

La adaptación y la aplicación de los modelos de peligros naturales desarrollados por El Morjani y colegas (*International Journal of Health Geographics* 2007, 6:8 doi:10.1186/1476-072X-6-8) a México, ha sido apoyado en gran parte por la Organización Mundial de la Salud, en el marco de una colaboración con el Centro Regional de Investigación en Salud Pública del Instituto Nacional de Salud Pública (CRISP/INSP) de México, Tapachula, Chiapas, y la Facultad Polidisciplinaria Taroundant de la Universidad Ibn Zohr de Agadir, Marruecos. Asimismo, los Fondos Mixtos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACyT) y el Estado de Chiapas apoyaron al grupo de ARIES (Análisis de Riesgos Espaciales en Salud) del CRISP/INSP (proyecto # C05-22088) para continuar con los análisis, y los fondos sectoriales de SEMARNAT/CONACyT (proyecto # 108159) y de los fondos mixtos de CONACyT y el Estado de Oaxaca (proyecto # 153281) para finalizar los modelos de peligros que estarán aplicados al análisis de riesgos a nivel de México, los estados, regiones y municipios. Usamos el análisis y mapeo de peligros del Estado de Oaxaca para ilustrar la aplicación a un estado en el último capítulo. Los autores quieren reconocer la labor excepcional editorial del Mtro. David Moo Llanes y de la Lic. Kelly Scoggins.

ÍNDICE

Capítulo I. Metodología y proceso de implementación de bases de datos utilizados

1.1 Introducción

1.2 Software empleado para desarrollar el trabajo

1.3 Capas vectoriales

1.3.1 Límites internacionales

1.3.2 Red de caminos

1.3.3 Red hidrográfica

1.3.4 Geología de la superficie

1.3.5 Tipo de suelo

1.3.6 Textura del suelo

1.3.7 Tectónica

1.3.8 Ubicación de las estaciones meteorológicas

1.3.9 Cantidad de inundaciones previas

1.4 Capas raster

1.4.1 Modelo digital de elevación (MDE)

1.4.2 Pendientes

1.4.3 Aspecto

1.4.4 Acumulación de flujos

1.4.5 Cobertura de la tierra

1.4.6 Precipitaciones máximas

Capítulo II. Metodología y proceso de implementación para el peligro de inundaciones

2.1 Introducción

2.2 Metodología

2.2.1 Identificación de los factores causales

2.2.2 Clasificación de los mapas de la distribución del número de eventos de inundaciones pasadas y de los factores causales

2.2.3 Estimación de las puntuaciones ponderadas

2.2.4 Estandarización de las puntuaciones ponderadas

2.2.5 Creación del mapa de la distribución del nivel de intensidad del peligro de inundaciones

2.3 Implementación de la metodología

2.3.1 Software requerido

2.3.2 Preparación de los factores causales

2.3.3 Clasificación del mapa de la distribución del número de eventos de inundaciones históricas

2.3.4 Estimación de las puntuaciones ponderadas del rango o categoría

2.3.5 Estandarización de las puntuaciones ponderadas de cada factor causal

2.3.6 Creación de la capa de la distribución del nivel de intensidad del peligro de inundaciones

2.4 Bibliografía y lecturas recomendadas

Capítulo III. Metodología y proceso de implementación para el peligro de deslizamiento

3.1 Introducción

3.2 Metodología

3.2.1 Identificación de los factores causales

3.2.2 Reclasificación de la pendiente

3.2.3 Estandarización de la distribución de los factores causales de acuerdo con una escala continua

3.2.4 Establecimiento de las prioridades (ponderación) de los factores causales

3.2.5 Creación de los mapas de la distribución de la susceptibilidad y del nivel de intensidad de peligro de deslizamiento de tierra

3.3 Implementación de la metodología

3.3.1 Software requerido

3.3.2 Preparación de los factores causales

3.3.3 Reclasificación de las capas de distribución de los factores causales

3.3.4 Creación de los mapas de distribución de la susceptibilidad y del nivel de intensidad del peligro de deslizamientos de tierra

3.4 Bibliografía y lecturas recomendadas

Capítulo IV. Metodología y proceso de implementación para el peligro de olas de calor

4.1 Introducción

4.2 Metodología

4.2.1 Índices meteorológicos

4.2.2 Extracción de los datos climáticos

4.2.3 Cálculo del índice de calor diario

4.2.4 Cálculo de la media de la ola de calor máxima anual

4.2.5 Estimación de predicciones futuras de la ola de calor máxima anual

4.2.6 Identificación de los parámetros y selección del modelo de regresión

4.2.7 Especialización del índice de calor máximo diario anual en la República Mexicana

4.2.8 Clasificación de los mapas de distribución del índice de olas de calor máximo diario anual en los mapas finales de peligro

4.3 Implementación de la metodología

4.3.1 Software requerido

4.3.2 Extracción de datos climáticos y procesamiento

4.3.3 Cálculo de la media de la ola de calor máximo anual

4.3.4 Estimación de la ola de calor máximo anual en diferentes periodos de retorno

4.3.5 Selección de los parámetros e identificación del modelo de regresión

4.3.6 Especialización del índice máximo anual de olas de calor

4.3.7 Creación de los mapas de distribución del nivel de intensidad del peligro de olas de calor

4.4 Bibliografía y lecturas recomendadas

Capítulo V. Metodología y proceso de implementación para el peligro de velocidad del viento

5.1 Introducción

5.2 Metodología

5.2.1 Extracción datos climáticos

5.2.2 Cálculo de la velocidad promedio máxima diaria anual del viento, en distintos periodos de retorno

5.2.3 Identificación de los parámetros y selección del modelo de regresión

5.2.4 Especialización de la velocidad promedio máxima diaria anual del viento en la República Mexicana

5.2.5 Clasificación de los mapas de distribución de la velocidad promedio máxima diaria anual en los mapas de peligros finales

5.3 Implementación de la metodología

5.3.1 Requerimientos de software

- 5.3.2 Preparación de los datos meteorológicos
- 5.3.3 Cálculo de la velocidad promedio máxima diaria anual del viento para distintos periodos de retorno
- 5.3.4 Selección de los parámetros e identificación del modelo de regresión
- 5.3.5 Especialización de la velocidad promedio máxima diaria anual del viento
- 5.3.6 Creación de los mapas de distribución del nivel de intensidad del peligro por la velocidad del viento

5.4 Bibliografía y lecturas recomendadas

Capítulo VI. Metodología y proceso de implementación para el peligro sísmico

6.1 Introducción

6.2 Requerimientos de software

6.3 Descripción de los datos

6.3.1 El Proyecto de Evaluación de Peligro Sísmico Global

6.3.2 La Base de Datos de Terremotos Significativos

6.3.3 El World Stress Map

6.4 Preparación de los datos

6.5 Creación de los mapas

6.6 Bibliografía y lecturas recomendadas

Capítulo VII. Aplicación del eAtlas para los Peligros Naturales del estado de Oaxaca

7.1 Peligro de inundaciones

7.2 Peligro de deslizamientos

7.3 Peligro olas de calor

7.4 Peligro velocidad de viento

7.5 Conclusiones

ANEXOS ELECTRÓNICOS

Anexo 1. Metadatos de la capa de límites internacionales.

Anexo 2. Procedimiento para recortar un archivo *shape* con un conjunto de datos, de acuerdo con las fronteras de la República Mexicana, utilizando la plantilla de límites internacionales (extraída de las capas de datos de ESRI ArcView).

Anexo 3. Metadatos para la capa de distribución de la red carretera.

Anexo 4. Metadatos para la capa de distribución de la red hidrográfica.

Anexo 5. Clases observadas en la geología de la República Mexicana.

Anexo 6. Metadatos para la capa de distribución de la geología de superficie.

Anexo 7. Lista de tipos de suelos presentes en la República Mexicana.

Anexo 8. Metadatos para la capa de distribución de tipos de suelos.

Anexo 9. Metadatos de la capa de distribución de texturas del suelo.

Anexo 10. Metadatos de la capa tectónica.

Anexo 11. Metadatos para la localización de las estaciones meteorológicas.

Anexo 12. Procedimiento para convertir un archivo *shape* en una GRID.

Anexo 13. Metadatos de la capa de distribución de las inundaciones previas.

Anexo 14. Metadatos de la capa del Modelo Digital de Elevación (MDE).

Anexo 15. Metadatos para la capa de distribución de pendientes (slope).

Anexo 16. Metadatos para la capa de distribución de aspecto.

Anexo 17. Metadatos de la capa de distribución de acumulación de flujo.

Anexo 18. Metadatos de la capa de distribución de la cobertura de tierra.

- Anexo 19.** Metadatos de la capa de distribución de las precipitaciones máximas.
- Anexo 20.** Resultados de los modelos de regresión con periodos de retorno de 2, 5 y 10 años.
- Anexo 21.** Proceso que se sigue para proyectar una capa de proyección geográfica a cilíndrica en ArcView y ArcGIS.
- Anexo 22.** Proceso para cambiar la proyección de una capa cilíndrica a geográfica en ArcView y ArcGIS.
- Anexo 23.** Metadatos para la capa de distribución del índice del peligro de inundaciones.
- Anexo 24.** Metadatos para la capa de distribución del nivel de intensidad del peligro de inundaciones.
- Anexo 25.** Metadatos para la capa de distribución de la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra.
- Anexo 26.** Metadatos para la capa de distribución del nivel de intensidad del peligro de deslizamiento de tierra.
- Anexo 27.** Descripción de los datos meteorológicos diarios del Centro Nacional de Datos Climáticos (NCDC, National Climatic Data Center).
- Anexo 28.** Resultados del análisis de regresión por pasos.
- Anexo 29.** Metadatos para las capas de distribución del índice máximo anual de olas de calor (periodos de retorno de dos, cinco, ocho y diez años).
- Anexo 30.** Metadatos para las capas de distribución de peligro de olas de calor (periodos de retorno de dos, cinco, ocho y diez años).
- Anexo 31.** Descripción de los datos meteorológicos diarios del NCDC.
- Anexo 32.** Reproyección de las distintas capas.
- Anexo 33.** Creación de un área de amortiguamiento de 300 km alrededor de cada zona climática y el recorte de las distintas capas de las zonas climáticas con amortiguamiento.
- Anexo 34.** Metadatos para las capas de distribución de la velocidad promedio máxima diaria anual del viento (periodos de retorno de dos, cinco, ocho y diez años).
- Anexo 35.** Metadatos para las capas de distribución de los niveles de intensidad del peligro por la velocidad del viento (periodos de retorno de dos, cinco, ocho y diez años).
- Anexo 36.** Metadatos de la capa de distribución de la aceleración máxima de la tierra.
- Anexo 37.** Metadatos para la capa de distribución del nivel de intensidad de amenaza sísmica.

CAPÍTULO I

Metodología y procesos de implementación de bases de datos utilizadas

1.1 Introducción

El objetivo de este documento es aplicar y adaptar para el continente americano las metodologías y aplicaciones del WHO e-atlas de riesgos de desastre para la Región Este del Mediterráneo, Volumen 1: Exposición a peligros naturales desarrollados por la oficina de la misma regional de la Organización Mundial de la Salud (OMS). El sitio web del e-Atlas: <http://www.who.eatlas.org/>

Con el fin de ser más pertinentes para los países de idioma español y de las Américas, los métodos han sido aplicados en México, y adaptados para fenómenos climatológicos de la región. El objetivo fundamental de esta obra ha sido producir un conjunto de datos homogéneos que abarcan el territorio de la República Mexicana, con las siguientes características:

- La escala de todos los grupos de datos vectoriales corresponde a 1:1,000,000.
- La resolución de todos los conjuntos de datos raster es de un kilómetro y 90 metros.
- El reproyectado corresponde a una proyección geográfica.
- ArcView shapefile, GRID o formato raster.
- Todas las capas que ofrecen una cobertura completa a fin de cumplir con el estándar límite internacional descrito en la sección 1.3.1 (Límites internacionales).

En el interés de distribuir este conjunto de datos a terceros, se han tomado medidas a fin de emplear, en la medida de lo posible, datos del dominio público.

Es importante mencionar que las capas descargadas del sitio de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y las capas descargadas del sitio de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO), fueron comparadas con imágenes de satélite a través del servicio WMS (JPL Global Imagery Service [<http://onearth.jpl.nasa.gov/wms.cgi?&>]).

1.2 Software empleado en el trabajo

La puesta en marcha de los procesos descritos en este documento se basó en la utilización del programa ArcGIS 9.2, ArcView 3.x y de la extensión *Spatial Analyst* 1.1, ambos desarrollados por el Environmental Systems Research Institute (ESRI) (Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales). Asimismo, se han empleado los siguientes *scripts* y extensiones de acceso público en el sitio en Internet de ESRI ArcScripts: <http://arcscripts.esri.com/>, o bien en los que se puede acceder directamente en el Atlas:

- Grid Utilities v1.1 (file: Grid01.avx)
- Grid Analyst (file: GridAnalyst.avx)
- XTools (file: XTOOLS.MH.avx)
- ImageWarp (file: ImageWarp.avx)
- Grid and theme projector v.2 (file: grid_theme_prj.avx)
- Hydrologic Modelling v1.1 (file: hydrov11.avx)
- “MapInfo conversion” (file: convertMif.avx).

Antes de seguir los pasos indicados en este documento, es necesario cargar y activar los *scripts* y las extensiones en el programa ArcView.

1.3 Capas vectoriales

1.3.1 Límites internacionales

Como fuente de referencia del Atlas, se empleó el *dataset* de límite nacional para la República Mexicana, producido por CONABIO (2002) "Límite Nacional 1:1,000,000" que fue extraído de conjunto de datos vectoriales y toponímicos de la carta Topográfica a una escala 1:1,000,000 del INEGI, México.

Esta capa fue descargada directamente de la página de CONABIO en su apartado de "Obtención de metadatos y cartografía" en la siguiente dirección electrónica:

<http://conabioweb.conabio.gob.mx/metacarto/metadatos.pl>, de la siguiente manera:

seleccionar en el apartado de Tema= *Aspecto Social*, Escala= 1:1,000,000 y en Área geográfica= *Nacional*, por último dar un clic en el botón *Consulta*. Finalmente, de la lista resultante seleccionar *Límite Nacional 1:1,000,000* y dar un clic en el botón de *Obtención de cartografía* en la siguiente página seleccionar *Shapefile* y por último *Bajar información con coordenadas geográficas*. El nombre del archivo es **borde_mex_e.shp**. El mapa resultante se puede observar en la **Figura 1**, mientras que los metadatos asociados en el **Anexo 1**.

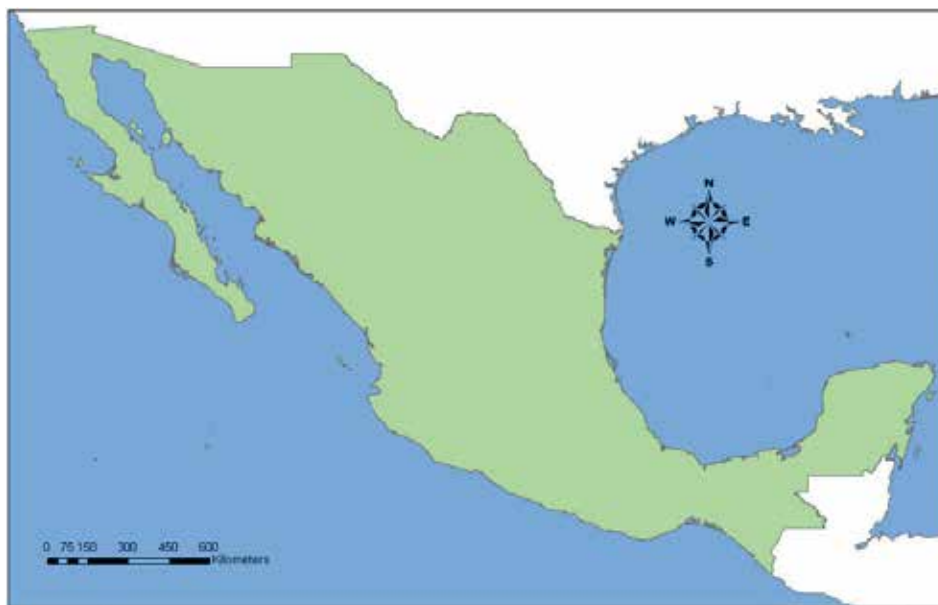


Figura 1. Área que abarca el E-Atlas de la OMS para los riesgos de desastres, aplicación a México

Como alternativa, se podrá emplear la capa del *International Boundaries Dataset (IBD)*, que es de 1:1,000 000, y que ha sido elaborada por el equipo de trabajo en límites administrativos e internacionales del *United Nations Geographic Information Working Group (UNGIWG)* o Equipo de Trabajo sobre Información Geográfica de la Organización de las Naciones Unidas.

Se sugiere el uso de este dataset por los siguientes motivos:

- Con el objeto de cumplir con los estándares y las prácticas de las Naciones Unidas en la representación de límites internacionales y áreas en disputa en formatos tanto impresos como electrónicos.
- Porque permite la integración uniforme de la delimitación de los límites administrativos al interior de las naciones, elaborados en el contexto del proyecto para la base de datos *Second*

Administrative Level Boundaries (SALB) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), coordinado por la OMS.

El acceso al conjunto de datos IBD está restringido a la ONU; por ende, no está disponible en el Atlas. Para obtener mayor información y acceso a los datos, consúltese la siguiente dirección electrónica: <http://boundaries.ungis.org/>

El acceso a la base de datos SALB es público. La información validada puede descargarse directamente de la página en Internet del Proyecto SALB en: <http://www.who.int/whosis/en/>

La base de datos IBD está re proyectada (proyección geográfica) y, por lo cual no implicó mayor complicación utilizarla en el contexto del Atlas.

1.3.2 Red de caminos

La capa de la red de caminos de la República Mexicana fue obtenida del conjunto de datos a escala 1:1,000,000 producido por el INEGI. Incluso si estos datos no son de la mejor calidad posible y son anticuados, representan ciertamente el conjunto de datos más reciente y más constante actualmente disponible. El nombre del archivo es **carreteras.shp**, se tendrá que definir la proyección de la capa de acuerdo al **Anexo 2**.

En esta capa, los segmentos del camino se clasifican en las categorías siguientes usando el número de carriles (n-carril), tipo y condición de la carretera como atributos básicos:

- Carril, Pavimentada, En operación.
- 2 Carriles, Pavimentada, En operación.
- 2 Carriles, Terracería, En operación.
- 4 Carriles, Pavimentada, En operación.
- 6 Carriles, Pavimentada, En operación.
- Mas de 6 carril, Pavimentada, En operación.
- N/A, Pavimentada, En construcción.
- N/A, Pavimentada, Fuera de uso.
- N/A, Terracería, Fuera de uso.
- N/A, Terracería, N/A.

Estos datos se encuentran disponibles en dominio público en la página de INEGI (http://mapserver.inegi.org.mx/data/inf_e1m/?s=geo&c=979). Como alternativa puede obtenerlo del conjunto de datos *Global Insight Plus* elaborado y distribuido por *Europa Technologies* (<http://www.europa-tech.com>). Aún cuando estos datos no son de la mejor calidad y son obsoletos representan, sin duda, el conjunto de datos más reciente y consistente disponible en el mercado para esa región. En ese conjunto de datos, los segmentos de caminos se han clasificado dentro de las siguientes categorías:

- Carretera/autopista
- Caminos primarios o secundarios
- Caminos de dos vías
- Vías, senderos o caminos peatonales.

Estos datos no son del dominio público y por lo cual no forman parte del Atlas. Es necesario referirse a la URL anteriormente mencionada para obtener información con respecto a los términos de uso, así

como al costo de esa base de datos. Otra alternativa es descargar *Roads of the World* (Vmap0) desde la página de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) (<http://www.fao.org/geonetwork/srv>). El archivo resultante (**Figura 2**) será almacenado con el nombre de **roads_mex_e**, y los metadatos asociados están contenidos en el **Anexo 3**.

1.3.3 Red hidrográfica

La extensión de la red hidrográfica sobre a la República Mexicana se ha extraído del conjunto de datos a escala 1:1,000,000 producido por el INEGI. El nombre del archivo es **CorrienteAgua.shp** y **CuerposAgua.shp**. se tendrá que definir la proyección de las capas de acuerdo al **Anexo 2**. Los archivos resultantes serán almacenados con los nombres de **river_mex_e.shp** y **cuerposagua_mex_e.shp**. Las características de la línea (Ríos) se clasifican en dos: Intermitente y Perenne.

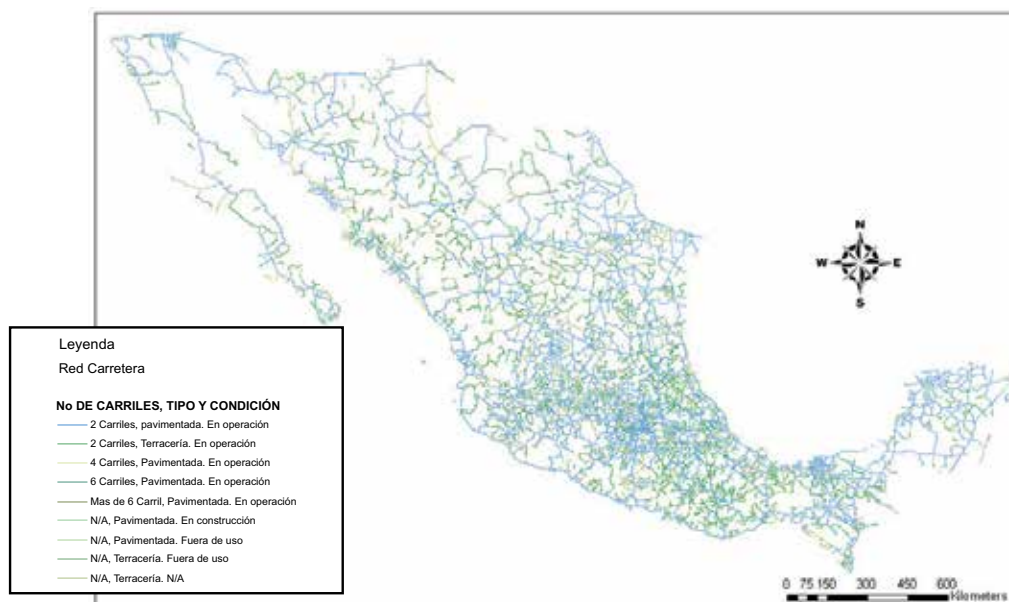


Figura 2. Red de caminos en el área incluida en el E-Atlas de la OMS para los riesgos de desastres, aplicación a México

Estos datos se encuentran disponibles en dominio público en la página de INEGI (http://mapserver.inegi.org.mx/data/inf_e1m/?s=geo&c=979). Como alternativa podrá descargar la capa de *Perennial Water Courses (Rivers) of the World* (Vmap0) de la página de la FAO (<http://www.fao.org/geonetwork/srv>) con una escala de 1: 1,000,000. En la **Figura 3** se muestra la red hidrográfica para la región, y los metadatos asociados están contenidos en el **Anexo 4**.

1.3.4 Geología de superficie

La capa de geología superficial de la República Mexicana, el dataset que se utilizó fue producida por INEGI. Los datos utilizados en el dataset son los más recientes y los más actuales de acceso libre, se pueden descargar de la página (http://mapserver.inegi.org.mx/data/inf_e1m/?s=geo&c=979). El nombre del archivo es **rocas.shp**. Las clases observadas sobre la región se divulgan en el **Anexo 5**. La capa tendrá que ser proyectada, posteriormente reproyectada a unidades geográficas, y adecuar en base a los límites nacionales (**Anexo 2**). Los archivos resultantes (**Figura 4**) serán almacenados con los nombres de **geologia.shp** y la información asociada se encuentra en el **Anexo 6**.

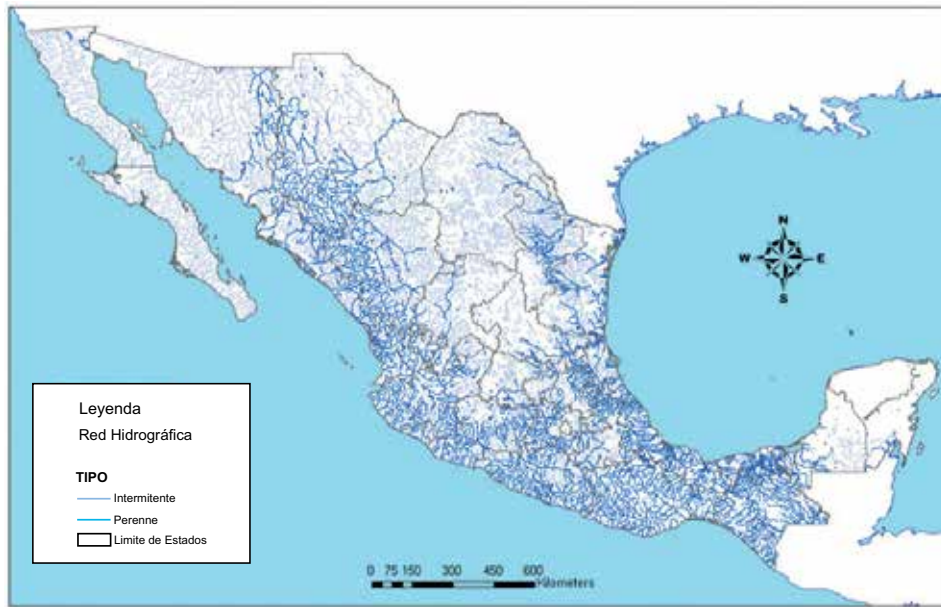


Figura 3. Red hidrológica en el área incluida en el E-Atlas de la OMS para los riesgos de desastres, aplicación a México









Figura 4. Geología de superficie en el área incluida en el E-Atlas de la OMS para los riesgos de desastres, aplicación a México

1.3.5 Tipo de suelo

La capa que contiene los tipos de suelo para la República Mexicana fue obtenida del conjunto de datos a escala 1:1,000,000 producido por el INEGI. El nombre del archivo es **Suelos.shp** y el nombre del campo que se debe utilizar es 'Nom_sue1'. La lista de suelos está en el **Anexo 7**. La capa tendrá que ser proyectada de acuerdo a la proyección estipulada por INEGI, posteriormente reproyectada a unidades geográficas. Debido a que la capa de suelos no cuenta con una sección del estado de Chiapas fue necesario hacer el siguiente proceso para agregarle este polígono.

Abrir la capa de **suelos.shp** y la de límites nacionales (**limites_nac.shp**), cortar la capa de suelos en base a la capa de límites nacionales utilizando el siguiente procedimiento

1. De un clic al arctool box  y seleccione la herramienta *Analysis tool>Extract>Clip* y dar doble clic.
2. En la opción *Input Features* seleccione la capa de **Suelos.shp**.
3. En la opción *Clip Features* seleccione la capa de límites nacionales.
4. En la opción *Output Features Class* seleccione la ruta y el nombre del archivo en este caso **sueltemp.shp**.
5. Seleccione la opción *Editor>start editing* y seleccione la ruta donde se encuentra el archivo **sueltemp.shp** en la opción *target* asegúrese de que se encuentre **sueltemp.shp** y que esta capa se encuentre activa.
6. Acérquese al área faltante del shapefile y seleccione con la herramienta  dando un clic sobre el área en cuestión.
7. El siguiente paso consiste en cortar los excedentes, utilizando la herramienta  y dibujando una línea entre el área en cuestión y los excedentes, asegúrese que en la opción *Task*: este seleccionado *Cut Polygon Features* y en la opción *Target*: **sueltemp.shp**, si aun quedan polígonos habrá que borrar cada uno de sus vértices dando un doble clic y un clic derecho sobre el vértice y seleccionar la opción *Delete vertex al finalizar seleccionar la opción Editor>Start Editing* seleccionar *Stop Editing* y guardar los cambios en el shapefile **sueltemp.shp**.
8. Abrir el archivo **sueltemp.shp** y el archivo **suelos.shp** colocar ambos archivos en modo edición dando un clic en la opción *Editor>Start Editing* de la barra de edición y seleccionar el polígono faltante de la capa de **sueltemp.shp** con la herramienta  y dar un clic en el icono de copiar  asegurarse que en la opción *Target* este seleccionado el shapefile **sueltemp.shp** y luego seleccionar en *Target* el shapefile **suelos.shp** y dar un clic en el icono  y luego dar un clic en la opción *Editor>Start Editing* de la barra de edición y dar un clic en guardar los cambios.
9. Una vez que esta el nuevo polígono en el shapefile **suelos.shp** lo seleccionamos con el botón y abrimos su tabla de atribuidos dando un clic con el botón derecho sobre la capa **suelos.shp**, le damos un clic al botón seleccionado y ponemos a la capa en modo de edición con la opción *Editor>Start Editing*, para poder modificar la tabla de atributos colocando en el campo de **NOM_SUE1** Nitisol en el campo **NOM_SUB1** eúritrico y en **CLA_TEX**. Finalmente, una vez modificada la tabla de atributos seleccionamos *Editor>Stop editing* y guardamos los cambios del shapefile **suelos.shp**.

Una vez finalizado este proceso tendrá que adecuarse en base a los límites nacionales (**Anexo 2**). Los archivos resultantes serán almacenados con los nombres de **Tiposuelo.shp**. La **Figura 5** se muestra el estrato del tipo de suelo resultante, y los metadatos asociados pueden consultarse en el **Anexo 8**.

1.3.6 Textura del suelo

La capa de la textura del suelo para la República Mexicana fue obtenida del conjunto de datos a escala 1:1,000,000 producido por el INEGI. El nombre del archivo es **Suelos.shp** y el nombre del campo que se debe utilizar es 'cla_tex'.

La capa tendrá que ser proyectada, posteriormente reproyectada a unidades geográficas, y adecuar en base a los límites nacionales (**Anexo 2**). El archivo resultante será almacenado con el nombre de **texturasuelo.shp** dentro de la carpeta *Variables F*. En lo que corresponde a la textura de suelo se clasifican según su superficie en tres clases:

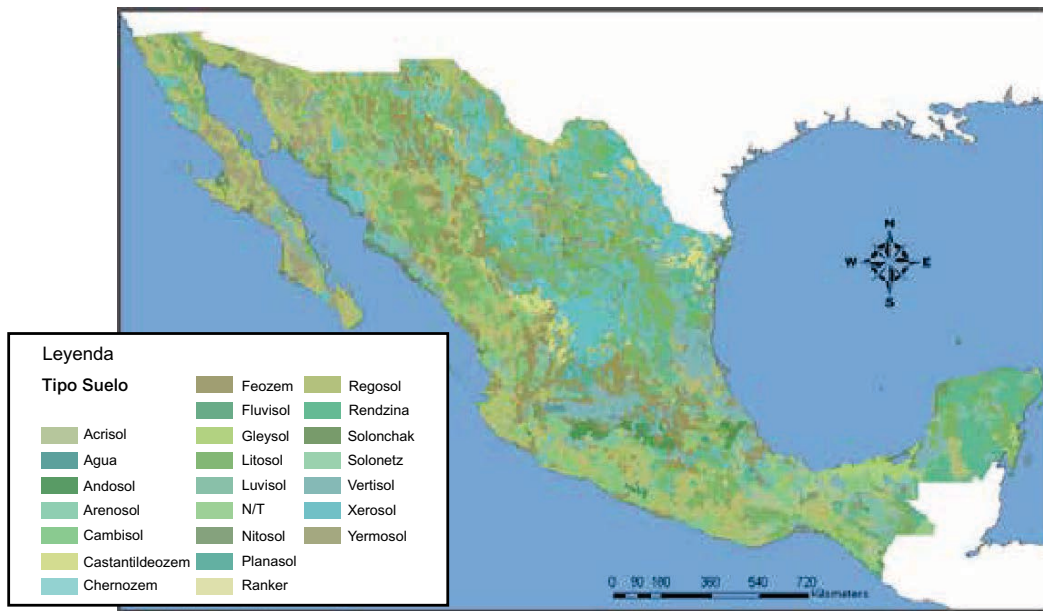


Figura 5. Tipos de suelo en la República Mexicana incluida en el E-Atlas de la OMS para los riesgos de desastres, aplicación a México

1. Grueso: arenas, arenas margas y margas arenosos con la arcilla menos del 18% y la arena más del 65% (marga a un tipo de roca sedimentaria compuesta principalmente de caliza y arcilla).
2. Medio: marga arenoso, marga, marga de la arcilla arenosa, marga del légamo, légamo. (légamo al sedimento que las aguas van depositando en el lecho de los ríos, y al transportado por el viento).
3. Fina: arcilla, arcilla limosa, arcilla arenosa, marga arcillosa.

En la **Figura 6** se presenta el estrato de textura de suelos resultante y los metadatos asociados pueden consultarse en el **Anexo 9**.

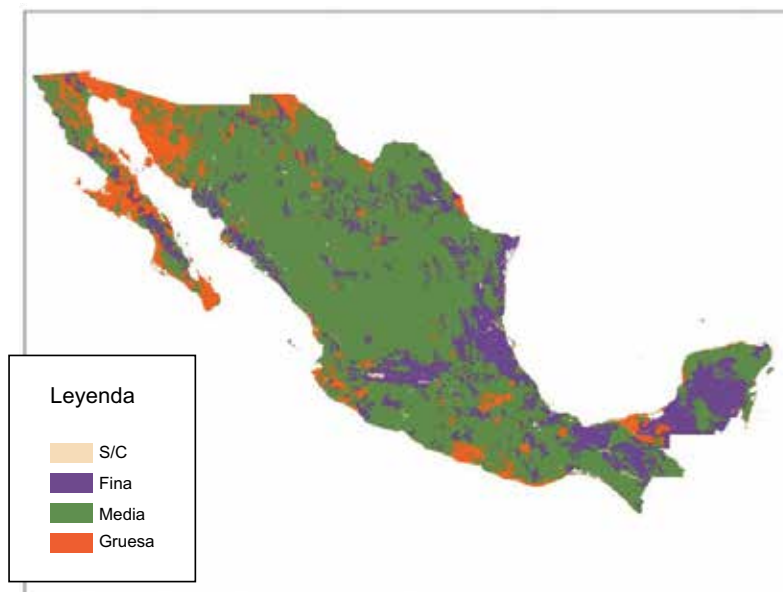









Figura 6. Textura de los suelos en el área incluida en el E-Atlas de la OMS para los riesgos de desastres, aplicación México

1.3.7 Tectónica

El sustrato tectónico (de mar y tierra) se obtuvo del Mapa Digital de Actividad Tectónica (DTAM por sus siglas en Inglés), elaborado por la Administración Nacional para la Aeronáutica y el Espacio (NASA) de los Estados Unidos de América, y el Centro Goddard de Vuelos Espaciales, ubicado cerca de Washington DC.

El DTAM se utiliza como un atlas digital de la tectónica y el vulcanismo ocurrido durante el último millón de años y se trazó empleando la proyección Robinson. Por otra parte, permite ubicar y clasificar diversos tipos de zonas con fallas geológicas, centros de expansión activos y centros volcánicos que estuvieron activos durante este millón de años. El DTAM se creó utilizando diversas fuentes de datos de sensores remotos, así como bases de datos geospaciales (sismicidad, vulcanismo y movimientos de las placas) y constituye una herramienta única para entender la naturaleza fisiográfica de la Tierra. Este mapa se puede descargar gratuitamente en formatos **jpg**, **gif**, **pdf** y **tif** en la siguiente dirección electrónica: <http://denali.gsfc.nasa.gov/dtam/data.html>. Con el objeto de crear un estrato reproyectado en formato GIS y utilizarlo en el Atlas, se siguió el siguiente procedimiento:

1. Se descargó el Mapa Digital de Actividad Tectónica versión 1998 (DTAM) en formato **tif** (**DTAM.tif**) del sitio en Internet anteriormente mencionado.
2. En ArcView, se llevaron a cabo los pasos desde “a” hasta “d” para proyectar el estrato global de los límites internacionales (sección 1.3.1), de la proyección geográfica a la proyección Robinson:
 - a) Se verificó que las extensiones “Grid and theme projector v.2” e “ImageWarp” estuvieran activadas en ArcView.
 - b) Se agregaron el archivo shape **lim_int_bnd** y los archivos DTAM.tif con los límites internacionales globales, como imagen.
 - c) Se hizo clic ya fuera en el botón  o bien se utilizó la función Grid Projector >Grid >Theme Projector y se seleccionó la opción **lim_int_bnd** de la lista, como tópico del proyecto.
 - d) En la ventana “Theme Projector”:
 - se especificaron los parámetros de la proyección actual, como sigue:
 - * Category (Categoría) = projection of the world (proyección del mundo).
 - * Type (Tipo) = (Geographic) (Geográfico).
 - * Current Projection Units (Unidades de proyección actuales) = decimal degrees (grados decimales).
 - se especificaron los parámetros de la nueva proyección de la siguiente manera:
 - * Category (Categoría) = projection of the world (proyección del mundo).
 - * Type (Tipo) = Robinson
 - * New Projection Units (Nuevas unidades de proyección) = metres (metros) y se hizo clic en “OK”
 - e) Se guardó el archivo shape resultante como archivo **lim_int_bnd_rob**.
3. Se empleó la línea costera de la versión reproyectada de la Base de Datos de Límites Internacionales como una referencia para combinar la imagen DTAM.tif utilizando la aplicación ImageWarp de la siguiente forma:
 - a) Verificar que la extensión “ImageWarp” esté activada en ArcView.
 - b) Seleccionar la función ImageWarp/ImageWarp.
 - c) En la ventana “ImageWarp Session Setup” que aparece, seleccionar **DTAM.tif** como la imagen que será rectificadas y la Base de Datos de Límites Internacionales como el tópico que servirá de referencia a la adaptación; hacer clic en “OK” para continuar.
 - d) Contestar “No” en la siguiente ventana de diálogo, y pasar a la siguiente ventana.
 - e) En el cuadro “Ground Control Point”, hacer clic en el botón de radio “New GCP Table” y seleccionar el nombre de la nueva tabla que contendrá la lista del punto de referencia para el

- trabajo; hacer clic en “OK”, para continuar. El proceso de reproyección se ha iniciado, y la imagen aparecerá en la modalidad “FROM”, mientras que el archivo shape aparecerá en las modalidades “TO” y “TO*** ROAM”.
- f) En la modalidad “TO”, se aplicará el “zoom” a algún sitio de la Región donde se colocará un primer punto de referencia en la frontera internacional.
 - g) Una vez hecho lo anterior, se aplicará el “zoom” en el mismo sitio en la modalidad “FROM”
 - h) Se seleccionará la herramienta de selección Ground Control Point () en la ventana de íconos y se pondrá un primer punto en la modalidad “Tn” en un sitio que servirá como referencia; asimismo, se indicará si se desea conservar ese punto justo al ingresar a la siguiente ventana.
 - i) Se colocará un punto en el sitio correspondiente en la modalidad “FROM”.
 - j) Se llevará a cabo la misma operación explicada anteriormente, para el caso de otros dos puntos.
 - k) Una vez seleccionados los tres pares de Ground Control Point, se colocará un Nuevo punto en la modalidad “TO” y después se oprimirá el botón “Compute From” () en la ventana de íconos. Esta operación colocará automáticamente un punto en la ubicación correspondiente, en la modalidad FROM
 - l) Oprimase la herramienta “Ground Control Point select tool” ()y, con el puntero, selecciónese lo recientemente creado en la modalidad “FROM”
 - m) Selecciónese la herramienta “Move Ground Control Point tool” () y hágase clic en el sitio donde debería ubicarse normalmente el cuarto punto. Con esta operación el cuarto punto se colocará en el lugar correcto.
 - n) Repítase la operación hasta contar con la suficiente cantidad de puntos en el mapa, o bien cuando los resultados del paso anterior ubiquen, de hecho, un punto en la modalidad “FROM” exactamente donde debería estar. Una vez que se sienta satisfecho con sus puntos de referencia, haga clic en el ícono “Calculate RMS” () y seleccione el tercer orden de cálculo. Aparecerá una ventana con información indicando el error en la RMS (media de la raíz cuadrada) en el mapa resultante. El error RMS es una indicación del nivel de la distorsión geométrica que no ha sido correctamente medida por la discrepancia entre las ubicaciones de los puntos en el estrato de referencia y la ubicación de esos mismos puntos en el estrato que ha sido adaptado. A menor error RMS mayor exactitud en la transformación.
 - o) Si está satisfecho con el resultado, oprima el botón () para generar una nueva imagen adaptada. Asimismo, es necesario que seleccione el método de remuestreo (utilice vecino más próximo, interpolación bilineal, o convolución al cubo), el tipo de imagen resultante (**tif**, **jpg**, **bil**, **bsq**, o **bip**), así como el nombre de la nueva imagen (p.e. “DTAM_warp.tif”)
 - p) Si la correspondencia entre la imagen adaptada y la Base de Datos de Límites Internacionales no resulta satisfactoria, reinicie el proceso desde el punto “a”. Si está satisfecho con el resultado, puede ir al paso siguiente.
4. Siga los siguientes pasos para crear un archivo shape de línea en el caso de cada uno de los distintos tipos de fallas que aparecen en la imagen adaptada (reverse, normal, major active and transform) únicamente para la República Mexicana.
 - a) Agregue el archivo DTAM_warp.tif para activar la modalidad.
 - b) Cree nuevos tópicos de línea empleando la función View>New Theme y seleccionando “line” en el menú desplegable.
 - c) Digite manualmente toda la parte de fallas del primer tipo.
 - d) Guarde el trabajo de edición con un nombre que sea específico del tipo de falla.
 - e) Repita la operación para los demás tipos de fallas hasta contar con cuatro archivos shape vectores (reverse fault, normal fault, major active fault and transform fault).
 5. Realice el siguiente proceso para fusionar los archivos shape que contienen los distintos tipos de fallas, y después de crearlos recórtelos siguiendo los límites de la región mediante el siguiente proceso:

- a) Verifique que la extensión XTools esté activada en ArcView.
- b) Seleccione la función Xtools>Merge Themes para crear un archivo shape único a partir de los cuatro creados anteriormente y guarde el archivo resultante con el siguiente nombre: **mx_tectonic_merge.shp**
- c) Agregue el archivo shape de límites internacionales (**zona.shp**) en la modalidad activada.
- d) Seleccione el Xtools>Clip con la función polígono(s).
- e) Seleccione **mx_tectonic_merge.shp** como el tema que contiene los elementos que desea recortar y **zona.shp** como el tema de polígono que contiene los polígonos que deberán usarse como referencia para el recorte.
- f) Especifique el nombre del archivo shape que deberá crearse como **mx_tectonic_rob.shp**
- g) Utilice GRID y la extensión “theme projector v.2” para reproyectar el **mx_tectonic_rob.shp** de la proyección Robinson a la geográfica.
- h) Guarde el producto resultante como **tec_mx_e.shp**.

El estrato tectónico resultante de este proceso se muestra en la **Figura 7** y los metadatos asociados pueden encontrarse en el **Anexo 10**. Dado que dicho estrato puede redistribuirse de manera gratuita, puede encontrarse en la sección de datos del primer volumen del Atlas. En caso de utilizarse, será necesario mencionar el Atlas tal cual aparece en los metadatos.

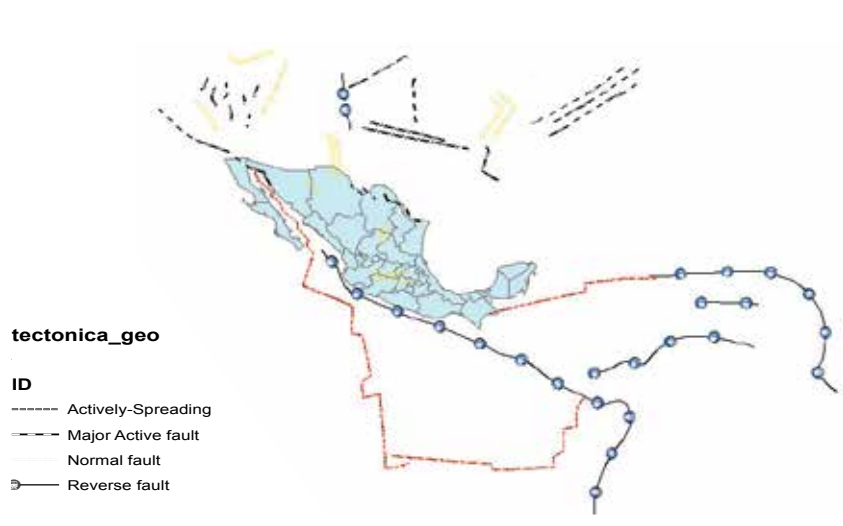


Figura 7. Elementos tectónicos del área incluida en el E-Atlas de la OMS para los riesgos de desastres, aplicación en México

1.3.8 Ubicación de las estaciones meteorológicas

La localización de las estaciones meteorológicas en la República Mexicana, se obtuvo a partir de la Base de Datos “Global Surface Summary of the Day Dataset” del “U.S. National Climatic Data Center (NCDC)”. Estos datos pueden descargarse gratuitamente en la siguiente dirección electrónica: <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/g sod/> Los datos originales se distribuyen como un archivo de texto ASCII, donde aparecen enlistadas todas las estaciones meteorológicas que están autorizadas a dar información a la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Los datos correspondientes a las características de las estaciones meteorológicas incluyen el número OMM de la estación, su nombre, la identidad del país/estado, además de la latitud, longitud y elevación.

El siguiente procedimiento se siguió para crear un archivo shape con información acerca de la ubicación de las estaciones meteorológicas de la región y aquellas que están a una distancia no mayor a 300 km, a fin de garantizar una buena interpolación en la región. Descargue el archivo que contiene la lista de estaciones seleccionadas por país (**stnlist-sorted.txt**) del sitio ftp arriba mencionado.

1. Abra el archivo **stnlist-sorted.txt** en un editor de textos (p.e. Microsoft Office Word) y elimine el encabezado (todas las líneas que se encuentran antes de los encabezados de las columnas del cuadro) y guarde los cambios.
2. Abra la versión modificado de **stnlist-sorted.txt** en un programa con hojas de cálculo (p.e. Microsoft Office Excel) y guárdelo como un cuadro DBF 4 (dBASE IV) (*.dbf) con el nombre **stnlist-sorted.dbf** a fin de convertir el archivo de texto en un formato que ArcView pueda reconocer.
3. Proceda de la siguiente manera para convertir el archivo **stnlist-sorted.dbf** en un archivo shape:
 - a) Abra ArcView y agregue el archivo “**stnlist-sorted.dbf**” en la ventana del cuadro.
 - b) Abra la modalidad en la cual se trazó el cuadro. Utilice la función View>Add Event Theme, seleccione el archivo “**stnlist-sorted.dbf**” en las ventanas que se abren y especifique “X field” como LON, y a “Y field” como LAT.
 - c) Convierta al Event Theme en un archivo shape utilizando la función Theme>Convert to Shapefile.
 - d) Guarde el archivo resultante como **estaciones_tot.shp**. La capa resultante deberá contener al menos 21,000 estaciones (dependiendo de la fecha de publicación de la lista de estaciones y de la cantidad de estaciones que se han agregado o eliminado).
4. Siga el siguiente procedimiento para crear una zona de amortiguamiento de 300 km alrededor de la región.
 - a) En View>Properties cambie las “Distance Units” a kilómetros
 - b) Cargue el estrato con los límites internacionales de la región (**border_mx_e.shp**) en la modalidad.
 - c) Seleccione la función Theme>Create Buffer y:
 - En la primera ventana de diálogo seleccione **border_mx_e.shp** como los elementos que habrán de amortiguarse.
 - En la segunda ventana de diálogo seleccione “At a Specified Distance” como el método para crear la zona de amortiguamiento e ingrese “300” para el ancho de la zona de amortiguamiento. Verifique que las unidades de distancia estén en kilómetros.
 - En la tercera ventana de diálogo, cree la zona de amortiguamiento utilizando “only inside of the polygon parameter”. Especifique que la zona de amortiguamiento deberá guardarse como un nuevo tópico y asígnele un nombre a este estrato (p.e. **mx_int_bnd_buffer_300.shp**).

El nuevo tema de la zona de amortiguamiento será agregado de manera automática a la vista actual. Realice el siguiente procedimiento para seleccionar las estaciones en la zona de amortiguamiento de la República Mexicana:

- a) Verifique que la extensión XTools esté activada en ArcView.
- b) Abra el Xtools>Clip con el módulo polígono(s).
- c) Seleccione **stations.shp** como el tema que contiene elementos que desea recortar.
- d) Seleccione **mx_int_bnd_buffer_300.shp** como el tema que contiene los polígonos que se emplearán como la referencia al momento de recortar.
- e) Nombre el nuevo shapefile **estaciones_mod_e.shp**.

En la **Figura 8** se presenta el archivo shape resultante de la aplicación del anterior proceso; los metadatos asociados pueden encontrarse en el **Anexo 11**. Dado que este estrato puede distribuirse de manera gratuita, se puede encontrar en la sección de datos del primer volumen del Atlas. Es necesario citar el Atlas tal cual aparece en los metadatos, en caso de que lo utilice.


1.3.9 Cantidad de inundaciones previas

La distribución de la cantidad de inundaciones previas se obtuvo de los polígonos de inundación compilados por el *Dartmouth Flood Observatory* entre los años de 1985 y 2009 en su “Global Active

Archive of Large Flood Events”. Este archivo es producto de una amplia gama de noticias, así como de fuentes de sensores directas y gubernamentales, y puede descargarse gratuitamente en formato MapInfo en la siguiente dirección electrónica: <http://www.dartmouth.edu/~floods/Archives/index.html>. Para generar la distribución de la cantidad de inundaciones previas en la República Mexicana, fue necesario combinar los polígonos de cada año de observación, mediante el siguiente proceso:



Figura 8. Ubicación de las estaciones meteorológicas empleadas en el contexto del E-Atlas de la OMS para los riesgos de desastres, aplicación en México

1. Descargue los archivos MapInfo de inundaciones globales para los años comprendidos entre 1985 y 2007, del sitio en Internet del Dartmouth Flood Observatory, anteriormente mencionado.
2. Verifique que las extensiones MapInfo Conversion y Xtools estén activadas en ArcView.
3. Oprima el botón donde aparece el diamante azul () en la ventana de proyección para dar inicio al proceso de conversión.
4. En la ventana de diálogo MapInfo Conversion que se abre, seleccione el archivo MapInfo de inundación global del primer año y haga clic en “OK”.
5. En el siguiente diálogo ingrese el nombre del archivo shape que se creará. Utilice la nomenclatura convencional **flood_n** ($n = 1985, 1986, \dots, 2009$).
6. Repita los pasos 3 a 5 para los años restantes.
7. Cargue la plantilla de los límites internacionales de la República Mexicana en la modalidad (**border_mx_e.shp**).
8. Utilice el XTool>clip con la función polígono para recortar las capas **flood_n** a la extensión de la región de la República Mexicana y guarde los archivos resultantes como **flood_n_clip**.
9. Abra la tabla de atributos de la primera capa recortada **flood_1985_clip** y comience a editarla empleando Table>Start Editing.
10. Agregue un campo denominado “frequency”.
11. Establezca el valor predeterminado de “frequency” en “1” para cada registro. Este campo indica que existe un caso de inundación para cada polígono; se sumará con otras frecuencias de otros polígonos para obtener la frecuencia de inundación por ubicación específica.
12. Convierta el **flood_1985_clip** a un formato de capa GRID siguiendo el procedimiento indicado en el **Anexo 12**. En caso de que algunas inundaciones se traslapen en el mismo estrato, será necesario convertir uno por uno en un GRID. En este último caso, nombre los GRID como sigue: **flood_1985_event_clip** con **event** que corresponde a una ID única para cada evento.
13. Convierta los valores “no data” a “0” en cada GRID, siguiendo los pasos:
 - a) Verifique que la extensión Grid Utilities esté activada en ArcView.
 - b) Active el GRID y haga clic en View>Grid>Set null data as; enseguida deberá abrirse la ventana “Set Null to another value...”

- c) Ingrese el valor “0” para reemplazar todos los valores NULL.
- d) Guarde el GRID en un archivo con el siguiente nombre: **flood_1985** y/o **flood_1985_event**.
14. Repita los pasos 9 a 13 en los archivos shape de los otros años.
15. Con el objeto de tener una sola capa que tenga la distribución de una cantidad de inundaciones previas, ocurridas entre 1985 y 2005, sume todas los GRIDs resultantes en el paso 13, empleando el Map Calculator (p.e. ([flood_1985] + [flood_1986] + [flood_1987]+ [flood_1987_event1] +...+ [flood_2005])).
16. Guarde el resultado como **nbr_fe_mx_e**.

En consideración a que esta capa es de distribución gratuita, puede encontrarse en la sección de datos del primer volumen del Atlas. En caso de utilizarlo, será necesario citar el Atlas tal cual aparece en los metadatos. En la **Figura 9** se muestra la capa resultante GRID, y los metadatos asociados se encuentran en el **Anexo 13**.

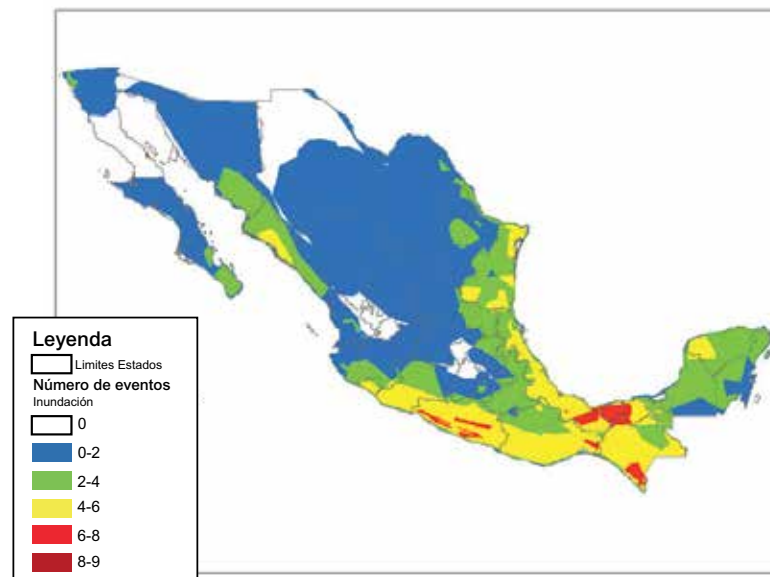


Figura 9. Distribución de las inundaciones previas en el área incluida en el E-Atlas de la OMS para los riesgos de desastres, aplicación a México

1.4. Capas raster

1.4.1 Modelo Digital de Elevación (MDE)

De los dos modelos digitales de elevación (MDE) que son de uso público y que se crearon con base en los datos recopilados por la “2000 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)”, se seleccionó el que tiene una resolución de 1 km (SRTM30) dado que corresponde a las características del proyecto, así como a una versión mejorada de la base de datos Global TOPOgraphy DEM (GTOPO30). Estos datos pueden descargarse gratuitamente, por secciones, de la siguiente dirección electrónica: <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM30/>. Con el objeto de convertir los datos fuente en un formato que pueda utilizarse en ArcView, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Descargue y guarde los archivos del área de interés (e020n40.dem.zip, e060n40.dem.zip, w020n40.dem.zip en este caso) del sitio ftp antes mencionado.
2. Descomprima cada archivo descargado en su propia carpeta. Observe que cada sección consiste de ocho archivos con la siguientes terminaciones en el nombre del archivo:
 - ***.dem**: Digital Elevation Model data (datos del Modelo Digital de Elevación)
 - ***.hdr**: header file for the MDE (archivo header del MDE)

- *.dmw: world file (archivo del mundo)
 - *.stx: statistics file (archivo de estadística)
 - *.prj: projection information file (archivo con información de la proyección)
 - *.gif: shaded relief image (imagen con relieve sombreado)
 - *.src: source map (mapa fuente)
 - *.sch: header file for the source map.(archivo header para el mapa fuente)
3. Cambie la terminación de cada archivo *.dem por *.bil. Al cambiar la terminación por .bil “band interleaved by line (BIL)” ArcView puede importarlo como un archivo de imagen.
 4. Verifique que la extensión *Spatial Analyst* esté activada en ArcView.
 5. Agregue las tres imágenes en el formato .bil en la vista activada.
 6. Siga los siguientes pasos con cada una de las imágenes, por separado:
 - a) Utilice la opción Theme>Convert to GRID para convertir la imagen en un archivo GRID. Los archivos resultantes son automáticamente nombrados por el *Spatial Analyst* como **Nwgrdx.grd**, donde $x = 1, 2, 3, \dots, 9999999$.
 - b) Active el Analysis>Map Calculator e ingrese la siguiente fórmula en el recuadro: $([Nwgrdx] \geq 32768).con ([Nwgrdx] - 65536, [Nwgrdx])$. El archivo GRID resultante es “Map calculation” y donde $y = 1, 2, 3, \dots, 999999$. Este cálculo corrige los errores en la interpretación de todos los datos en la imagen .bil como datos de enteros no designados (todas las elevaciones están por encima del nivel del mar) y, por ende, permite las elevaciones negativas (por debajo del nivel del mar).
 - c) Establezca los valores de la máscara de océanos en No Data empleando la opción Analysis>Map Calculator e ingresando la siguiente fórmula en el recuadro: $([Map Calculation y] = -9999).setnull ([Map Calculation y])$.

Se llevaron a cabo los siguientes pasos para agrupar las diversas secciones y recortarlos siguiendo las fronteras de la República Mexicana:

1. Verifique que las extensiones *Spatial Tools* y *Grid Analyst* estén activadas en ArcView.
2. Corra la función Transformation>Mosaic fusionar los tres GRIDs que se crearon en la parte previa del proceso.
3. Guarde el resultado como **demMX_mosaic**.
4. Agregue la capa **border_mx_e.shp** en la vista activada.
5. Active **dem_mosaic** y seleccione la función *Grid Analyst*>Extract Grid Theme Using polygon.
6. Haga clic en “yes” para continuar.
7. Seleccione la opción **border_mx_e.shp** del menú desplegable para utilizarlo como la capa sobre la cual se recortará el GRID, y después haga clic en OK.
8. Convierta el GRID resultante en el tema activo y seleccione la función Theme>Convert to GRID para crear el MDE final.
9. Guárdelo como **dem_mx_new_e**.

En consideración a que este estrato es de distribución gratuita, puede encontrarse en la sección de datos del primer volumen del Atlas. En caso de utilizarlo, será necesario citar el Atlas tal cual aparece en los metadatos. La capa resultante (GRID) se presenta en la **Figura 10**, y los metadatos asociados están disponibles en el **Anexo 14**.

1.4.1.1. Modelo Digital de Elevación 90 Metros

El Modelo Digital de Elevación a 90 m puede descargarse gratuitamente, por secciones, de la siguiente dirección electrónica: <http://srtm.csi.cgiar.org/>. Con el objeto de convertir los datos fuente en un formato que pueda utilizarse en ArcView, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

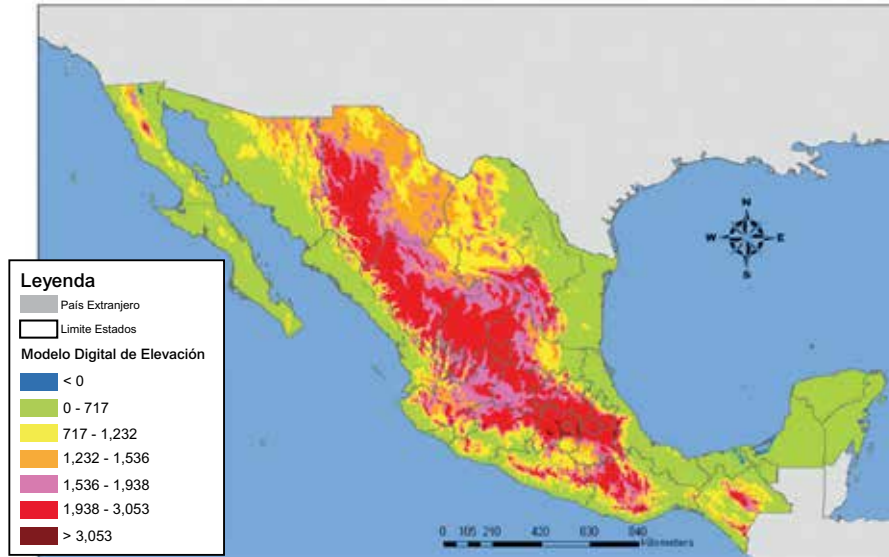


Figura 10. Elevación en el área incluida en el E-Atlas de la OMS para los riesgos de desastres, aplicación a México

1. Descargue los archivos en la sección *SRTM Data Search and Download*.
2. Seleccione los cuadrantes correspondientes a la zona de interés, dando un clic sobre el GRID.
3. Una vez seleccionada la zona de interés, seleccione “Click here to Begin Search”
4. Posteriormente, descargue los archivos .zip individuales dando un clic en Data download para cada uno de los cuadrantes individuales.
5. Descomprima los archivos en una carpeta llamada SRTM90.
6. En ArcView 3.x verifique que la extensión “spatial analyst” esta activa.
7. Abra los archivos de la carpeta SRTM90.
8. Utilice la opción Theme>Convert to grid para convertir la imagen en un archivo GRID. Los archivos resultantes son automáticamente nombrados por el Spatial Analyst como Nwgrdx.grd, donde x = 1, 2, 3, ..., 9999999.
9. Active el Analysis>Map Calculator e ingrese la siguiente fórmula en el recuadro: $([Nwgrdx] \geq 32768)$. con $([Nwgrdx] - 65536, [Nwgrdx])$. El archivo GRID resultante es “Map calculation y” donde y = 1, 2, 3, ..., 9999999. Este cálculo corrige los errores en la interpretación de todos los datos en la imagen como datos de enteros no designados (todas las elevaciones están por encima del nivel del mar) y, por ende, permite las elevaciones negativas (por debajo del nivel del mar).
10. Establezca los valores de la máscara de océanos en NoData empleando la opción Analysis>Map Calculator e ingresando la siguiente fórmula en el recuadro: $([Map\ Calculation\ y] = -9999)$.setnull([Map Calculation y]).

Se llevaron a cabo los siguientes pasos para agrupar las diversas secciones y recortarlos siguiendo las fronteras de la República Mexicana:



1. Verifique que las extensiones Spatial Tools y Grid Analyst estén activadas en ArcView.
2. Corra la función Transformation>Mosaic fusionar los tres GRIDs que se crearon en la parte previa del proceso.
3. Guarde el resultado como demMX90_mosaic.
4. Agregue la capa border_mx_e.shp en la vista activada.
5. Active dem_mosaic y seleccione la función Grid Analyst>Extract Grid Theme Using polygon.
6. Haga clic en “yes” para continuar.
7. Seleccione la opción border_mx_g.shp del menú desplegable para utilizarlo como la capa sobre la cual se recortará el GRID, y después haga clic en OK.

8. Convierta el GRID resultante en el tema activo y seleccione la función Theme>Convert to GRID para crear el MDE final.
9. Guárdelo como dem_mx90.

En consideración a que este estrato es de distribución gratuita, puede encontrarse en la sección de datos del primer volumen del Atlas. En caso de utilizarlo, será necesario citar el Atlas tal cual aparece en los metadatos.

1.4.2 Pendientes

La capa de distribución de las pendientes, tal cual se obtuvo del Modelo Digital de Elevación (MDE), se presenta en la sección 1.4.1; se obtuvo al calcular la tasa máxima de cambio entre cada pixel y las ocho adyacentes. En consideración a que el MDE ya está reproyectado y posee una buena resolución, sólo se siguieron los siguientes pasos para crear los GRIDS de distribución de pendientes:

1. Realice los pasos “a” hasta “d” para proyectar el **dem_mx_new_e** (la capa de elevación) en la proyección “Equal-Area Cylindrical” a fin de que las dimensiones horizontales y verticales estén expresadas en la misma unidad (metros). Si las dimensiones están medidas en distintas unidades, las medidas de la pendiente resultante serán incorrectas:
 - a) Verifique que las extensiones GRID, theme projector v.2 y Spatial Analyst estén activadas en ArcView.
 - b) Haga clic ya sea en el botón  o bien utilice las funciones Grid Projector>Grid y Theme Projector
 - c) De la lista, seleccione **dem_mx_new_e** como el GRID que se proyectará.
 - d) En la ventana Grid Projector:
 - Especifique los parámetros para la proyección actual, de la siguiente manera:
 - Category (Categoría) = projection of the world (proyección del mundo)
 - Type (Tipo) = Geographic (Geográfico)
 - Current Projection Units (Unidades de la proyección actual) = decimal degrees (grados decimales).
 - Especifique los parámetros para la nueva proyección, de la siguiente forma:
 - Category (Categoría) = projection of the world (proyección del mundo)
 - Type (Tipo) = Equal-Area Cylindrical
 - New Projection Units (Nuevas Unidades de Proyección) = metres (metros)
 - e) En la siguiente ventana, ingrese “1000” como el nuevo tamaño del pixel.
 - f) Guarde el GRID resultante como **dem_mx_new_m**.
2. Active el “Map Calculator” en el menú “Analysis” y:
 - a) Cree el GRID de la pendiente en grados, ingresando la siguiente fórmula en el recuadro: [dem_mx_new_m].slope(Null, FALSE).
 - b) Guarde el resultado como **slope_d_mex_e**.
 - c) Cree el GRID de la pendiente en porcentajes ingresando la siguiente fórmula en el recuadro: [dem_mx_new_m].slope(Null, TRUE).
 - d) Guarde el resultado como **slp_p_mex_e**.
3. Reproyecte las capas **slope_d_mex_e** y **slp_p_mex_e** de la proyección Equal-Area Cylindrical a una geográfica, realizando los siguientes pasos:
 - a) Haga clic ya sea en el botón  o bien utilice la función Grid Projector>Grid y Theme Projector.
 - b) Seleccione **slope_d_mex_e** o bien **slp_p_mex_e** de la lista como el GRID que se proyectará.
4. En la ventana Grid Projector:
 - a) Especifique los parámetros para la proyección actual, de la siguiente manera:
 - Category (Categoría) = projection of the world (proyección del mundo)
 - Type (Tipo) = Equal-Area Cylindrical projection (proyección Equal-Area Cylindrical)

- Current Projection Units (Unidades de la proyección actual) = metros (metros)
- b) Especifique los parámetros de la nueva proyección, de la siguiente manera:
- Category (Categoría) = projection of the world (proyección del mundo)
 - Type (Tipo) = Geographic (Geográfica)
 - New Projection Units (Unidades de la nueva proyección) = decimal degrees (grados decimales)
5. En la siguiente ventana, especifique “0.008333” como el nuevo tamaño de los píxeles.
6. Guarde los GRIDS resultantes como **slope_d_mex_g** para el caso de la pendiente en grados y como **slope_p_mx_g** para la pendiente en porcentajes.

En las **Figuras 11** y **12** se muestran los GRIDS resultantes, tanto en grados como en porcentajes, para la República Mexicana. Los metadatos asociados pueden consultarse en el **Anexo 15**. Dado que ambos conjuntos de datos son de redistribución gratuita, pueden encontrarse en la sección de datos del primer volumen del Atlas. En caso de utilizarlos, será necesario citar el Atlas tal cual aparece en los metadatos.

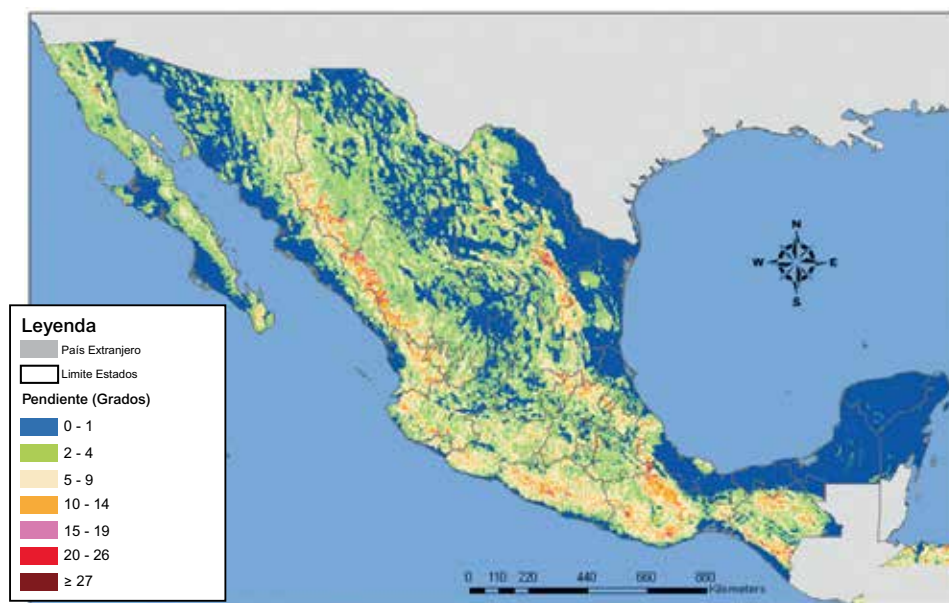



Figura 11. Pendiente en el área incluida en el E-Atlas de la OMS para los riesgos de desastres, aplicación México (grados)

1.4.2.1. Pendiente (MDE) 90 m

El primer paso para generar la pendiente es re-proyectar de unidades geográficas a métricas el archivo dem_mx90, debido a la cantidad de datos este GRID no puede ser manejado desde Arcview3.x por lo que todo este proceso se llevara acabo desde ArcGIS 9.2.

1. Ejecute arcmap 9.2.
2. Abra el archivo dem_mx90.
3. Abra el arctool box , expanda las herramientas “Data Management Tools\Projections and transformation\Define projection” y seleccione proyección geográfica.
4. Reproyecte el GRID en la opción “Data Management Tools\Projections and transformation\Raster\Project Raster” y re proyecte a “Cylindrical Equal Area (World)”, el raster resultante guardarlo como dem_mx90m.

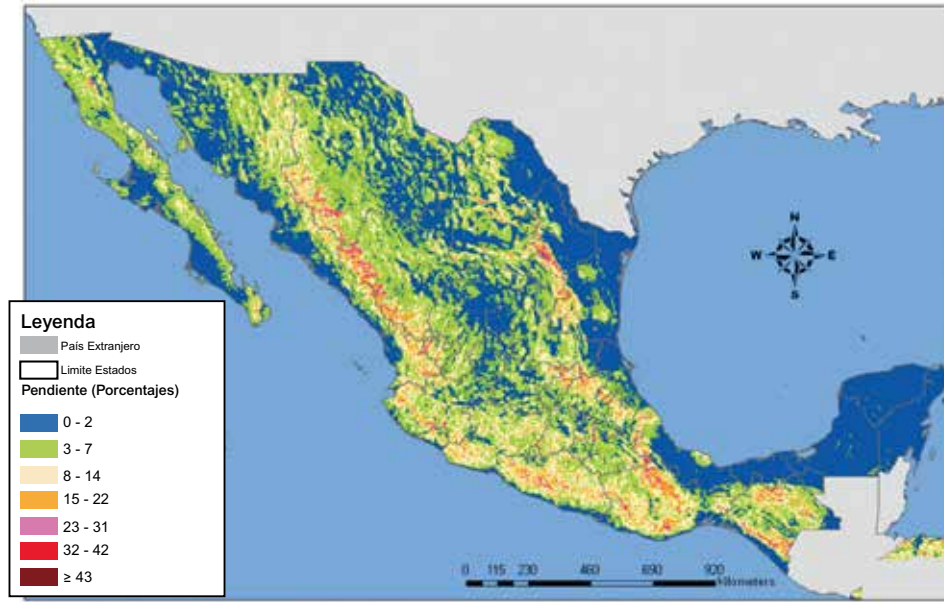



Figura 12. Pendiente en el área incluida en el E-Atlas de la OMS para los riesgos de desastres, aplicación México (porcentajes)

5. Expanda las herramientas “Spatial Analyst Tools\Surface analysis\Slope”.
6. En la ventana Slope seleccione en “Input surface” dem_mx90m, en “Output measurement” seleccione la opción “Degree” para grados o “Percent” para porcentaje, en Z factor 1, en “Output cell size” seleccione 90 m y por ultimo seleccione  y la ruta donde será guardado el raster resultante, los nombres de los rasters serán penm_g para grados y penm_pr para porcentajes.

En las **Figuras 13 y 14** se muestran los raster resultantes, tanto en grados como en porcentajes, para la República Mexicana

1.4.3 Aspecto

La capa de distribución de aspecto resultó del Modelo Digital de Elevación (MDE) que se presenta en la sección 1.4.1, al calcular la dirección pendiente abajo de la tasa máxima de cambio en las elevaciones entre cada pixel y los ocho pixeles adyacentes. Básicamente puede considerarse como la dirección de la pendiente máxima y se mide en grados de enteros positivos que van de 0 a 360, en el sentido de las manecillas del reloj, a partir del norte. A los pixeles de pendiente cero (áreas planas) se les asignan un valor de aspecto -1. Al igual que sucede con la capa de pendiente, la creación de este conjunto de datos requiere que las dimensiones horizontales (x , y) y verticales (z) estén expresadas en las mismas unidades (metros). Si las dimensiones están medidas en unidades diferentes, la medición del aspecto derivado será incorrecta. Dado que el MDE empleado ya está reproyectado y tiene una buena resolución, simplemente se realizaron los siguientes pasos para crear el GRID de distribución de pendiente:

1. Active la capa de elevación reproyectada, creada en la sección 1.4.2 (**dem_mx_new_m**).
2. Utilice la función “Surface>Derive Aspect” para crear el GRID deseado y guárdelo como **asp_mx_m**.
3. Reproyecte el archivo **asp_mx_m** de la proyección “Equal-Area Cylindrical” a una proyección geográfica empleando el proceso descrito en el paso 3 de la sección 1.4.2.
4. Nombre el GRID resultante como **asp_mx_new**.

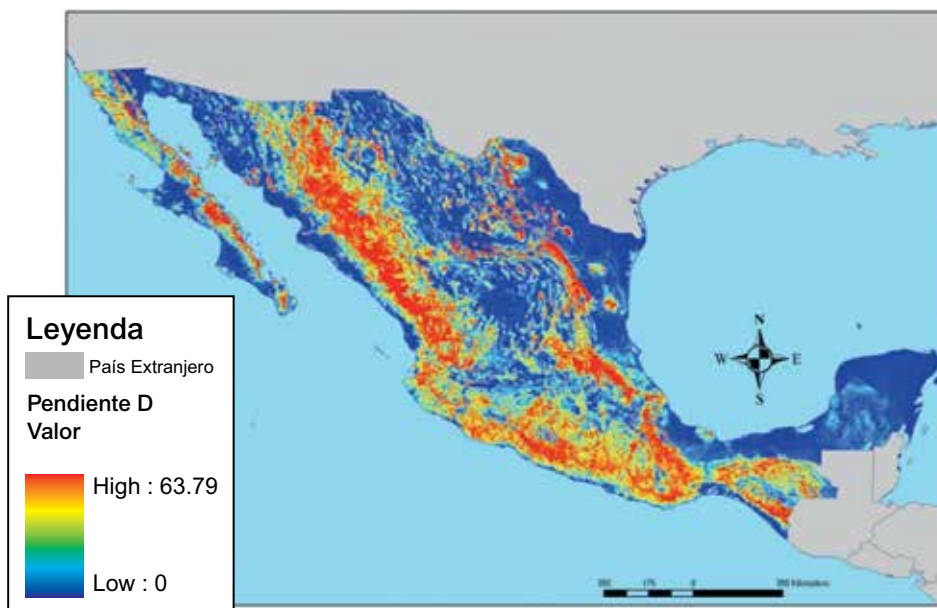


Figura 13. Pendiente en el área incluida en el E-Atlas de la OMS para los riesgos de desastres, aplicación México (grados)

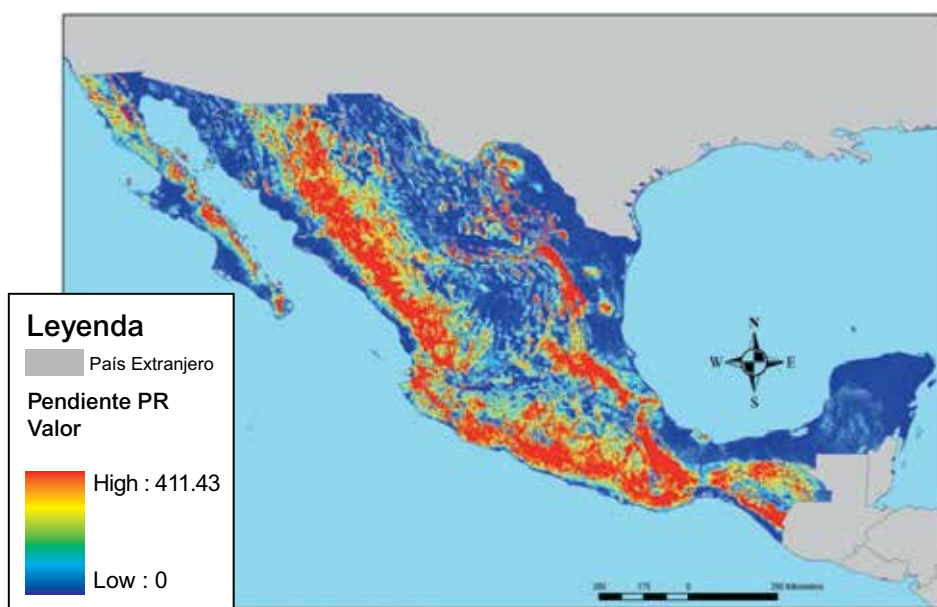


Figura 14. Pendiente en el área incluida en el E-Atlas de la OMS para los riesgos de desastres, aplicación México (porcentajes)

En la **Figura 15** se muestra el GRID resultante para la República Mexicana. Los metadatos asociados pueden encontrarse en el **Anexo 16**. En consideración a que este conjunto de datos es de redistribución gratuita, puede encontrarse en la sección de datos del primer volumen del Atlas. En caso de utilizarlo, será necesario citar el Atlas tal cual aparece en los metadatos.

1.4.3.1. Clasificaciones de Aspecto

Para generar por separado cada una de las clasificaciones de aspecto se realizó el siguiente procedimiento:

1. Abrir el archivo asp_mx_new en Arcview 3.x.

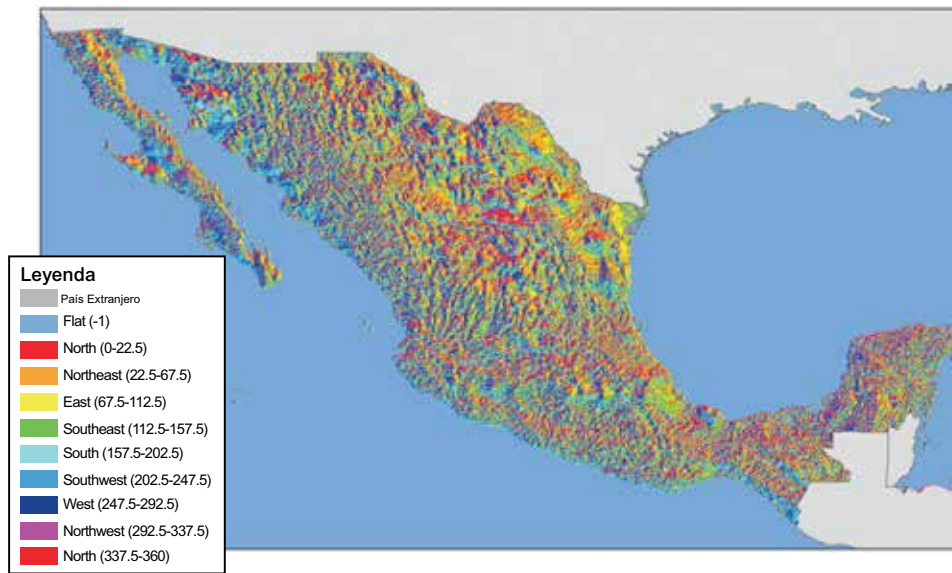


Figura 15. Aspecto del área incluida en el E-Atlas de la OMS para los riesgos de desastres, aplicación en México

2. Seleccione el archivo `asp_mx_new` y de un clic en el menú *Analysis\Reclassify...*
3. De un clic en el botón *Classify...* y seleccione 3 en la opción *Number of Classes* y de un clic en OK
4. Seleccione el rango a ser eliminado en las clasificaciones 1 y 3 y la clasificación que deseamos crear en 2.

Ejemplo:

Aspecto Norte	
Valores anteriores	Nuevos valores
-1 a 0	1
0 a 22.5	2
22.5 a 360	3

5. Sustituya los valores 1 y 3 por NoData y la opción 2 por uno, para convertir todos los valores de esa clasificación en 1 y de un clic en OK

Ejemplo:

Aspecto Norte	
Valores anteriores	Nuevos valores
-1 a 0	No data
0 a 22.5	1
22.5 a 360	No data

6. Verifique que la extensión *GRID Utilites V. 1.1.* este activa.
7. Seleccione el nuevo raster reclasificado y de un clic en la opción *Set Null Data As* del menú *GRID*, clic en OK, Cambie el nombre a `Asp_x` y OK.
8. Por ultimo seleccione el raster `Asp_x` y seleccione la opción *Convert to grid* del menú *Theme* y guarde el archivo como `asp_x`.
9. Repita los pasos para cada una de las clasificaciones del Aspecto.

1.4.4 Acumulación de flujo

La capa de distribución de acumulación de flujo se obtuvo del Modelo Digital de Elevación (MDE) a 90 metros debido a las inconsistencias que registraba el Modelo Digital de Elevación (MDE) que se presenta en la sección 1.4.1. El MDE a 90 m puede descargarse gratuitamente, por secciones, de la siguiente dirección electrónica: <http://srtm.csi.cgiar.org/>

Con el objeto de convertir los datos fuente en un formato que pueda utilizarse en ArcView, se llevaron a cabo los siguientes pasos:


1. Descargue los archivos en la sección *SRTM Data Search and Download*.
2. Seleccione los cuadrantes correspondientes a la zona de interés, dando un clic sobre el GRID.
3. Una vez seleccionada la zona de interés dar un clic en Click here to Begin Search.
4. Posteriormente descargue los archivos .zip individuales dando un clic en Data download para cada uno de los cuadrantes individuales.
5. Descomprima los archivos en una carpeta llamada SRTM90.
6. En ArcView 3.x verifique que la extensión spatial analyst esta activa.
7. Abra los archivos de la carpeta SRTM90.
8. Utilice la opción Theme>Convert to grid para convertir la imagen en un archivo GRID. Los archivos resultantes son automáticamente nombrados por el Spatial Analyst como Nwgrdx.grd, donde $x = 1, 2, 3, \dots, 9999999$.
9. Active el Analysis>Map Calculator e ingrese la siguiente fórmula en el recuadro: $([Nwgrdx] \geq 32768).con ([Nwgrdx] - 65536, [Nwgrdx])$. El archivo GRID resultante es "Map calculation y" donde $y = 1, 2, 3, \dots, 999999$. Este cálculo corrige los errores en la interpretación de todos los datos en la imagen como datos de enteros no designados (todas las elevaciones están por encima del nivel del mar) y, por ende, permite las elevaciones negativas (por debajo del nivel del mar).
10. Establezca los valores de la máscara de océanos en NoData empleando la opción Analysis>Map Calculator e ingresando la siguiente fórmula en el recuadro: $([Map\ Calculation\ y] = -9999).setnull([Map\ Calculation\ y])$.

Se llevaron a cabo los siguientes pasos para agrupar las diversas secciones y recortarlos siguiendo las fronteras de la República Mexicana. En consideración a que este estrato es de distribución gratuita, puede encontrarse en la sección de datos del primer volumen del Atlas. En caso de utilizarlo, será necesario citar el Atlas tal cual aparece en los metadatos.

1. Verifique que las extensiones Spatial Tools y Grid Analyst estén activadas en ArcView.
2. Corra la función Transformation>Mosaic fusionar los tres GRIDs que se crearon en la parte previa del proceso.
3. Guarde el resultado como demMX90_mosaic.
4. Agregue la capa border_mx_e.shp en la vista activada.
5. Active dem_mosaic y seleccione la función Grid Analyst>Extract Grid Theme Using polygon.
6. Haga clic en yes para continuar.
7. Seleccione la opción border_mx_g.shp del menú desplegable para utilizarlo como la capa sobre la cual se recortará el GRID, y después haga clic en OK.
8. Convierta el GRID resultante en el tema activo y seleccione la función Theme>Convert to GRID para crear el MDE final.
9. Guárdelo como dem_mx90.

El primer paso para generar el flujo acumulado es re-proyectar de unidades geográficas a métricas el archivo dem_mx90, debido a la cantidad de datos este GRID no puede ser manejado desde ArcView 3.x por lo que todo este proceso se llevara acabo desde arcgis 9.2

1. Ejecute arcmap 9.2.
2. Abra el archivo dem_mx90.

3. Abra el arctool box , expanda las herramientas Data Management Tools\Projections and transformation\Define projection y seleccione proyección geográfica.
4. Reproyecte el raster en la opción Data Management Tools\Projections and transformation\Raster\Project Raster y re proyecte a Cylindrical Equal Área (World), el raster resultante guardarlo como dem_mx90m.
5. Expanda las herramientas Spatial Analyst Tools\Hydrology\Fill, del Arctoolbox y seleccione el raster dem_mx90m y llame al raster de salida fill_demmx90m.
6. Expanda las herramientas Spatial Analyst Tools\Hydrology\Flow Direction del Arctoolbox y seleccione el raster fill_demmx90m y llame al raster de salida flowdir_fill.
7. Expanda las herramientas Spatial Analyst Tools\Hydrology\Flow Accumulation del Arctoolbox y seleccione el raster flowdir_fill y llame al raster de salida acuflu_m.

En la **Figura 16** se muestra el GRID resultante para la República Mexicana. Los metadatos asociados pueden encontrarse en el **Anexo 17**. En consideración a que este conjunto de datos es de redistribución gratuita, puede encontrarse en la sección de datos del primer volumen del Atlas. En caso de utilizarlo, será necesario citar el Atlas tal cual aparece en los metadatos.

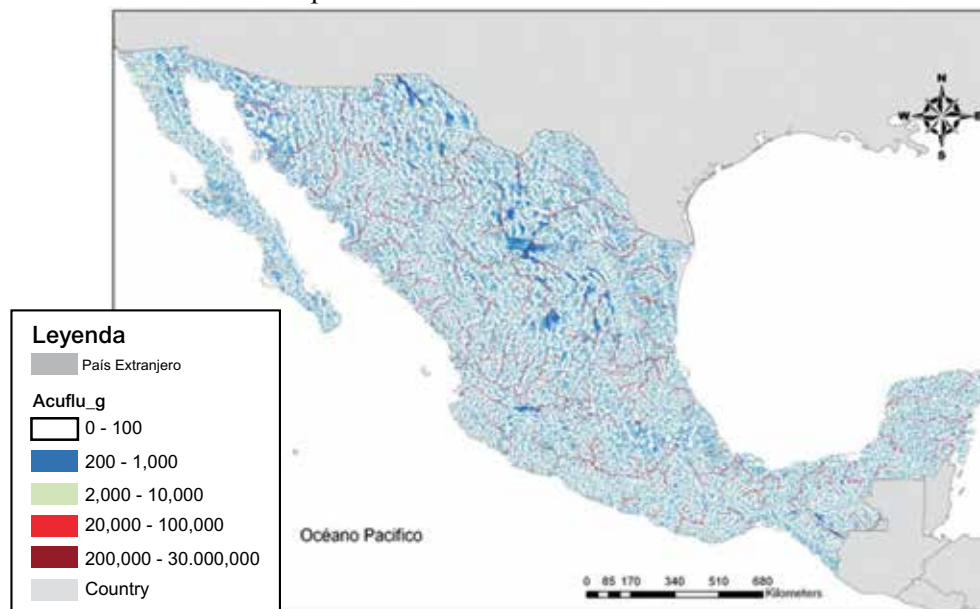


Figura 16. Acumulación de flujo en el área incluida en el E-Atlas de la OMS para los riesgos de desastres, aplicación en México

1.4.5 Cobertura de tierra

La capa de cobertura de suelo para la República Mexicana se obtuvo del conjunto de datos del inventario forestal a escala 1:250,000 producido por el INEGI. Se remplazaron los datos de uso de suelo y vegetación a escala 1:1,000,000 de INEGI, debido a que la escala del inventario forestal era de mejor resolución. La capa tendrá que ser reproyectada a unidades geográficas (**Anexo 2**). En este caso no fue necesario adaptar a los límites nacionales. Debido a que los datos necesarios ya los tenemos en la cobertura de suelo que nos proporciona INEGI lo único que se hizo es clasificarlos por el tipo de variable y el resultado se muestra en la **Figura 17** y la información asociada a esta capa se encuentra en el **Anexo 18**, el archivo resultante fue guardado con el nombre de **cober_suelo.shp**.

1.4.6 Precipitaciones máximas

El procedimiento empleado para generar los mapas de distribución de las precipitaciones máximas de distintos periodos de retorno (2, 5 y 10 años) es muy similar al utilizado para modelar la distribución del calor, tal cual se describe en el documento acerca de la *Metodología y proceso de implementación para modelar la distribución espacial del peligro por calor* disponible en el Atlas. Las únicas diferencias fueron que el factor climático que se espacializó era distinto y que la precipitación diaria máxima anual se obtuvo directamente a partir de cada estación meteorológica, sin necesidad de aplicar alguna fórmula en particular.



Figura 17. Distribución de la cobertura de tierra en el área incluida en el E-Atlas de la OMS para los riesgos de desastres, aplicación en México

El proceso que se siguió se resume a continuación:

1. Las precipitaciones máximas diarias anuales de las 164 estaciones localizadas al interior y en las inmediaciones de la República Mexicana, donde los registros de las precipitaciones abarcaron al menos siete años, se obtuvieron del resumen de superficie global del conjunto de datos por día producidos por el US National Climatic Data Center (NCDC) (Centro Nacional de Datos Climáticos) entre 1994 y 2005 (<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/climatedata/html>).
2. El análisis de frecuencia de Gumbel se utilizó para calcular los valores de precipitaciones máximas en los tres periodos de retorno seleccionados y para cada estación meteorológica.
3. Las variables empleadas para el índice de calor se seleccionaron también para explicar la distribución espacial de las precipitaciones máximas.
4. Las variables importantes la zona climática, así como el periodo de retorno se seleccionaron empleando el método de regresión por pasos.
5. El mapa de distribución de las precipitaciones máximas de cada periodo de retorno se generó empleando el modelo de regresión seleccionado.
6. Los mapas de distribución de las precipitaciones máximas resultantes de precipitaciones máximas de toda la República Mexicana fueron guardados con los nombres de mx_prec_2, mx_prec_5, mx_prec_8 y mx_prec_10.
7. Los resultados obtenidos tras la aplicación de este enfoque se presentan en la **Figura 18**, y los metadatos asociados pueden encontrarse en el **Anexo 19**.
8. Por ser de redistribución gratuita, estas capas pueden encontrarse en la sección de datos de primer volumen del E-Atlas de la OMS para riesgos de desastres, aplicación en México En caso de

hacer uso de los mismos, será necesario mencionar los créditos incluidos en los metadatos. Los modelos de regresión se encuentran en el **Anexo 20**.

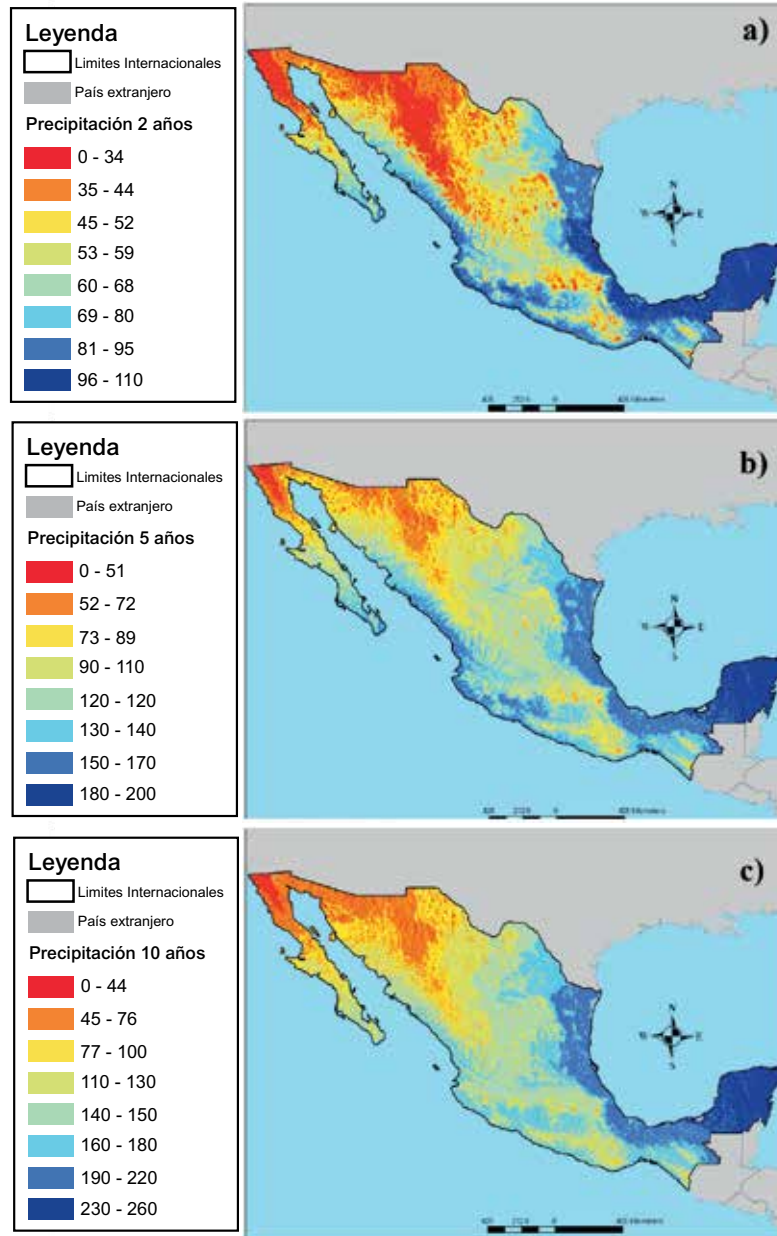


Figura 18. Distribución reclasificada de las precipitaciones máximas en el área incluida en el E-Atlas de la OMS para los riesgos de desastres, aplicación a México con periodos de retorno a los dos (a), cinco (b) y diez años (c)

CAPÍTULO II

Metodología y procesos de implementación para el peligro de inundaciones

2.1 Introducción

La metodología utilizada para la distribución del peligro de inundación combina los eventos históricos de inundaciones con la distribución espacial de los factores causales. Esta combinación permite el cálculo de cuentas ponderadas para cada factor causal. Luego se suma la distribución espacial de las cuentas ponderadas, para obtener la distribución del índice de peligrosidad por inundaciones (FHI, por sus siglas en inglés), antes de ser reclasificadas para obtener la distribución espacial del nivel de intensidad de peligrosidad por inundaciones y los mapas de la distribución de peligros por inundación para México. Los métodos y procesos que se presentan en este documento se podrían aplicar a otros países, áreas y regiones geográficas, a condición de que los análisis utilicen datos geoespaciales con calidad y resolución similar o superior.

2.2 Metodología

Durante los últimos 20 años, se han realizado numerosas investigaciones con el fin de identificar las técnicas para generar los mapas del peligro de inundaciones. Estas técnicas, mismas que se presentan en esta sección, incluyen el análisis de frecuencia de datos hidrometeorológicos, el modelado hidráulico, el modelado hidrológico y los métodos estadísticos.

El análisis de frecuencia de los datos hidrometeorológicos utiliza los datos históricos de inundaciones para calcular la probabilidad y la extensión de eventos de inundaciones futuras a diferentes intervalos (10, 50, 100 y 500 años) [McKerchar y Pearson, 1990; Gabriele y Arnell, 1991; Pearson, 1991; Sarma, 1999; Kjeldsen y colaboradores, 2002; Kroll y Vogel, 2002]. Este procedimiento requiere datos históricos, meteorológicos y del flujo de las corrientes apropiadas que permitan al análisis estadístico lograr un nivel aceptado de confiabilidad. De manera adicional, los cambios en los flujos de las corrientes y de las inundaciones, provocadas por la regulación de las presas, las mejoras a los canales (diques) o los cambios en el uso del suelo, limitan la utilidad de los datos históricos, puesto que ya no existen los parámetros físicos que existían cuando las inundaciones ocurrieron. Debido a estas dos desventajas, en este protocolo no se utiliza el análisis de la frecuencia de las inundaciones.

Los modelos hidráulicos convierten los valores de los flujos de descarga en profundidad de ríos o de inundaciones. El modelo del sistema de análisis de ríos del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC-RAS, Hydrologic Engineering Center's river analysis system), desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC) del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EUA (USACE, U.S. Army Corps of Engineers) calcula y estima la duración y la extensión de la inundación, los cambios en la profundidad y la velocidad del agua a través del tiempo en cualquier lugar, basándose en las mediciones de los flujos inestables a través de una red de ríos [USACE, 2001a; USACE, 2001b]. Los datos siguientes se requieren para calcular estimaciones viables de las inundaciones utilizando el modelo HEC-RAS: un modelo digital de elevación (MDE) de alta resolución, un modelo de las redes de las corrientes, las geometrías transversales detalladas de los canales y de las planicies de aluvión adyacentes y los parámetros de la longitud del flujo. A pesar de que este modelo proporciona resultados acertados y procesables en lo referente a pequeñas áreas de captación, es muy difícil aplicar este modelo a un área geográfica grande, tal como un país, debido a los requerimientos de datos robustos de entrada.

Los modelos hidrológicos emplean cálculos matemáticos con valores conocidos o asumidos de los diversos componentes del ciclo hidrológico para analizar el comportamiento de los flujos de las corrientes y de las inundaciones en una cuenca específica. Los modelos hidrológicos se pueden dividir en modelos deterministas, que se basan en parámetros y procesos físicos específicos, y en modelos

estocásticos, que permiten la variabilidad probabilística tanto en los parámetros como en los procesos [Storm, 1989; Meijerink y colaboradores, 1994; Mannaerts, 1996; Viessman y Lewis, 1996; Venkatesh y Jain, 1997; Seth, 1999; Al-Rawas y colaboradores, 2001; Nyarko, 2002]. Estos modelos requieren una calibración cuidadosa y precisa para producir estimaciones certeras de las áreas propensas a las inundaciones. La calibración de un modelo hidrológico para México o la región de América Latina entera, por ejemplo, se llevaría un tiempo enorme.

Los métodos estadísticos combinan la frecuencia histórica de las inundaciones y la distribución de los factores causales de las inundaciones con el fin de predecir cuáles áreas tienen la probabilidad de inundarse, dentro de cierta área geográfica. Este método permite calcular un índice del peligro de inundaciones (FHI) en base a las puntuaciones ponderadas de los factores causales y a las distribuciones históricas de las inundaciones [Islam y Sado, 2000].

Los primeros tres métodos aquí descritos requieren recursos y datos que van mucho más allá del marco del proyecto actual; por lo tanto, finalmente se decidió utilizar un método estadístico para “espacializar” la distribución del nivel de intensidad del peligro de inundaciones en la República Mexicana.

Entre los métodos estadísticos que ya se encuentran desarrollados, el que emplearon Islam y Sado [2000] en Bangladesh presenta varias ventajas:

1. Produce estimaciones realistas sin utilizar un modelo empírico.
2. Requiere distribuciones históricas de las inundaciones y datos de los factores causales que son fácilmente asequibles en el caso de la República Mexicana entera.
3. Se puede aplicar con facilidad con las tecnologías de sistemas de información geográfica (GIS) empleadas a través de todo el desarrollo de este Atlas.
4. Toma en consideración tanto a la susceptibilidad de cada área a las inundaciones, como a los factores relacionados con la gestión de emergencias por inundaciones.

La implementación de este método pasa por la aplicación de las siguientes etapas (**Figura 19**):

1. Identificación de los factores causales.
2. Clasificación del mapa de la distribución del número de eventos de inundaciones pasadas.
3. Estimación de la puntuación ponderada de cada uno de los factores causales, cruzando a estos datos con la capa reclasificada de la frecuencia de inundaciones.
4. Estandarización de las puntuaciones ponderadas, agregación y clasificación del mapa resultante para obtener la distribución espacial del nivel de intensidad del peligro de inundaciones.

2.2.1 Identificación de los factores causales

La metodología descrita en este documento utiliza un índice compuesto del peligro de inundaciones basado en cinco factores causales. Los factores que aquí se presentan se seleccionaron en base a diferentes estudios relevantes en el territorio mexicano.

La cobertura del suelo. Ésta describe la apariencia del paisaje y, por lo general, se clasifica por la cantidad y el tipo de su vegetación, la cual es un reflejo de su uso, ambiente, cultivo y fenología estacional. La cobertura del suelo tiene una influencia directa sobre diversos parámetros del ciclo hidrológico, incluyendo: el comportamiento de la interceptación, la infiltración, la concentración y la escorrentía y, por lo tanto también influye de manera indirecta sobre las inundaciones. Estas características en conjunto producen la información sobre la respuesta hidrológica y el grado del peligro de inundaciones. [Sarma, 1999; Islam y Sado, 2000; Nyarko, 2002; Todini y colaboradores, 2004; Bapalu y Sinha, 2005].

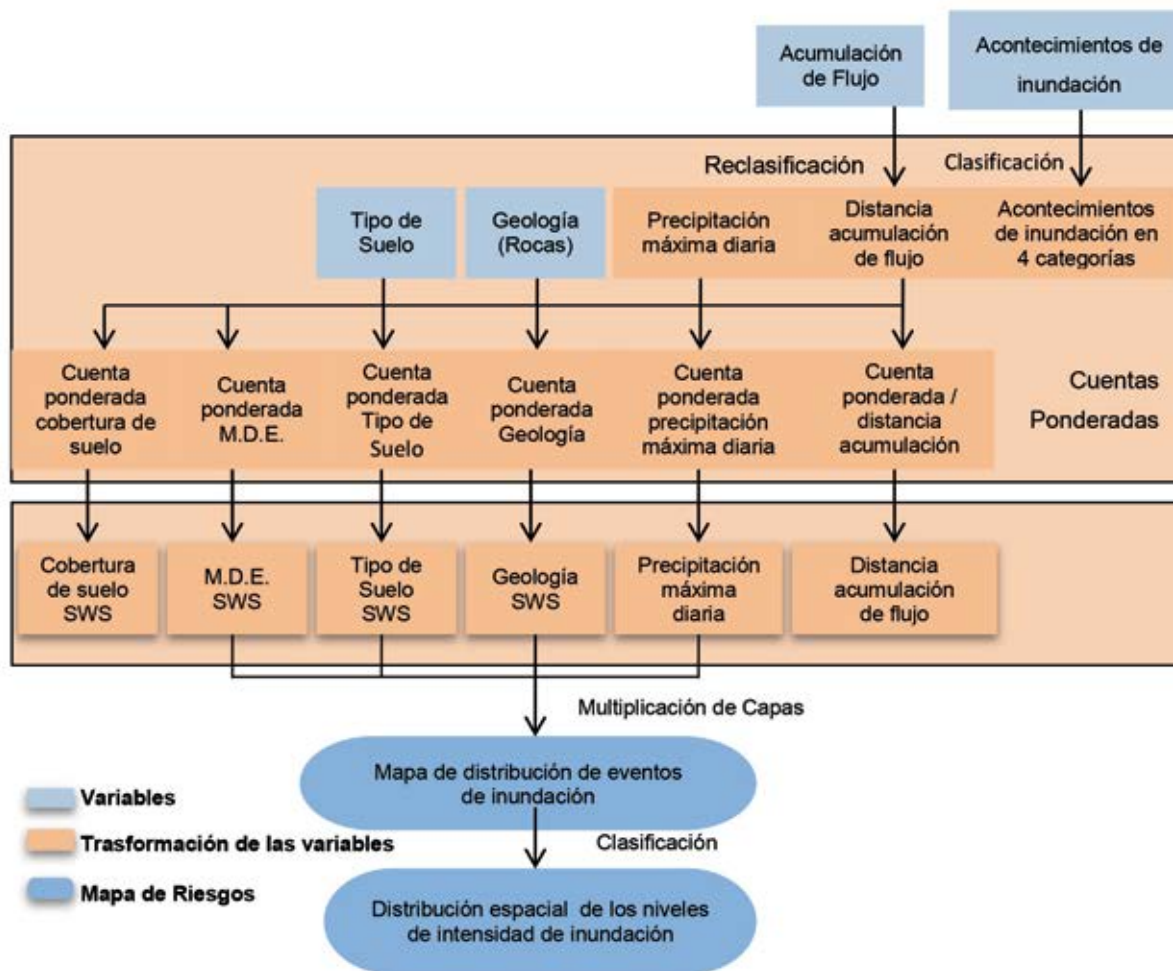


Figura 19. Metodología para generar la distribución espacial de los niveles de intensidad del peligro de inundaciones

La elevación. La probabilidad de que se presente una inundación aumenta a medida que disminuye la elevación de cierto lugar, lo que la convierte en un indicador confiable de la susceptibilidad a las inundaciones [Islam y Sado, 2000; Al-Rawas et al., 2001; Nyarko, 2002; Sanyal y Xi Lu, 2003; Shrestha, 2004; Todini et al., 2004; UNDP, 2004; Bapalu y Sinha, 2005; Peduzzi et al., 2005].

El tipo y la textura del suelo. Nyarko [2002] y Todini y colaboradores [2004] reportan que el tipo y la textura del suelo desempeñan un papel en la determinación de las características del área en cuanto a la retención y la infiltración del agua y, en consecuencia afectan la susceptibilidad a las inundaciones.

La litología. La naturaleza macroscópica de un área puede influir sobre su susceptibilidad a las inundaciones. Las áreas que están compuestas de una geología superficial altamente impermeable son más susceptibles a inundarse [Islam y Sado, 2000], en su lugar se utilizó la geología superficial.

El volumen y la distancia de la trayectoria de la acumulación de los flujos. Las áreas ubicadas cerca de la trayectoria de la acumulación de los flujos tienen una mayor probabilidad de inundarse, en especial cuando se ha acumulado un gran volumen corriente arriba [Islam y Sado, 2000; Al-Rawas et al., 2001; Nyarko, 2002; Todini et al., 2004; Bapalu y Sinha, 2005]. Estos dos factores se combinaron en uno solo dentro del contexto del presente trabajo.

La acumulación de flujo está calculado para cada pixel mediante el número de pixeles corriente arriba que drenan hacia el pixel en cuestión. Los pixeles del raster con valores altos de acumulación de los flujos son áreas de flujo concentrado y se identifican como los canales del cauce, de acuerdo con el umbral especificado de la acumulación de los flujos. Los pixeles con valores de cero en la acumulación de los flujos son las alturas topográficas o sierras.

Se debe seleccionar un umbral de acumulación de los flujos para poder estimar la red de corrientes a partir de una capa de acumulación de los flujos. El umbral es el número mínimo de pixeles que tienen que drenar a un pixel para que se determine que ésta última forma parte de la red de corrientes. El empleo de un umbral más bajo de acumulación de los flujos da como resultado una red de corrientes más detallada (y computacionalmente intensiva).

En las publicaciones especializadas no existe un consenso sobre el valor del umbral ideal para reproducir las redes de corrientes reales. En la práctica, la determinación del umbral es un proceso interactivo, en el cual se utilizan diversos valores, hasta lograr la resolución deseada de la red de corrientes. En este protocolo, después de probar numerosos umbrales, se utilizó un valor de umbral de 100 pixeles (comparable a un área de desagüe de 100 km²).

Una vez establecido el umbral, los pixeles con acumulaciones de flujo superiores al umbral se denominan pixeles del “canal de cauce” y las mismas conformarán la red de corrientes estimada. Finalmente, la red de corrientes se amortigua para determinar la distancia de cierto lugar respecto al canal de cauce más cercano.

La precipitación. La probabilidad de inundaciones aumenta a medida que se incrementa la cantidad de lluvia y nieve en cierto lugar [Nyarko, 2002; Todini et al., 2004]. En este estudio, se utilizó la precipitación diaria máxima anual con un periodo de retorno de 5 años que se calculó empleando el método de Gumbel para el análisis de la frecuencia.¹

2.2.2 Clasificación de los mapas de distribución del número de eventos pasados de inundaciones y de los factores causales

La distribución espacial del número de eventos pasados de inundaciones observados entre 1985 y 2005, que se puede considerar como una medida de la frecuencia de las inundaciones, se clasificó en cuatro niveles específicos de peligro histórico (**Tabla 1**).²

Tabla 1. Correspondencia entre el número de eventos de inundaciones pasadas y el nivel de peligro histórico de inundaciones.

Número de eventos pasados de inundaciones 1985–2009	Peligro histórico de inundaciones
0	Sin peligro
1–4	Bajo
5–9	Medio
> 9	Alto

¹ Para mayor información sobre la implementación de este método, favor de consultar el capítulo 1 del libro.

² Para mayor información sobre la creación del mapa de la distribución de los eventos pasados de inundaciones, favor de consultar el capítulo 1.

De manera similar, los demás factores causales se reclasificaron en clases ordinales siguiendo el proceso que se presenta en la Metodología y procesos de implementación para el peligro de inundaciones.

2.2.3 Estimación de las puntuaciones ponderadas

Los factores causales se ponderan en base a su correlación espacial con la distribución de los peligros históricos de inundaciones. Al cruzar el mapa de distribución reclasificada de la frecuencia de las inundaciones con cada GRID de distribución de cada factor causal, se obtiene la distribución, en porcentaje del área, de cada clase/categoría, de acuerdo con la clasificación del peligro histórico de inundaciones.

Después se calculó la puntuación ponderada de cada categoría como la suma de los productos entre el porcentaje del área de la categoría por cada nivel de peligro histórico de inundaciones y el coeficiente del daño asociado, por medio de la ecuación siguiente [Islam, 2000]:

Ecuación 2.1

$$\text{puntuación ponderada} = (0 \times a) + (1 \times b) + (3 \times c) + (5 \times d)$$

donde:

a = el porcentaje del área de la categoría, en las áreas sin peligro histórico de inundaciones.

b = el porcentaje del área de la categoría, en las áreas con un peligro histórico bajo de inundaciones.

c = el porcentaje del área de la categoría, en las áreas con un peligro histórico medio de inundaciones.

d = el porcentaje del área de la categoría, en las áreas con un peligro histórico alto de inundaciones.

0, 1, 3, 5 = los coeficientes del daño correspondiente ligado a cada clase específica de peligro histórico de inundación, para expresar la severidad de cada nivel de peligro histórico de inundaciones.

2.2.4 Estandarización de las puntuaciones ponderadas

Después de haber calculado las puntuaciones ponderadas de todas las categorías de un factor, estas puntuaciones se estandarizaron y se volvió a establecer su escala en clases ordinales, de acuerdo con una escala del 1 al 3, en la cual el 1 indica las categorías con la probabilidad mínima y el 3, las categorías con la probabilidad máxima de que ocurra una inundación en un área determinada.

2.2.5 Creación del mapa de distribución del nivel de intensidad del peligro de inundaciones

El mapa de distribución de cada uno de los factores causales se volvió a clasificar para que contuviera la distribución de la puntuación ponderada estandarizada correspondiente antes de combinarlo utilizando el método de superposición multiplicativa. El método multiplica la puntuación de todos los factores causales, por cada pixel, para producir la distribución del índice del peligro de inundaciones. Por último, el mapa de distribución del índice del peligro de inundaciones se reclasificó en cinco niveles de intensidad (muy baja, baja, media, alta y muy alta) utilizando un esquema de rupturas naturales. El esquema de rupturas naturales (Natural Break) determina los puntos de ruptura entre las clases, al analizar cómo se agrupan los datos. Las fronteras de las clases se establecen en donde existen saltos relativamente grandes en los valores de los datos.

2.3 Implementación de la metodología

Este capítulo describe cómo se implementa la metodología que se presentó en el capítulo 2.2, utilizando el software que se describe en la sección 2.3.1. Los nombres de los archivos aparecen en negrita en el texto; cuando aparece un “*” al final del nombre de un archivo, éste indica un dato de entrada que se describe en el capítulo 1 del presente libro.

2.3.1 Software requerido

La implementación de la metodología y los procesos presentados en este documento requiere el software siguiente: ArcView 3,x, extensión Analyst 1.1, ArcGIS 9.X, Spatial Analyst desarrollados por el Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales (ESRI, Environmental Systems Research Institute, Inc.), para operaciones geoespaciales.

Microsoft Excel para estandarizar y establecer la categoría de las puntuaciones ponderadas.

También se utilizaron los siguientes scripts para ArcView 3.x, mismos que se pueden conseguir sin costo por Internet, en la página de ArcScripts del ESRI <http://arcscripsts.esri.com/>, o bien, en la sección de *Herramientas* que se localiza en el primer volumen del Atlas:

- a) Grid Analyst (GridAnalyst.avx)
- b) XTools (XTOOLS.MH.avx)
- c) Grid and theme projector v.2 (grid_theme_prj.avx)
- d) Grid Transformation Tool (sptrnsfrm.avx).

Estos scripts se deben cargar en ArcView antes de aplicar cualquiera de los procesos descritos en las secciones siguientes.

2.3.2 Preparación de los factores causales

Esta sección describe el proceso que se aplica a las diferentes capas de datos de entrada para obtener la distribución espacial de los factores causales.

2.3.2.1 Conversión de los datos vectoriales a raster

Los siguientes pasos se ejecutan para convertir las capas basadas en vectores (tipo de suelo, textura del suelo y litología) a raster.

1. Cargue en una vista de ArcMap 9.x las diferentes capas vectoriales.
2. Convierta el archivo con formato shape (shapefile) (**tipo_suelo.shp***) en el tema activo.
3. Utilice la función del menú Spatial Analyst>Convert>Feature to Raster.
4. En la primera opción, asigne el shapefile a ser convertido.
5. Elija en la siguiente opción el campo del shapefile que será utilizado para la conversión, en este caso sería “Nom_suel”.
6. En el caso de la dimensión de los píxeles del raster Output cell size, elija 0.00074997°, que corresponde a 90 mts en el Ecuador y que es la resolución seleccionada.
7. En la última opción seleccione la ruta y el nombre del archivo raster y luego haga clic en OK.
8. Repita los pasos 2 al 7 en las demás capas basadas en los vectores (shapefiles) y guarde el archivo resultante con algún nombre apropiado (p.e., **geology_mx**, **cobersuelo**, **texsuelo_mx**).

2.3.2.2 Cálculo de la distancia de la trayectoria de la acumulación de los flujos

En esta sección, la distancia de la trayectoria de la acumulación de los flujos que presenta un volumen mínimo de acumulación de los flujos se calcula tomando en consideración que el volumen acumulado

desempeña un papel sobre la distancia que puede ser cubierta por una inundación: a mayor volumen, mayor distancia.

2.3.2.2.1 Eliminación de los valores mínimos de la acumulación de los flujos

Los pasos siguientes se utilizan para mantener únicamente los píxeles que presenten un valor de acumulación de los flujos superior a 1,000 (m²).

1. Cargue el raster de la distribución de la acumulación de los flujos (**acuflu_m***) en ArcGIS 9.x.
2. Utilice la función Spatial Analyst>Reclassify en el menú Spatial Analyst y, en la ventana reclassify, especifique que desea convertir a “NoData” los valores de la acumulación de los flujos entre 0 y 1000 y convertir a “1” todos los demás valores, excepto los NoData. El raster resultante, por sistema, recibe el nombre **reclasfa_MX**.
3. Utilice la función Spatial Analyst>Raster Calculator e ingrese la fórmula siguiente en la ventana: (**[reclasfa_MX]*[acuflu_m]**). Esto mantendrá un raster que contenga únicamente los píxeles que presentaron un valor superior a 1000.
4. Guarde el raster resultante como **faMX_str**, dando un clic derecho sobre el raster resultante y en el menú emergente seleccionar Data\Export Data, seleccione la localización y cambie el nombre del archivo y por último un clic en save.

2.3.2.2.2 Cálculo de la distancia según el volumen acumulado de agua


La clasificación del raster de la distribución de la acumulación de los flujos en clases y la distancia efectiva de dichas clases se calculan por separado, como se detalla a continuación.

1. Cargue el raster **faMX_str** a la vista.
2. Reclassifique el raster **faMX_str** en cuatro clases ordinales que correspondan a la superficie a donde cada píxel está drenando, empleando la función Spatial Analyst>Reclassify y la información que se presenta en la **Tabla 2**.
3. Guarde el resultado de la reclasificación como **faMX_cl**.
4. Proyecte el raster **faMX_cl** de geográfica a cilíndrica, empleando el proceso que se describe en el **Anexo 21**.

Tabla 2. Cuadro que se utiliza para la reclasificación del raster activa de la distribución de la trayectoria de la acumulación de flujos

Rango del volumen acumulado	Clases ordinales después de la reclasificación	Nivel correspondiente de la acumulación
1000–10 000	1	Muy bajo
10 000–50 000	2	Bajo
50 000–100 000	3	Medio
> 100 000	4	Alto

5. Guarde el raster resultante como **faMX_cl_m**.
6. Abra el cuadro de atributos de **famx_cl_m** y seleccione todos los registros que presenten un valor de “1” en la columna de valores.
7. Utilice la función Spatial Analyst>Distance\Straight Line para crear un raster que contenga las distancias de los píxeles elegidos, seleccionando en la primera ventana las especificaciones siguientes:
 - Distance To, como **Raster faMX_cl_m**

- Output Cell Size, como **90**
 - Output Raster seleccione la ruta donde será almacenado el archivo con el nombre **MX_dist1**.
8. Cambie la proyección del raster **MX_dist1** de la cilíndrica a la geográfica, siguiendo los pasos que se presentan en el **Anexo 22**.
 9. Corte el raster sin proyectar a las fronteras internacionales (**border_mx.shp**), por medio de los pasos siguientes:
 - agregue el shapefile **border_mx.shp** a la vista.
 - convierta el raster **MX_dist1** en el tema activo y utilice de un clic en el botón de arctool box de ArcGIS 9.x  expanda las opciones de Spatial Analyst Tools>Extraction>Extract by mask.
 - En input raster seleccione MX_dist, en la opción Input Raster or feature mask data seleccione el archivo border_mx.shp.
 - En la opción Output raster seleccione la ruta donde será almacenado el raster y guárdelo con el nombre de **faMX_dist1_g**, dar un clic en OK.
 10. Repita los pasos 6 al 10 para las demás clases de acumulación de los flujos (2, 3 y 4), y guarde el resultado como **faMX_dist2_g**, **faMX_dist3_g** y **faMX_dist4_g**.

2.3.3 Clasificación del mapa de la distribución del número de eventos de inundaciones históricas

Emplee el proceso siguiente para reclasificar el mapa de distribución del número de eventos históricos de inundaciones de acuerdo con grupos ordinales que se pueden utilizar en el proceso.


1. Convierta el raster **nbr_fe_mex** en el tema activo en la vista.
2. Utilice la función para reclasificar el raster de acuerdo con la **Tabla 3**.
3. Guarde el resultado como **nbr_femex_cl**.
4. Se tendrá que modificar el tamaño del pixel del raster para esto utilizaremos la opción *Resample*, para esto utilizaremos el arctool box dando un clic en el icono 

Tabla 3. Cuadro que se utiliza para la reclasificación del número de eventos pasados de inundaciones en clases ordinales

Número de eventos pasados de inundaciones 1985–2005	Clase Ordinal
0	1
1–3	2
4–7	3
>7	4

5. Seleccionar la herramienta Data management tools>Raster>Resample
6. En la opción Input Raster Seleccionar el **nbr_femex_cl**, en la siguiente opción Output Raster Dataset seleccionar la ruta y nombre del nuevo raster en este caso **nbr_femex_90**, en la opción output cell size poner el tamaño del nuevo raster 0.00074997 y en la última opción NEAREST, dar un clic en OK.

2.3.4 Estimación de las puntuaciones ponderadas del rango o categoría de cada factor causal

Esta sección describe cómo se calculan las puntuaciones ponderadas de cada factor causal.

2.3.4.1 Puntuaciones ponderadas de los factores diferenciados

Estos son los pasos a seguir en relación a la distribución de los factores diferenciados (la cobertura del suelo, el tipo de suelo, o la geología).

1. En una vista, despliegue el raster de distribución del número reclasificado de los eventos pasados de inundaciones (**nbr_femex_90**) y también el primer raster de la distribución de los factores causales (p.e., **lc_MX**, en el caso de la cobertura del suelo).
2. Utilice la función Analysis>Tabulate Areas y en la ventana “Tabulate Área” especifique lo siguiente:
 - a) seleccione el raster **lc_MX** bajo “Row Theme” y especifique “Value” como el campo “Row Field”.
 - b) seleccione el raster) **nbr_femex_cl** bajo “Column Theme” y elija “value” como el campo “Column Field”; haga clic en OK.

El resultado del paso 2 es un cuadro titulado *Areas of nbr_femex_90 Tabulated for Each Zone in lc_MX*, que contiene *n* filas y cinco columnas: *Value*, *Value-1*, *Value-2*, *Value-3* and *Value-4*. Como ejemplo, la porción sin llenar de la **Tabla 4** muestra el área de cada tipo de cobertura del suelo en cada clase de peligro histórico de inundaciones (frecuencia de inundaciones), medido en grados cuadrados para la República Mexicana.

3. Utilice la función File>Export para exportar el cuadro de tabulación cruzada resultante como un archivo *.dbf y guarde el nuevo archivo exportado como **tabulate_area_nbr_femex_cl-lc_MX.dbf**.
4. En Microsoft Excel, abra el archivo **tabulate_area_nbr_femex_cl-lc_MX.dbf**.
5. Asigne el nombre de “Suma” a la siguiente columna adyacente (mostrada en el **Tabla 4**) y calcule el área total ocupada por cada categoría de la cobertura del suelo sobre el área de estudio, sumando el área de esta categoría observada en cada nivel de peligro histórico de inundaciones.

Tabla 4. Distribución del área por los diferentes niveles de peligro histórico de inundaciones y por las diferentes categorías de cobertura del suelo observadas en la Republica Mexicana.

Categoría de la cobertura de la tierra	Nivel de peligro histórico de inundaciones				Suma
	Valor-1 (sin peligro)	Valor-2 (peligro bajo)	Valor-3 (peligro medio)	Valor-4 (peligro alto)	
0	0.000	0.006	0.000	0.000	0.006
1	0.131	10.485	9.442	0.021	20.079
2	0.513	13.320	6.089	0.001	19.923
3	0.000	0.010	0.010	0.000	0.020
4	0.076	5.362	1.205	0.000	6.643
5	0.602	8.552	2.823	0.000	11.977
6	0.500	7.141	1.291	0.000	8.932
7	0.000	0.578	0.901	0.000	1.479
8	0.003	5.445	3.073	0.000	8.521
9	0.554	11.649	6.059	0.000	18.262
10	0.029	2.536	0.115	0.000	2.680
11	3.882	43.361	1.083	0.000	48.326
13	0.452	14.868	1.551	0.000	16.871
14	0.052	1.140	0.716	0.001	1.909
15	0.376	4.154	0.277	0.000	4.807
16	0.069	0.807	0.054	0.000	0.930
17	0.020	0.754	0.326	0.000	1.100
18	0.019	0.624	0.390	0.001	1.034

6. Calcule el porcentaje correspondiente de la distribución del área de cada una de las categorías de cobertura del suelo por nivel de peligro histórico de inundaciones, dividiendo el porcentaje del área observado en cada nivel entre el área sumada observada en la categoría de la cobertura del suelo. Por ejemplo, el porcentaje del área de la categoría 1 de la cobertura del suelo, ubicado en el nivel “sin peligro histórico”, es: $(0.045 / 0.938) \times 100 = 4.797$. En la **Tabla 5** aparecen los resultados de esta operación para las categorías de cobertura del suelo que se presentan en la **Tabla 4**.
7. Calcule la puntuación ponderada utilizando la fórmula que se muestra en la ecuación 1 (vea la sección 2.2.3). Los resultados por categorías de la cobertura del suelo se presentan en la **Tabla 5**.
8. Guarde el cuadro final **lc_sws.dbf**.
9. Repita los pasos 1 al 8 para los demás mapas de distribución de los factores causales diferenciados, utilizando nombres de archivos apropiados para identificar a los archivos resultantes.

2.3.4.2 Puntuaciones ponderadas de los factores continuos

Aunque el cálculo de las puntuaciones ponderadas de los datos continuos (la elevación, la distancia de la acumulación de los flujos y la precipitación diaria máxima anual) es similar al cálculo de los factores diferenciados, los mapas de distribución se tienen que reclasificar primero en rangos de valores apropiados, antes de proceder a la ponderación. El proceso que se sigue para esta reclasificación se presenta en las secciones siguientes.

Tabla 5. Cálculo de las puntuaciones ponderadas por cada categoría de la cobertura del suelo

Categoría de la cobertura de la tierra	Sin peligro (A)	Peligro bajo (B)	Peligro medio (C)	Peligro alto (D)	Puntuación ponderada
0	0.000	100.000	0.000	0.000	100.000
1	0.652	52.219	47.024	0.105	193.814
2	2.575	66.857	30.563	0.005	158.570
3	0.000	50.000	50.000	0.000	200.000
4	1.144	80.717	18.139	0.000	135.135
5	5.026	71.404	23.570	0.000	142.114
6	5.598	79.948	14.454	0.000	123.309
7	0.000	39.080	60.920	0.000	221.839
8	0.035	63.901	36.064	0.000	172.092
9	3.034	63.788	33.178	0.000	163.323
10	1.082	94.627	4.291	0.000	107.500
11	8.033	89.726	2.241	0.000	96.449
13	2.679	88.128	9.193	0.000	115.707
14	2.724	59.717	37.507	0.052	172.499
15	7.822	86.416	5.762	0.000	103.703
16	7.419	86.774	5.806	0.000	104.194
17	1.818	68.545	29.636	0.000	157.455
18	1.838	60.348	37.718	0.097	173.985

2.3.4.2.1 Puntuaciones ponderadas de las capas de distribución de la elevación (MDE) y de la precipitación máxima

Los mapas de distribución de la elevación y la precipitación máxima en un periodo de retorno de cinco años se clasifican en nueve categorías, empleando el Método de Rupturas Naturales (Natural Break) (al que también se hace referencia como el Método de Rupturas Óptimas y el Método de Jenks). Esta técnica de clasificación identifica los puntos de ruptura entre las clases, basándose en el patrón natural en el cual se agrupan los datos. Los límites de las clases se establecen en donde existen saltos relativamente grandes en los valores de los datos. Este método se aplicó de la manera siguiente:

1. En ArcView, cargue en una vista los rasters de distribución de la elevación (**demMX_90**) y de la precipitación máxima (**precMX_5**).
2. Convierta el raster de elevación (**demMX_90**) en el tema activo.
3. Utilice la función del menú Spatial Analyst>Reclassify y especifique lo siguiente en la ventana "Reclassify":
 - a) Haga clic en el botón Classify, espere a que aparezca la ventana de clasificación y cambie la disposición a que se lea "Natural Breaks" en Type y "9" en Number of Classes. Haga clic en OK.
 - b) En la opción Output Raster seleccione la ruta y nombre del archivo como demMX90_cl
4. Use el mismo proceso como el que se describió en la sección 2.3.4.1 para estimar la puntuación ponderada.
5. Repita los pasos 1 al 4 para el raster de distribución de la precipitación máxima.
6. Se tendrá que modificar el tamaño del pixel del raster de precipitación máxima para esto utilizaremos la opción Resample, para esto utilizaremos el arctool box dando un clic en el icono.
7. Seleccionar la herramienta Data management tools>Raster>Resample.
8. En la opción Input Raster Seleccionar el nbr_femex_cl, en la siguiente opción Output Raster Dataset seleccionar la ruta y nombre del nuevo raster en este caso nbr_femex_90, en la opción output cell size poner el tamaño del nuevo raster 0.00074997 y en la última opción NEAREST, dar un clic en OK.

2.3.4.2.2 Puntuaciones ponderadas de la distancia de la capa de distribución de la acumulación de los flujos

Cada una de los raster creados en la sección 2.3.2.2.2 se reclasifica de acuerdo con tres clases de probabilidad de inundaciones, como se muestra en la **Tabla 6**, para tomar en cuenta al mismo tiempo la distancia a la trayectoria de la acumulación de los flujos y el volumen acumulado de agua a lo largo de la misma. En este aspecto, una acumulación de los flujos de nivel alto potencialmente tendrá un impacto a una mayor distancia de la trayectoria de la acumulación de los flujos, que una acumulación de flujos de nivel bajo.

Las publicaciones especializadas no proporcionan indicaciones sobre los rangos óptimos a utilizar; los valores que se muestran en la **Tabla 6**, por lo tanto, reflejan las opciones que producen un comportamiento racionalizado en el proceso de modelado. El proceso siguiente se utiliza para la reclasificación.

1. Cargue a una vista los raster **MX_dist1**, **MX_dist_2**, **MX_dist3** y **MX_dist4** (consulte la sección 2.3.2.2.2).
2. Convierta el raster **MX_dist1_g** en el tema activo.
3. Utilice la función del menú Spatial Analyt>Reclassify para reclasificar el raster de acuerdo con las clases que se presentaron en la **Table 5** para el nivel muy bajo de la acumulación de los flujos.
4. Guarde el resultado como **MX_R1**.

Tabla 6. Cuadro que se utiliza para la reclasificación de los raster que contienen la distancia a la trayectoria de la acumulación de los flujos, por las cuatro clases de la acumulación de los flujos

Clase de la acumulación de los flujos	Proximidad a la acumulación de los flujos (mts)	Clase de la probabilidad de inundaciones
4: Alta	Intervalos 0– 720	3
	Intervalos 720–1800	2
	Intervalos >1800	1
3: Media	Intervalos 0– 450	3
	Intervalos 450– 900	2
	Intervalos > 900	1
2: Baja	Intervalos 0– 270	3
	Intervalos 270– 360	2
	Intervalos >360	1
1: Muy baja	Intervalos 0– 90	3
	Intervalos 90– 180	2
	Intervalos >180	1

5. Repita los pasos 1 al 4 en los demás raster y guarde los resultados como **MX_R2**, **MX_R3** y **MX_R4**.
6. Derive la clase de probabilidad máxima entre los cuatro raster reclasificados (**MX_R1**, **MX_R2**, **MX_R3**, y **MX_R4**), utilizando el siguiente proceso:
 - a) verifique que la extensión Grid Transformation Tool esté cargada en ArcView.\
 - b) utilice la función Transform Grid>Combine para combinar los raster **MX_R1**, **MX_R2**, **MX_R3**, y **MX_R4**.
 - c) asigne el nombre de **combin_y** al raster resultante. El raster resultante contendrá los valores de las clases de susceptibilidad de cada raster, en columnas separadas R1, R2, R3 y R4.
 - d) convierta a **combin_y** en el raster activa y abra su cuadro de atributos.
 - e) agregue un campo denominado “max” en este cuadro de atributos.
 - f) seleccione el encabezado de la columna “max” y haga clic sobre el botón “calculate”.
 - g) escriba la fórmula siguiente en la ventana de la calculadora: [R1] Max [R2] Max [R3] Max [R4].
 - h) utilice la función Analysis>Map Calculator y teclee la formula siguiente en la ventana: [combin_y.max] para crear un raster en la cual cada pixel contenga el valor máximo de la probabilidad de inundaciones observada entre las diferentes columnas creadas según el inciso c.
 - i) guarde el raster resultante como **MX_fa_cl**.
 - j) utilice el mismo proceso que se describió en la sección 2.3.4.1 para estimar la puntuación ponderada.

2.3.5 Estandarización de las puntuaciones ponderadas de cada factor causal

El paso siguiente consiste en utilizar la técnica de interpolación lineal para estandarizar las puntuaciones ponderadas de cada factor causal para permitir su combinación. En este proceso, todos los factores causales se estandarizan de acuerdo con una escala que va del 1 al 3, en la cual el 1 representa la probabilidad mínima de que ocurra una inundación en cierta área y el 3 la máxima. El proceso es el siguiente (**Tabla 7**).

1. En Microsoft Excel, abra el archivo **lc_ws.dbf**.


2. Calcule el valor mínimo y el valor máximo de la columna de la puntuación ponderada, utilizando la función min y max y coloque los resultados en la parte inferior de esta columna. Si nos referimos a la **Tabla 7**, como ejemplo, $x_{min} = 66.667$ y $x_{max} = 249.087$.
3. Agregue una nueva columna a la derecha y nómbrela “SWS” (Standardized Weighted Scores) para que contenga los resultados del cálculo de las puntuaciones ponderadas estandarizadas.
4. Especifique que $y_{min} = 1$ and $y_{max} = 3$ en la parte inferior de esta nueva columna.
5. Bajo la columna “puntuación ponderada” utilice la función pendiente e intersección para calcular estos dos parámetros sobre el valor de la puntuación ponderada.
6. Elija las celdas donde están insertadas las y_{min} y y_{max} como “y_conocido” y seleccione las celdas que contengan las x_{min} y x_{max} como “x_conocido” y oprima “aceptar”.
7. Aplique el valor pendiente e intersección a cada una de las puntuaciones ponderadas, utilizando esta fórmula:
Entero ($[\text{pendiente} \times \text{puntuación ponderada}] + \text{intersección} + 0.5$) para obtener la puntuación ponderada estandarizada de cada categoría de cobertura del suelo. Como ejemplo, la aplicación de esta fórmula en la primera categoría de la cobertura del suelo proporciona el siguiente resultado:
Entero ($[0.01096368 * 66.667] + 0.26908821 + 0.5$) = 1
8. Guarde el cuadro final como **lcmx_SWS.dbf**.
9. Repita los pasos 1 al 8 en los mapas de distribución de los demás factores causales y guarde los archivos resultantes con un nombre que corresponda al nombre de cada capa.

Tabla 7. Ejemplo del cálculo de las puntuaciones ponderadas estandarizadas (SWS, standardized weighted scores) de las categorías de la cobertura del suelo

Categoría	Ningún	Peligro Bajo	Peligro	Alto	Cuenta	SWS
0	0.000	100.000	0.000	0.000	100.000	2
1	0.652	52.219	47.024	0.105	193.814	3
2	2.575	66.857	30.563	0.005	158.570	2
3	0.000	50.000	50.000	0.000	200.000	3
4	1.144	80.717	18.139	0.000	135.135	2
5	5.026	71.404	23.570	0.000	142.114	2
6	5.598	79.948	14.454	0.000	123.309	2
7	0.000	39.080	60.920	0.000	221.839	3
8	0.035	63.901	36.064	0.000	172.092	3
9	3.034	63.788	33.178	0.000	163.323	3
10	1.082	94.627	4.291	0.000	107.500	2
11	8.033	89.726	2.241	0.000	96.449	2
13	2.679	88.128	9.193	0.000	115.707	2
14	2.724	59.717	37.507	0.052	172.499	3
15	7.822	86.416	5.762	0.000	103.703	2
16	7.419	86.774	5.806	0.000	104.194	2
17	1.818	68.545	29.636	0.000	157.455	2
18	1.838	60.348	37.718	0.097	173.985	3
				Min	96.449	1
				Max	221.839	3
				Pendiente	0.01595024	
				Intersección	-0.53838654	

2.3.6 Creación de la capa de distribución del nivel de intensidad del peligro de inundaciones

La creación de la capa de distribución del nivel de intensidad del peligro de inundaciones pasa por tres etapas basadas en las capas y los cuadros que se prepararon en las secciones anteriores. En la primera etapa, los mapas de distribución de los factores causales se reclasifican para obtener la distribución de las puntuaciones ponderadas estandarizadas de cada uno de ellos, como se describe a continuación.

1. En ArcView, abra el cuadro de atributos del raster de distribución **lc_MX**.
2. En la leyenda del proyecto ArcView, seleccione “Table” y agregue el cuadro **lcMX_SWS.dbf**.
3. Encuentre la columna que tienen en común el cuadro de atributos del raster **lc_MX** y el cuadro **lcMX_SWS.dbf**.
4. Destaque el encabezado de la columna en cuestión en el archivo **lcMX_SWS.dbf** y después haga lo mismo en el cuadro de atributos de la cuadrícula (Raster) **lc_MX**.
5. Una los dos cuadros haciendo clic sobre el botón *join* (relacionar)  que se encuentra en la barra de herramientas.
6. Utilice la función Analysis>Map Calculator, haga doble clic sobre la opción [lc_MX.SWS] de la lista y haga un clic sobre el botón “evaluate” para crear un raster que contenga la distribución espacial de la puntuación ponderada estandarizada.
7. Guarde el raster resultante como **MXlc_SWS**.
8. Repita los pasos 1 al 7 en los raster de distribución de los demás factores causales, recordando que, en el caso de los factores continuos (la altitud y la distancia de la trayectoria de la acumulación de los flujos), se tienen que utilizar los rasters que se crearon en la sección 2.3.4.2. Guarde los rasters resultantes, utilizando los siguientes nombres de archivos: **MXSuelo_SWS**, **MXgeology_SWS**, **MXdem90_SWS**, **MXfa_SWS** y **MXprec_SWS**.

En la segunda etapa, se calcula el índice del peligro de inundaciones (FHI), combinando los mapas de distribución de las puntuaciones ponderadas estandarizadas de cada factor causal, como se indica a continuación:

1. Cargue a ArcGIS 9.x todos los rasters de distribución de las puntuaciones ponderadas estandarizadas (**MXlc_SWS**, **MXsuelo_SWS**, **MXgeology_SWS**, **MXdem90_SWS**, **MXfa_SWS** y **MXprec_SWS**).
2. Utilice la función del menú Spatial Analyst>Raster Calculator e ingrese la fórmula siguiente en la ventana: $([MXlc_SWS]*[MXsuelo_SWS]*[MXgeology_SWS]*[MXdem90_SWS]*[MXfa_SWS]*[MXprec_SWS])$.
3. Guarde el raster resultante como **MX_FHI**; ésta es la capa de la distribución del índice del peligro de inundaciones de la zona seleccionada. Los metadatos de esta capa se presentan en el **Anexo 23**.
4. Si **MX_FHI** presenta una gran cantidad de variación (“ruido”) en sus alrededores, se puede usar la función Generalize Grid>Smooth Surface de ArcView 3.x y guardar el raster resultante como **MX_FHI_cln**.

En la etapa final, el mapa de la distribución del índice del peligro de inundaciones se reclasifica de acuerdo con los cinco niveles de intensidad seleccionados, utilizando el siguiente método:

1. Cargue el raster **MX_FHI** o **MX_FHI_cln** en ArcGIS 9.x y conviértala en el raster activo.
2. Utilice la función del menú Spatial Analyst>Reclassify y especifique lo siguiente en la ventana “Reclassify Value” que aparece:
 - a) Haga clic sobre el botón Classify espere a que aparezca la ventana de clasificación y cambie su disposición para que se lea “Natural Breaks” para Type, y “5” para Number of Classes; haga clic en OK.
 - b) En la opción Output Raster seleccione la ruta y nombre del archivo como **inundaMX**.

Use el mismo proceso como el que se describió en la sección 2.3.4.1 para estimar la puntuación ponderada. Las cinco clases que se obtienen corresponden a los siguientes niveles de intensidad:

- 1: muy bajo
- 2: peligro bajo
- 3: medio
- 4: alto
- 5: muy alto

El mapa resultante de distribución del peligro de inundaciones que se obtiene al aplicar este enfoque, se presenta en la **Figura 20** y los metadatos asociados al mismo se pueden consultar en el **Anexo 24**.

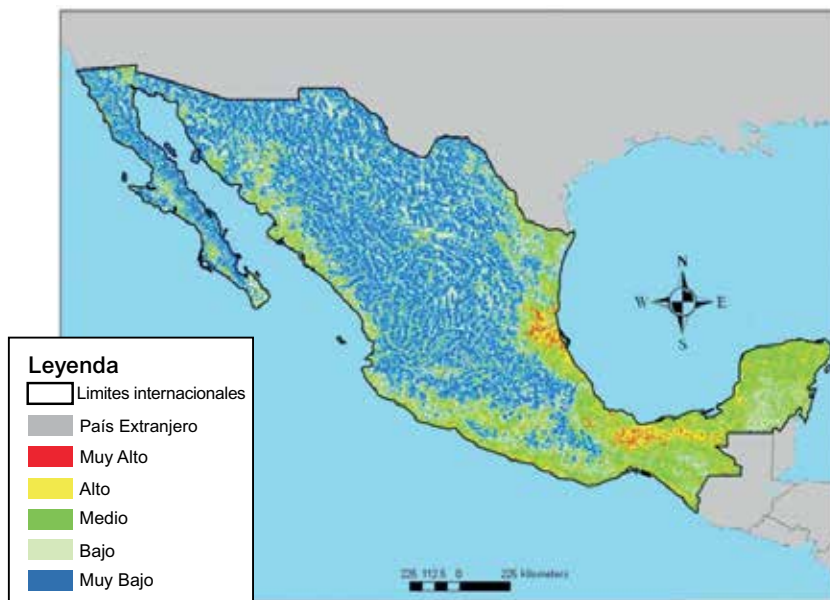


Figura 20. Distribución espacial de los niveles de intensidad del peligro de inundaciones para la República Mexicana

2.4 Bibliografía y lecturas recomendadas

1. El Morjani Z., Ebener S., J. Boos, Abdel Ghaffar E., Musani A, 2007. “Reducing the health impact of some disasters: modeling the spatial distribution of 5 natural hazards in the context of the WHO/EMRO Atlas of Disaster Risk2”, *International Journal of Health Geographics* 2007, 6:8.
2. Al-Rawas G, Koch M and El-Baz F, 2001. Using GIS for flash flood hazard mapping in Oman. *Earth observation magazine*, 10(8):18–20.
3. Bapalu GV and Sinha R, 2005. GIS in flood hazard mapping: a case study of Kosi River Basin, India. At http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/floods/floods001pf.htm; accessed 21 March 2007.
4. Gabriele S and Arnell N, 1991. A hierarchical approach to regional flood frequency analysis. *Water resources research*, 27(6):1281–1289.
5. Eastman JR, 2003. *Idrisi Kilimanjaro: guide to GIS and image processing versión 14.00. Worcester, Massachusetts, Clark University.*
6. Islam MM and Sado K, 2000a. Flood hazard map and land development priority map developed using NOAA AVHRR and GIS data. At <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ps3/ps313pf.htm>; accessed 21 March 2007.
7. Islam MM and Sado K, 2000b. Flood hazard assessment in Bangladesh using NOAA AVHRR data with geographical information system. *Hydrological processes*, 14(3):605–620.

8. Loveland TJ, Merchant DO and Brown J, 1991. Development of a land-cover characteristics database for the conterminous US. *Photogrammetric engineering & remote sensing*, 57(11):1453–1463.
9. McKerchar AI and Pearson CP, 1990. Maps of flood statistics for regional flood frequency analysis in New Zealand. *Hydrological sciences journal*, 35(6):609–621.
10. Pearson CP, 1991. Regional flood frequency analysis for small New Zealand basins. *Journal of hydrology (NZ)*, 30(2):77–79.
11. Kjeldsen TR, Smithers JC and Schulze RE, 2002. Regional flood frequency analysis in the KwaZulu-Natal province, South Africa, using the index flood method. *Journal of hydrology*, 255:194–211.
12. Kroll CN and Vogel RM, 2002. Probability distribution of low streamflow series in the United States. *Journal of hydrologic engineering*, 7:137–146.
13. Mannaerts CM, 1996. Watershed hydrological methods. ITC postgraduate course in water resources survey lecture notes (MOR46). Enschede, The Netherlands, ITC.
14. Meijerink AMJ, De Brouwer HAM, Mannaerts CM and Valenzuela CR, 1994. Introduction to the use of geographic information system for practical hydrology. International Hydrological Programme, UNESCO and ITC. Enschede, The Netherlands.
15. Nyarko BK, 2002. Application of a rational model in GIS for flood risk assessment in Accra. *Journal of spatial hydrology*, 2(1):1–14.
16. Peduzzi P, Dao H and Herold C, 2005. Mapping disastrous natural hazards using global datasets. *Natural hazards*, 35:265–289.
17. Sanyal J and Xi Lu X, 2003. Application of GIS in flood hazard mapping: a case study of Gangetic West Bengal, India. At http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/floods/ma03138.htm; accessed 23 March 2007.
18. Sarma P, 1999. Flood risk zone mapping of Dikrong sub basin in Assam. At http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/floods/nhcy0006pf.htm; accessed 23 March 2007.
19. Seth SM, 1999. Role of remote sensing and GIS inputs in physically based hydrological modelling. At <http://www.gisdevelopment.net/application/nrm/water/overview/wato0006pf.htm>; accessed 22 March 2007.
20. Shrestha M, 2004. Flood risk and vulnerability mapping using GIS: a Nepal case study. In *Proceedings of the Second APHW Conference, 5–8 July 2004, 1:180–90. Singapore, Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources*. At <http://www.wrrc.dpri.kyoto-u.ac.jp/~aphw/APHW2004/proceedings/FWR/56-FWR-A378/56-FWR-A378.pdf>; accessed 22 March 2007.
21. Storm B, 1989. Introduction to hydrological modelling. *Proceedings, workshop on application of SHE model to sub-basins of River Narmada, Bhopal*, pp 4–15.
22. Todini F, De Filippis T, De Chiara G, Maracchi G, Martina MLV and Todini E, 2004. Using a GIS approach to assess flood hazard at national scale. Presentation presented in European Geosciences Union, 1st General Assembly, Nice, France, 25–30 April 2004.
23. UNDP, 2004. Reducing disaster risk. A challenge for development. New York, UNDP, Bureau for Crisis Prevention and Recovery. At http://www.undp.org/bcpr/whats_new/rdr_english.pdf. Accessed 22 March 2007.
24. USACE, 2001a. HEC-RAS river analysis system. *Hydraulic reference manual*. Davis, California, US Army Corps of Engineers (USACE), Hydrological Engineering Center.
25. USACE, 2001b. HEC-RAS river analysis system. *User's manual*. Davis, California, US Army Corps of Engineers (USACE), Hydrological Engineering Center.
26. Venkatesh B and Jain MK, 1997. Application of TOPMODEL to Malaprabha catchment. NIH report CS/AR-3/97-98. Roorkee, India, National Institute of Hydrology.

27. Viessman W Jr and Lewis GL, 1996. Introduction to hydrology. New York, Harper Collins College Publishers.

CAPÍTULO III

Metodología y procesos de implementación para el peligro de deslizamientos

3.1 Introducción

La metodología utilizada para la distribución del peligro de deslizamientos de tierra se basa en un análisis de criterio múltiple derivado (MCA por sus siglas en inglés) que clasifica las áreas de acuerdo con la probabilidad de que ocurra un deslizamiento de tierra en su superficie, probabilidad que en algunos casos se describe como la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra, antes de ser reclasificadas para obtener la distribución espacial del nivel de intensidad de peligrosidad por deslizamientos y los mapas de la distribución de peligros por deslizamientos para México. Los métodos y el proceso que se presentan en este documento se podrían aplicar a otros países, áreas y regiones geográficas, a condición de que los análisis utilicen datos geoespaciales con calidad y resolución similar o superior.

3.2 Metodología

En las publicaciones especializadas se han propuesto muchos métodos y técnicas para evaluar y estratificar los peligros de deslizamientos de tierra. Se pueden producir mapas del peligro de deslizamientos de tierra empleando técnicas de mapeo ya sean cualitativas (directas) o cuantitativas (indirectas) [Hansen, 1984; Hansen y Frank, 1991].

Las técnicas cualitativas consisten en un ejercicio de mapeo geomorfológico en el cual el geólogo identifica los deslizamientos de tierra pasados y, con la perspicacia del conocimiento y la experiencia previa, desarrolla postulados acerca de la probabilidad de que las laderas se puedan derrumbar en el futuro. Aunque esta técnica tradicional da como resultado mapas eficaces de estratificación de peligros, resulta muy absorbente, costosa y requiere demasiada mano de obra. No se aplica en forma muy amplia debido a estos inconvenientes y al refinamiento de otras técnicas eficaces de mapeo indirecto.

Las técnicas cuantitativas adoptan un modelo determinista o un modelo estadístico para desarrollar los límites de las zonas de peligro de deslizamientos de tierra. El enfoque determinista se basa en el conocimiento previo de los factores físicos que se encuentran en el origen de los deslizamientos de tierra. Los factores de inestabilidad se mapean, clasifican y ponderan de acuerdo con su importancia, supuesta o esperada, de causar una devastación masiva [Gupta y Joshi, 1990; Pachauri y Pant, 1992; Maharaj, 1993; Anbalagan y Singh, 1996; Gökçeoğlu y Aksoy, 1996; Turrini y Visintainer, 1998; Pachauri et al., 1998; Barredo et al., 2000; Wachal y Hudak, 2000; Donati y Turrini, 2002; Esmali y Ahmadi, 2003; Ayenew y Barbieri, 2005]. La combinación de las capas con factor de inestabilidad ponderado arroja una superficie única que cuantifica la probabilidad de que ocurra un evento de devastación masiva en un lugar geoespacial específico.

El modelo estadístico o probabilístico utiliza las relaciones observadas entre cada factor de inestabilidad y los deslizamientos de tierra pasados para establecer el papel de un factor en el proceso de degradación masiva de un lugar específico y calcula la probabilidad de que ocurra un evento futuro de degradación masiva en un lugar determinado [Gupta y Joshi, 1990; Clerici et al., 2002; Dai y Lee, 2002; Donati y Turrini, 2002; Ercanoğlu et al., 2004; Suzen y Doyuran, 2004; Ayalew y Yamagishi, 2004]. El modelo probabilístico puede utilizar cualquier número de técnicas estadísticas, incluyendo los análisis estadísticos bi-variados o de regresión múltiple.

Cada técnica y modelo tiene un conjunto único de ventajas y desventajas. Por esta razón, no hay un consenso entre los investigadores sobre cuál es el modelo más apropiado a utilizar para identificar y mapear las áreas propensas a la devastación masiva [Brabb, 1984; Carrara, 1989]. Sin embargo, la

ausencia de un inventario comprensivo de deslizamientos de tierra pasados en la República Mexicana nos obligó a emplear un modelo determinista para establecer la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra en esta área como una aproximación del peligro de deslizamientos de tierra. Hay dos ventajas adicionales cuando se utiliza un modelo determinista. En primer lugar, este enfoque es compatible con los métodos geospaciales computarizados y con las técnicas geo-computacionales. En segundo, los resultados obtenidos a partir del modelo se pueden evaluar y recrear con facilidad. La implementación de este método pasa por la aplicación de los siguientes pasos (Figura 21):

1. Identificación de los factores causales.
2. Reclasificación del mapa de pendientes.
3. Estandarización de la distribución de los factores causales de acuerdo con una escala continúa. (Excepto el de pendientes).
4. Establecimiento de las prioridades (ponderación) de los factores causales.
5. Creación del mapa de distribución de la susceptibilidad intermedia de deslizamientos.
6. Combinación del mapa de distribución de la susceptibilidad intermedia de deslizamientos con el mapa de reclasificación de pendientes y el mapa resultante del nivel de intensidad del peligro de deslizamientos de tierra.

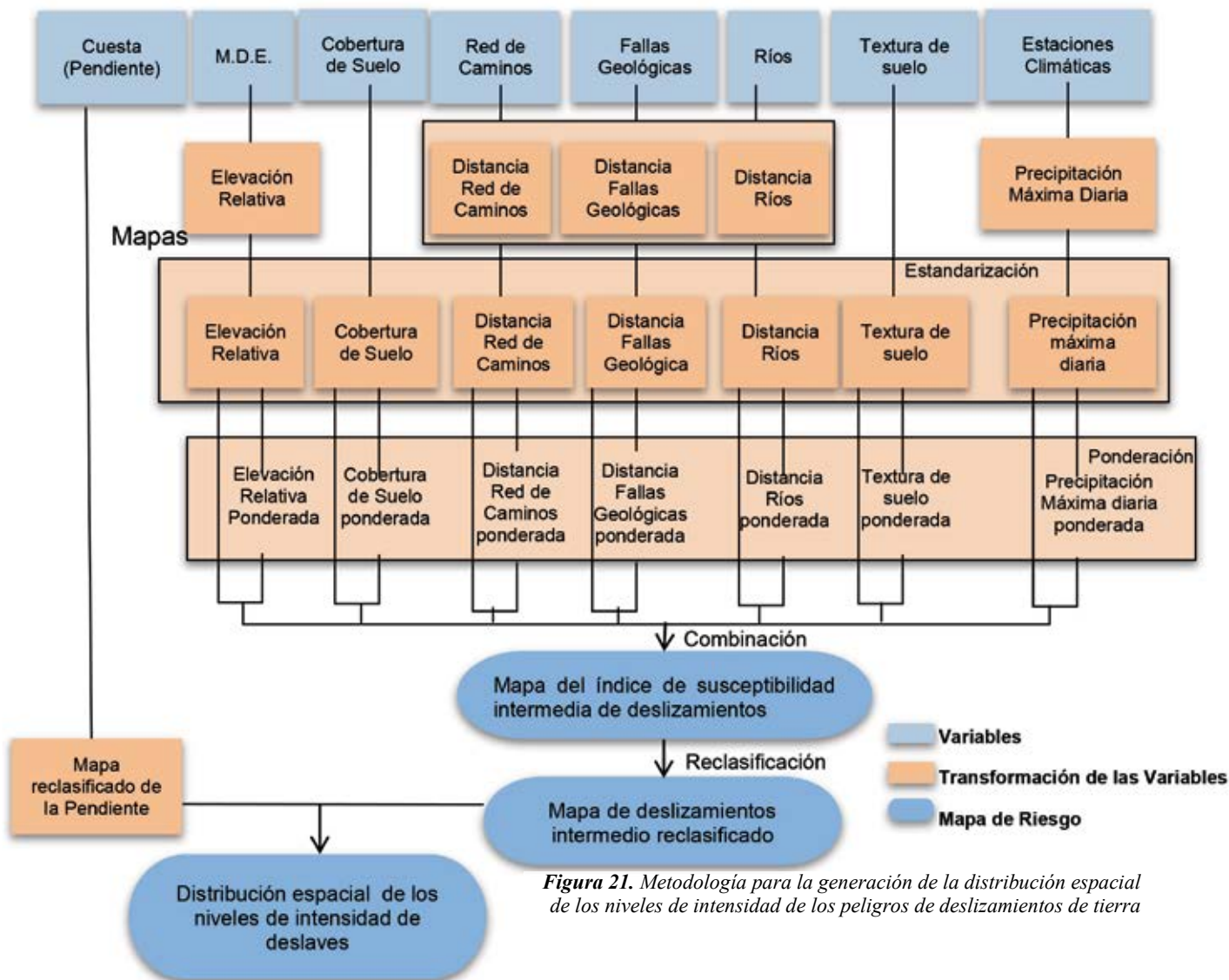


Figura 21. Metodología para la generación de la distribución espacial de los niveles de intensidad de los peligros de deslizamientos de tierra

3.2.1 Identificación de los factores causales

La metodología descrita en este documento utiliza un índice compuesto de peligro de deslizamientos de tierra que se basa en ocho factores causales principalmente. Los factores, que aquí se presentan, han sido seleccionados en base a diversos estudios de casos relevantes en el territorio mexicano.

1. *La pendiente.* La probabilidad de un deslizamiento de tierra se incrementa a medida que la pendiente aumenta [Roth, 1983; Barisone y Bottino, 1990; Koukis y Ziourkas, 1991; Anbalagan, 1992; Pachauri y Pant, 1992; Maharaj, 1993; Jager y Wieczorek, 1994; Anbalagan y Singh, 1996; Talib, 1997; Atkinson y Massari, 1998; Baum et al., 1998; Guzzetti et al., 1999; Zezere et al., 1999; Sinha et al., 1999; Guzzetti et al., 2000; Jakob, 2000; Nagarajan et al., 2000; Ramakrishnan, 2002; Esmali y Ahmadi 2003; Kelarestaghi, 2003; Tangestani, 2003; Van Westen, 2003; Duman et al., 2005; Gomes et al., 2005, Komac y Ribičič, 2006].

2. *La elevación relativa.* Esta es la mayor diferencia en elevación que existe entre un pixel y un pixel más abajo adyacente. La probabilidad de deslizamientos de tierra aumenta a medida que se incrementa la elevación relativa de algún lugar [Pachauri y Pant, 1992; Talib, 1997; Sinha y cols., 1999; Ercanoğlu y Gökçeoğlu, 2002; Esmali y Ahmadi 2003; Tangestani, 2003; Kelarestaghi, 2003].

3. *La precipitación diaria máxima anual.* La precipitación es un parámetro importante que afecta a la estabilidad de la pendiente de dos maneras. En primer lugar, la precipitación puede afectar a las formaciones rocosas ubicadas a profundidades considerables (hasta 20 metros, dependiendo de la geología local) e incrementar la probabilidad de que ocurran deslizamientos de tierra. En las zonas que reciben una precipitación alta, el agua se puede infiltrar decenas de metros bajo la superficie y promover el desgaste de las rocas, lo cual incrementa la probabilidad de deslizamientos de tierra de raíces profundas; en segundo lugar, la precipitación aumenta la cantidad de agua en los suelos superficiales, lo que puede incrementar la probabilidad de eventos de devastación masiva. La precipitación aumenta el nivel de saturación de los suelos superficiales, lo que incrementa la presión del agua entre los poros, en los vacíos entre las partículas del suelo. Este aumento en la presión del agua en los poros disminuye la fricción y la cohesión entre las partículas del suelo y puede provocar deslizamientos de tierra de raíces poco profundas y flujos de escombros. Varios investigadores [Esmali y Ahmadi, 2003; Kelarestaghi, 2003] consideran que la precipitación es un factor sumamente crítico en la causa de la inestabilidad de las pendientes y de los deslizamientos de tierra, sólo superado por la fuerza de gravedad, como lo demuestran la pendiente y la elevación relativa de cierto lugar. En este estudio, hemos utilizado la precipitación diaria máxima anual con un periodo de retorno de cinco años, que se calculó empleando el método de análisis de frecuencia denominado método de Gumbel. Para obtener información específica sobre el cálculo de este parámetro, favor de consultar el documento titulado *La metodología y el proceso de implementación del e-atlas de la OMS/EMRO para modelar la distribución espacial del peligro de deslizamientos de tierra.*

4. *La cobertura del suelo.* La vegetación desempeña un papel crítico en la estabilización de las pendientes a través de varios procesos. Los sistemas de las raíces le da estructura al suelo y disminuyen la saturación del agua en el mismo; el follaje intercepta la precipitación y reduce su efecto erosivo sobre la superficie del suelo; las áreas con poca o nula cobertura del suelo y las áreas degradadas por las prácticas inadecuadas de explotación maderera, pastoreo, agricultura o construcción inapropiada, están predispuestas a los deslizamientos de tierra y a los eventos de degradación masiva [Swanson y Dyrness, 1975; Varnes, 1978; Sidle, Pearce y O'Loughlin, 1985; Talib, 1997; Sinha et al., 1999; Ramakrishnan, 2002; Esmali y Ahmadi, 2003; Tangestani, 2003; Kelarestaghi, 2003; Komac y Ribičič, 2006].

5. *La distancia de las carreteras.* La construcción de las carreteras que atraviesan las laderas puede desestabilizar al área de tres maneras. En primer lugar, el corte en la pendiente puede servir para

aumentar la inclinación del área, volviéndola más propensa a los deslizamientos de tierra; en segundo, el corte de la carretera al pie de la pendiente elimina el apoyo lateral de la pendiente y aumenta la probabilidad de deslizamientos de tierra; en tercero, el proceso de corte y relleno de la carretera puede hacer, de manera artificial, que la pendiente se vuelva más empinada tanto por encima como por debajo de la carretera y aumentar la susceptibilidad del área a la degradación masiva [Varnes, 1984; Sidle, Pearce y O'Loughlin, 1985; Talib, 1997; Sinha et al., 1999; Sarkar, 2002; Kelarestaghi, 2003; Tangestani, 2003; Esmali y Ahmadi 2003].

6. *La distancia de las fallas geológicas.* Los temblores y vibraciones que la actividad sísmica ocasiona a lo largo de las fallas geológicas pueden desencadenar desplazamientos de tierra y otros eventos de devastación masiva. La probabilidad de que los temblores sísmicos o terremotos desencadenen un evento de devastación masiva se incrementa a medida que disminuye la distancia entre la falla y la pendiente [Sinha et al., 1999; Sarkar, 2002; Esmali y Ahmadi, 2003; Tangestani, 2003, Kelarestaghi, 2003; Komac y Ribičič, 2006].

7. *La distancia de la red de desagüe.* El aumento de la proximidad de la pendiente a características hidrológicas tales como arroyos, ríos u océanos puede disminuir la estabilidad de la pendiente de diversas formas. Los arroyos y los ríos pueden afectar de manera adversa la estabilidad de la pendiente erosionando el pie de la misma; esta erosión o socavación, disminuye la estabilidad lateral de la pendiente y aumenta la probabilidad de un derrumbe; los arroyos pueden saturar la ladera y aumentar la presión del agua en los poros, provocando la disminución de la cohesión entre las partículas del suelo y la desestabilización general de la pendiente; la acción de las olas marinas, aunada a la erosión de la playa, puede volver más empinadas las pendientes que se encuentran a la orilla del mar, haciéndolas más susceptibles a los deslizamientos de tierra durante los periodos de precipitación alta o provocando derrumbes catastróficos a lo largo de las juntas, estratificaciones y superficies de exfoliación geológicas [Gökçeoğlu y Aksoy, 1996; Talib, 1997; Sinha et al., 1999; Sarkar, 2002; Tangestani, 2003; Esmali y Ahmadi 2003].

8. *La textura del suelo.* Ésta determina la cohesión y la fricción interna de los suelos. La cohesión y la fricción establecen la resistencia de los materiales al corte. La cohesión es la tendencia de las partículas del suelo a entrelazarse y permanecer a cierto ángulo. Los suelos arcillosos y las rocas son cohesivos, la arena tiene falta de cohesión. Las fuerzas de cohesión funcionan de forma independiente con respecto a la carga externa (el peso adicional colocado sobre la superficie del suelo en forma de edificios, carreteras, vegetación, etc.). La fricción es la tendencia de las partículas del suelo a resistirse a deslizarse unas a través de otras. Las fuerzas de fricción dependen de la carga que se coloque sobre la superficie del suelo –a mayor carga, mayor es la probabilidad de que las fuerzas de fricción lleguen a ser superadas. Esto produce como resultado el movimiento de las partículas del suelo dentro de la capa del suelo y, de manera potencial, el derrumbe de la pendiente [Ramakrishnan, 2002; Tangestani, 2003, Esmali y Ahmadi 2003; Duman et al., 2005; Komac y Ribičič, 2006].

9. *La litología.* Muchas fuentes identifican a la litología como un factor muy importante que puede predisponer al área a sufrir deslizamientos de tierra y eventos de devastación masiva [Glassey et al., 1997; Sinha y Mehta, 1999; Esmali y Ahmadi, 2003; Martínez, 2003; Van Westen, 2003; Duman et al., 2005].

3.2.2 Reclasificación de la pendiente

Con base a los estudios de las relaciones entre la distribución de deslizamientos y la pendiente [Bender, 2001 and Gomes et al., 2005], hemos reclasificado la pendiente (porcentajes) en 4 clases (**Tabla 8**).

Tabla 8. Tabla usada para la reclasificación en valores ordinales de la capa de pendientes

Pendiente (%)	Valor Ordinal
0 - 12	1
12 - 25	2
25 - 50	3
>= 50	5

3.2.3 Estandarización de la distribución de los factores causales (excepto la pendiente) de acuerdo con una escala continua

Para integrar a las formas de los factores causales (excepto la pendiente), tanto continuas como diferenciadas, al análisis de criterios múltiples, es necesario volver a clasificar cada una de las capas involucradas de acuerdo con una escala comparable de clases ordinales que vaya, en nuestro caso, del 0 al 4; el 0 corresponde a las clases donde la probabilidad de que ocurran deslizamientos de tierra es la mínima y el 4 a aquellas donde dicha probabilidad es la máxima. Las secciones siguientes describen cómo se realizó esta reclasificación de acuerdo con los tipos de datos.

3.2.3.1 Reclasificación de las capas de datos continuos

La mayoría de los factores causales empleados en la metodología presente son continuos, lo cual significa que son de naturaleza cuantitativa, no restringida a adoptar ciertos valores específicos y la diferencia entre dos valores cualesquiera puede ser arbitrariamente pequeña. Sin embargo, las unidades de medición de los datos varían de un factor a otro. Los datos capturan medidas de longitud (la distancia de las características hidrológicas, carreteras y fallas, así como la elevación relativa), volumétricas (la precipitación diaria máxima anual). En este caso, se utiliza la escala lineal para reclasificar la distribución de estos valores de acuerdo con una escala nominal. Esto se hace empleando la siguiente fórmula, misma que corresponde a una ecuación de escala lineal simple en la cual el valor sin procesar de cualquier píxel determinado se denomina R [Voogd, 1983; Eastman, 2003]:

Ecuación 3.1

$$x_i = \frac{(R_i - R_{\min})}{(R_{\max} - R_{\min})} \times \text{rango estandarizado}$$

donde: x_i = el valor ordinal

R_i = el valor sin procesar.

Esta ecuación emplea los valores mínimo y máximo (R_{\min} y R_{\max}), presentes en la capa continua, como puntos de la escala. El rango estandarizado es el rango de los valores de las clases ordinales (4, en nuestro caso).

La misma ecuación se utiliza para correlacionar positivamente todos los datos de los factores causales con la probabilidad de deslizamientos de tierra. En los casos donde existe una correlación positiva inicial (la probabilidad de deslizamientos de tierra se incrementa a medida que el factor causal aumenta) R_{\min} será igual al valor sin procesar mínimo en la serie de datos y R_{\max} será igual al valor sin procesar máximo en la serie de datos. Los factores causales con una relación positiva inicial a la probabilidad de deslizamientos de tierra son la pendiente, la elevación relativa y la precipitación diaria máxima anual.

Por ejemplo, la **Figura 22** presenta una correlación positiva inicial entre un factor causal y la susceptibilidad de deslizamientos de tierra. También ilustra cómo una distribución no estandarizada (un valor sin procesar) se puede reclasificar de acuerdo con un esquema de clasificación ordinal.

Por el contrario, cuando la correlación entre el factor causal y la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento de tierra es negativa (la probabilidad disminuye a medida que el valor del factor causal aumenta) R_{\min} será igual al valor sin procesar máximo en la serie de datos y R_{\max} será igual al valor sin procesar mínimo en la serie de datos. Los factores causales con una correlación negativa inicial a la susceptibilidad a deslizamientos de tierra son la distancia desde la red hidrográfica, las carreteras y las fallas. Como ejemplo, la **Figura 23** presenta una correlación negativa inicial entre un factor causal y la susceptibilidad a deslizamientos de tierra.

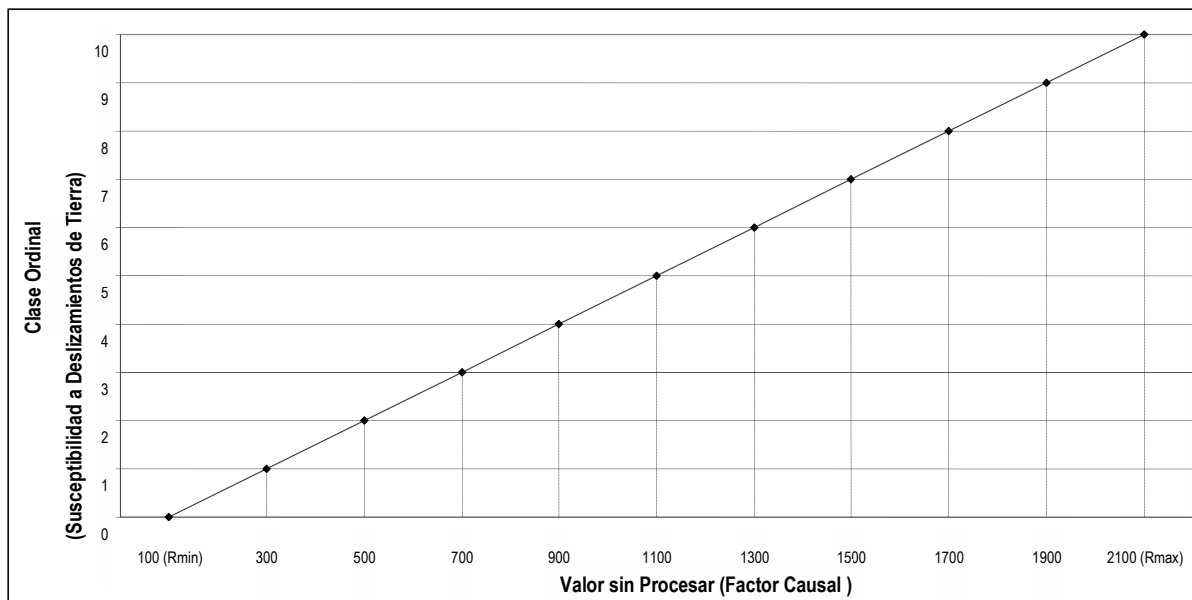


Figura 22. Ejemplo de una correlación positiva entre los valores sin procesar y un esquema ordinal de clasificación

3.2.3.1.1 Reclasificación de los factores causales que presentan una correlación negativa

Como se mencionó anteriormente, los factores causales que presentan una correlación negativa respecto a la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra son la distancia de las características hidrológicas, las carreteras y las fallas geológicas (la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra disminuye a medida que aumenta la distancia de la característica).

Sin embargo, no existe ningún consenso entre los investigadores en relación a la naturaleza precisa de las relaciones que existen entre la proximidad de estas características y la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra. Como resultado, diferentes investigadores definen la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra de forma distinta con distancias similares de las carreteras, redes de desagüe y fallas geológicas [Anbalagan, 1992; Pachauri y Pant, 1992; Maharaj, 1993; Gökceoğlu y Aksoy, 1996; Luzi y Pergalani, 1999; Donati y Turrini, 2002; Esmali y Ahmadi, 2003; Tangestani, 2003; Ercanoğlu y Gökceoğlu, 2004; Duman et al., 2005; Komac y Ribičič, 2006].

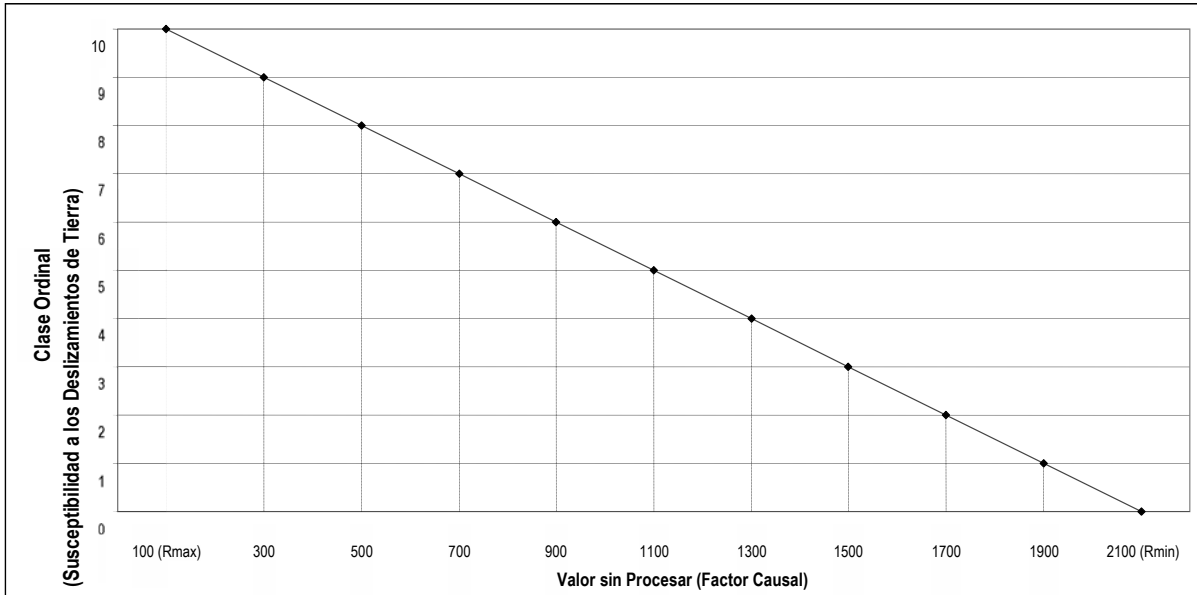


Figura 23. Ejemplo de una correlación negativa entre los valores sin procesar y un esquema ordinal de clasificación

En vista de esta falta de consenso, los rangos máximos que se fijaron para la construcción del Atlas se basaron en la siguiente resolución escogida para las capas de los resultados (1000 metros):

- 5000 metros en el caso de las carreteras y las redes de desagüe
- 10 000 metros en el caso de las fallas geológicas.

Por ejemplo, la fórmula siguiente se emplea para reclasificar la distancia hasta una carretera o red hidrográfica, asignando el valor de 0 a $R_{\text{máx}}$ y de 4 a $R_{\text{mín}}$:

Ecuación 3.2

$$x_i = \frac{(R_i - 5000 \text{ metros})}{(0 \text{ metros} - 5000 \text{ metros})} \times (4 - 0)$$

donde: x_i = el valor ordinal

R_i = el valor del dato sin procesar

Al aumentar R_i (al alejarse de la característica) x_i disminuye. Los sitios ubicados a más de 5000 metros de la característica se consideran demasiado distantes como para ser afectados. En el caso de dichos sitios, se asigna un valor de 0 (una clase ordinal de 0) a x_i .

3.2.3.1.2 Reclasificación de los factores causales que presentan una correlación positiva

Tanto la precipitación y la pendiente como la elevación relativa guardan una correlación positiva con la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra. Las áreas con una precipitación diaria máxima anual con un periodo de retorno de cinco años, una pendiente pronunciada y una elevación relativa alta, tienen una susceptibilidad elevada a los deslizamientos de tierra y también lo inverso es cierto. Por lo tanto, las áreas que presentan los valores máximos se asignan a un grupo ordinal con un valor de 10, mientras que las áreas con los valores mínimos se asignan a un grupo ordinal con valor de 0, utilizando la siguiente fórmula:

Ecuación 3.3

$$x_i = \frac{(R_i - R_{min})}{(R_{máx} - R_{min})} \times \text{rango estandarizado}$$

donde: R_{min} = el valor mínimo del píxel encontrado en la serie de datos

$R_{máx}$ = el valor máximo del píxel encontrado en la serie de datos

R_i = el valor de un píxel que tenga un valor entre R_{min} y $R_{máx}$

x_i = el valor ordinal asignado a un píxel con un valor sin procesar de R_i

rango estandarizado = $4 \times$ (el valor máximo de la clasificación ordinal)

3.2.3.2 Reclasificación de las capas de datos diferenciados

Los otros factores (la cobertura del suelo y la textura del suelo) son de naturaleza cualitativa (diferenciada). Las mediciones en el caso de estos datos están asignadas a un número finito de clasificaciones nominales que no están asociadas con las cantidades (p. e., ¿la cobertura del suelo es sabana o pradera; la textura del suelo es fina o media?, etc.). Los métodos que se utilizan para convertir estas clasificaciones cualitativas en ordinales se presentan en las secciones siguientes.

3.2.3.2.1 Reclasificación de la capa de la cobertura de la tierra

En una primera etapa, la clasificación original de la cobertura del suelo se agrupa en ocho categorías simplificadas que se basan en la densidad de la vegetación. En una segunda etapa, se atribuye un valor ordinal a cada clase simplificada que concuerden con la correlación positiva que existe entre la cobertura del suelo y la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra; a menor densidad de vegetación, mayor susceptibilidad a los deslizamientos de tierra [Varnes, 1978; Sidle, Pearce y O'Loughlin, 1985]. El resultado de este proceso se presenta en la **Tabla 9**.

3.2.3.2.2 Textura del suelo

Al igual que en el caso de la cobertura del suelo, las categorías de la textura del suelo se reclasifican en categorías ordinales con base a sus propiedades hidráulicas y su susceptibilidad a los deslizamientos de tierra y a los eventos de devastación masiva [Zobler, 1986]. La **Tabla 10** representa el resultado de este proceso.

3.2.4 Establecimiento de las prioridades (ponderación) de los factores causales

Los factores causales empleados en este análisis ejercen diversos grados de influencia sobre la probabilidad general de ocurrencia de un deslizamiento de tierra en determinada área. Para tomar en cuenta estas diferencias en importancia, se debe proveer una ponderación a cada factor causal, de manera que estadísticamente los factores más influyentes ejerzan el grado de influencia apropiado sobre el cálculo. En el análisis de criterios múltiples existe una amplia variedad de técnicas utilizadas para ponderar factores [Simos, 1990]. El método de ponderación utilizado en este análisis es la comparación pareada, porque permite el desarrollo y establecimiento de las prioridades de las ponderaciones de los factores en base a la aportación cuantitativa de numerosas personas.

La comparación pareada fue desarrollada dentro del contexto del proceso de jerarquía analítica (AHP, Analytical Hierarchy Process) por Thomas Saaty [1977]. El modelo AHP es un método no lineal de resolución de problemas en grupo y fue diseñado para adecuar el juicio humano de una manera lógica dependiendo de la imaginación, la experiencia y el conocimiento del problema [Saaty, 1990]. Este método implementa el uso de comparaciones verbales, tales como “más importante” o “sumamente más

importante”, mismo que permite al AHP crear una matriz de ponderaciones que correspondan a las preferencias de las personas encargadas de tomar las decisiones. También proporciona una estructura organizada para las discusiones grupales y ayuda al grupo encargado de tomar las decisiones a establecer las ponderaciones de los criterios.

Tabla 9. Cuadro utilizado para la reclasificación de la capa de la cobertura del suelo en valores ordinales

Tipo	Valor
AGRICULTURA DE HUMEDAD	2
AGRICULTURA DE RIEGO (INCLUYE RIEGO EVENTUAL)	2
AGRICULTURA DE TEMPORAL CON CULTIVOS ANUALES	4
AGRICULTURA DE TEMPORAL CON CULTIVOS PERMANENTES Y SEMIPERMANENTES	4
AREA SIN VEGETACION APARENTE	10
ASENTAMIENTO HUMANO	6
BOSQUE BAJO-ABIERTO	1
BOSQUE BAJO-ABIERTO CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	1
BOSQUE DE ENCINO	1
BOSQUE DE ENCINO CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	1
BOSQUE DE OYAMEL (INCLUYE AYARIN Y CEDRO)	1
BOSQUE DE OYAMEL (INCLUYE AYARIN Y CEDRO) CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y	1
BOSQUE DE PINO	1
BOSQUE DE PINO CON VEGETACION PRIMARIA Y SECUNDARIA ARBOREA	1
BOSQUE DE PINO CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	1
BOSQUE DE PINO-ENCINO (INCLUYE ENCINO-PINO)	1
BOSQUE DE PINO-ENCINO (INCLUYE ENCINO-PINO) CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y	1
BOSQUE DE TASCATE	1
BOSQUE DE TASCATE CON VEGETACION PRIMARIA Y SECUNDARIA ARBOREA	1
BOSQUE DE TASCATE CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	1
CHAPARRAL	3
CHAPARRAL CON VEGETACION SECUNDARIA	3
CUERPO DE AGUA	9
MATORRAL CRASICAULE	3
MATORRAL CRASICAULE CON VEGETACION SECUNDARIA	3
MATORRAL DE CONIFERAS	2
MATORRAL DE CONIFERAS CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	2
MATORRAL DESERTICO MICROFILO	3
MATORRAL DESERTICO MICROFILO CON VEGETACION SECUNDARIA	3
MATORRAL DESERTICO ROSETOFILO	3
MATORRAL SUBTROPICAL	3
MATORRAL SUBTROPICAL CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	3
PASTIZAL CULTIVADO	2
RIEGO SUSPENDIDO	2
SELVA BAJA CADUCIFOLIA Y SUBCADUCIFOLIA	1
SELVA BAJA CADUCIFOLIA Y SUBCADUCIFOLIA CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y	1
SELVA BAJA ESPINOSA	1
SELVA BAJA ESPINOSA CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	1

SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA Y SUBCADUCIFOLIA	1
SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA Y SUBCADUCIFOLIA CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y	1
AGRICULTURA DE HUMEDAD	2
AGRICULTURA DE RIEGO (INCLUYE RIEGO EVENTUAL)	2
AGRICULTURA DE TEMPORAL CON CULTIVOS ANUALES	4
AGRICULTURA DE TEMPORAL CON CULTIVOS PERMANENTES Y SEMIPERMANENTES	4
ASENTAMIENTO HUMANO	6
BOSQUE BAJO-ABIERTO	1
BOSQUE BAJO-ABIERTO CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	1
BOSQUE DE ENCINO	1
BOSQUE DE ENCINO CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	1
BOSQUE DE OYAMEL (INCLUYE AYARIN Y CEDRO)	1
BOSQUE DE OYAMEL (INCLUYE AYARIN Y CEDRO) CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y	1
BOSQUE DE PINO	1
BOSQUE DE PINO CON VEGETACION PRIMARIA Y SECUNDARIA ARBOREA	1
BOSQUE DE PINO CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	1
BOSQUE DE PINO-ENCINO (INCLUYE ENCINO-PINO)	1
BOSQUE DE PINO-ENCINO (INCLUYE ENCINO-PINO) CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y	1
BOSQUE DE TASCATE	1
BOSQUE DE TASCATE CON VEGETACION PRIMARIA Y SECUNDARIA ARBOREA	1
BOSQUE DE TASCATE CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	1
CHAPARRAL	3
CHAPARRAL CON VEGETACION SECUNDARIA	3
CUERPO DE AGUA	9
MATORRAL CRASICAULE	3
MATORRAL CRASICAULE CON VEGETACION SECUNDARIA	3
MATORRAL DE CONIFERAS	2
MATORRAL DE CONIFERAS CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	2
MATORRAL DESERTICO MICROFILO	3
MATORRAL DESERTICO MICROFILO CON VEGETACION SECUNDARIA	3
MATORRAL DESERTICO ROSETOFILO	3
MATORRAL SUBTROPICAL	3
MATORRAL SUBTROPICAL CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	3
PASTIZAL CULTIVADO	2
RIEGO SUSPENDIDO	2
SELVA BAJA CADUCIFOLIA Y SUBCADUCIFOLIA	1
SELVA BAJA CADUCIFOLIA Y SUBCADUCIFOLIA CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y	1
SELVA BAJA ESPINOSA	1
SELVA BAJA ESPINOSA CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	1
SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA Y SUBCADUCIFOLIA	1
SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA Y SUBCADUCIFOLIA CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y	1

Tabla 10. Cuadro utilizado para la reclasificación de la capa de la textura del suelo en valores ordinarios

Textura del suelo	Valor ordinal
Gruesa	2
Media	3
Fina	4
Inadecuada	1

Con la comparación pareada, cada factor se clasifica verbalmente por importancia y después se convierte a una escala que va del 1 al 9. Esta escala luego es normalizada para obtener valores que van entre 0 y 1, los cuales corresponden a las ponderaciones que se están buscando. Se consultó a un grupo de tres geólogos estructurales, dos hidrogeólogos, un geólogo y un científico ambiental para el ejercicio de la comparación pareada. Cada integrante del grupo, de manera individual, estableció la prioridad de los factores. Después, se calcularon las ponderaciones de las prioridades de cada integrante y, finalmente, los factores ponderados se unieron para asignar una ponderación única a cada factor causal. Estos pasos se describen con más detalle en las siguientes secciones.

3.2.4.1 Establecimiento de la prioridad de los factores causales

Cada uno de los integrantes del grupo estableció, en forma verbal, la prioridad de cada factor causal respecto a su importancia en relación con los demás factores, para determinar la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra, utilizando para ello los juicios verbales que se presentan en la **Tabla 11**. Estos juicios verbales se convirtieron luego en valores ordinales entre el 0 y el 9, como una indicación de su nivel relativo de importancia (**Tabla 11**).

Tabla 11. Juicios verbales y valores ordinales correspondientes para el análisis de comparación pareada

Juicio verbal	Valor
Extremadamente más importante	9
Muy seriamente más importante	7
Seriamente más importante	5
Moderadamente más importante	3
Igualmente importante	1
Moderadamente menos importante	1/3
Seriamente menos importante	1/5
Muy seriamente menos importante	1/7
Extremadamente menos importante	1/9
Intervalos entre los valores de prioridad	2, 4, 6, 8, 1/2, 1/4, 1/6, 1/8

En base a las respuestas de cada individuo, los valores ordinales correspondientes se ingresan a una matriz de comparación pareada (**Tabla 12**)

Por ejemplo, en la **Tabla 11**, el número 7 que se ingresó en la intersección del renglón de “uso de suelo” y la columna de la “Elevación relativa” (en negrita) significa que, al determinar la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra, el experto está considerando que uso de suelo es “moderadamente más

importante” que la elevación relativa. Si esta afirmación es verdadera, entonces la inversa también lo es, lo cual está indicado por el ingreso de 1/3 (también en negrita*) que se encuentra en la intersección del renglón de la “Elevación relativa” y la columna de la “uso de suelo”. Como paso final, los valores de cada columna se suman y el total se coloca en el último renglón.

3.2.4.2 Cálculo de las ponderaciones de cada factor causal

Una vez completas las matrices de comparación pareada, se recalculan las ponderaciones de los factores causales. Esto se hace convirtiendo, en primer lugar, cada valor ordinal de la **Tabla 12** a un porcentaje de la suma por columna. En la **Tabla 13** se presenta el resultado al efectuar esta operación sobre los valores reportados en la **Tabla 12**. La ponderación de cada factor causal, que en realidad corresponde al porcentaje de la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra que puede ser atribuido a este factor, se calcula después como el valor medio de cada uno de los renglones (la columna negra en la **Tabla 12**). En la revisión de la integridad de este cálculo, todas las ponderaciones obtenidas deben sumar 1.

Tabla 12. Ejemplo de la matriz de comparación pareada que analiza los factores causales de la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra.

	Precipitación diaria máxima anual (5 años)	Distancias de las fallas	Elevación relativa	Distancias de las carreteras	Distancias de las redes de desagüe	Textura del suelo	Uso del suelo
Precipitación diaria máxima anual (5 años)	1	6	5	4	3	1/2	3
Distancias de las fallas	1/6	1	1/2	1/3	1/5	1/7	1/4
Elevación relativa	1/5	2	1	1/2	1/4	1/6	1/3
Distancias de las carreteras	1/4	3	2	1	1/3	1/5	1/2
Distancias de las redes de desagüe	1/2	4	4	3	1	1/3	2
Textura del suelo	2	7	6	5	3	1	4
Uso del suelo	1/3	6	3	2	1/2	1/4	1
Total	4.45	28	21.50	15.83	7.28	2.59	11.08

3.2.5 Creación de los mapas de distribución de la susceptibilidad y del nivel de intensidad del peligro de deslizamientos de tierra

Después de haber estandarizado la distribución de los factores causales (excepto pendiente) de acuerdo con una escala continua y de haber asociado una ponderación a cada uno de ellos, se crea el mapa de distribución de la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra, utilizando el método de la combinación lineal ponderada (WLC, Weighted Linear Combination). Este método multiplica cada mapa de distribución de los factores causales estandarizados por su ponderación correspondiente (**Tabla 14**) para obtener las puntuaciones ponderadas de los píxeles. Después, se suman las puntuaciones ponderadas de los píxeles para obtener el mapa susceptibilidades intermedia de deslizamientos. Este mapa se reclasifica en cinco niveles utilizando la técnica de clasificación lineal descrita en el apartado 3.2.2 (Mapa de deslizamientos intermedio reclasificado).

Una vez realizado lo anterior, la distribución espacial de los niveles de intensidad de deslizamientos se deriva de la combinación entre el mapa de deslizamientos intermedio reclasificado y el mapa reclasificado de pendiente.

3.3. Implementación de la metodología

Este capítulo describe cómo se implementó la metodología que se presentó en la sección 3.2 (Metodología), utilizando el software mencionado en la sección 3.3.1. Los nombres de los archivos se presentan en negrita dentro del texto. Cuando un “*” aparece al final del nombre del archivo, esto indica que se trata de los datos de entrada que se describen en el documento Metodología y proceso de implementación para generar los datos, que se encuentra descrito en el capítulo 1.

Tabla 13. Valor porcentual y ponderaciones de los factores por cada factor causal

	Precipitación diaria máxima anual (5 años)	Distancia de las fallas	Elevación relativa	Distancia de las carreteras	Distancia de las redes de desagüe	Tipo de suelo	Cobertura del suelo	Media (ponderaciones de los factores)
Precipitación diaria máxima anual (5 años)	0.22	0.21	0.23	0.25	0.27	0.27	0.19	0.237
Distancia de las fallas	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.06	0.032
Altitud	0.04	0.07	0.05	0.03	0.03	0.03	0.06	0.046
Distancia de las carreteras	0.06	0.11	0.09	0.06	0.05	0.05	0.08	0.070
Distancia de las redes de desagüe	0.11	0.14	0.19	0.19	0.14	0.18	0.13	0.154
Tipo del suelo	0.45	0.25	0.28	0.32	0.41	0.36	0.39	0.350
Cobertura del suelo	0.07	0.18	0.14	0.13	0.07	0.09	0.10	0.111
							Suma	1.00

Tabla 14. Ponderaciones agregadas por cada factor causal

Prioridad	Factor	Ponderación
1	Textura del suelo	0.350
2	Precipitación diaria máxima anual (5 años)	0.237
3	Distancia de las fallas	0.032
4	Elevación relativa	0.046
5	Distancia de las redes de desagüe	0.154
6	Distancia de las carreteras	0.070
7	Cobertura del suelo	0.111
	Suma	1.000

3.3.1 Software requerido

La implementación de la metodología y de los procesos presentados en este documento requiere el software siguiente:

- ArcView 3.x con la extensión Spatial Analyst 1.1, ambos desarrollados por el Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales (ESRI, Environmental Systems Research Institute, Inc.) para operaciones geospaciales.
- ArcGIS 9.x con la extensión Spatial Analyst

- c) También se utilizaron los scripts siguientes, que están disponibles sin costo alguno en el sitio electrónico de internet ArcScripts del ESRI en <http://arcscripsts.esri.com/>, o en la sección de herramientas del primer volumen del Atlas:
- d) Grid Utilities v1.1 (file: Grid01.avx)
- e) Grid Analyst (GridAnalyst.avx)
- f) XTools (XTOOLS.MH.avx)
- g) Grid and theme projector v.2 (grid_theme_prj.avx)
- h) Grid Transformation Tool (sptrnsfrm.avx).

Estos *scripts* tienen que ser ingresados a ArcView antes de aplicar cualquiera de los procesos descritos en las siguientes secciones.

3.3.2 Preparación de los factores causales


Esta sección describe el proceso que se aplica a las diferentes capas de datos de entrada para obtener la distribución espacial de los factores causales.

3.3.2.1 Cálculo de la distancia de las carreteras, fallas y redes de desagüe

La distancia de las características de tres de los factores causales (carreteras, redes de desagüe y fallas geológicas) se obtiene calculando la distancia mínima de cierto lugar hasta cada una de estas características. Esta sección describe los procesos que se aplicaron.

3.3.2.1.1 Distancia de las carreteras y de las fallas

Los siguientes pasos se aplican para medir la distancia desde la red de carreteras y desde las fallas:

1. En ArcGIS 9.X, abrir los archivos con formato shape (archivos shape) de la red de carreteras (**carreteras.shp***) y de las fallas (**tec_mex_e.shp***).
2. En el shapefile de **carreteras.shp**, seleccione todas las carreteras con el botón  de la siguiente manera realizando un cuadro desde la esquina superior izquierda hasta la esquina inferior derecha de tal modo que seleccione todas las carreteras.
3. Empleando el proceso descrito en el **Anexo 21**, proyectar el archivo shape resultante de la proyección geográfica al de Equal Área Cylindrical, para cambiar las unidades del mapa de grados decimales a metros.
4. Guardar el archivo shape resultante como **roads_mx_m.shp**.
5. Utilizar la función del menú Spatial Analyst>Distance>Straight line para crear un GRID de distancias de las carreteras en metros, utilizando las especificaciones siguientes para la Output Grid:
 - a) Distance To: Seleccione el raster en este caso roads_mx_m.
 - b) Maximum distance: en blanco.
 - c) Out put **Cell Size:** = 90m.
 - d) Out put raster: seleccione la ruta y nombre del raster resultante.
 - e) Hacer clic en “OK”.
6. Continuar con los pasos siguientes para cortar el resultado del paso 5 a las fronteras internacionales de la República Mexicana:
 - a) Abrir el archivo de las fronteras internacionales utilizado para el Atlas.
 - b) (**border_mex_e.shp***), este debe estar proyectado en Equal Área Cylindrical (**Anexo 21**).
 - c) En arcgis 9.x hacer que el GRID proyectado que se creó en el paso 5 sea el tema activo y
 - d) utilizar la función Spatial Analyst>Extraction>Extract by mask.
 - e) seleccionar en input raster el Raster a ser cortado en la segunda opción colocar la mascara

- f) en este caso `border_mex_e.shp` de la lista de opciones desplegada, como la capa que se va a utilizar para la referencia del recorte.
- g) En out put raster seleccionar la ruta y guardar como **dist_road_mx_m**.
7. Cambiar la proyección de la cuadrícula **dist_roadmx_m** de cilíndrica a geográfica utilizando el proceso descrito en el **Anexo 22** y guardar el resultado como **dist_roadsmx_g**.
8. Repetir los pasos 2 al 7 sobre la capa de distribución de fallas (**tect_mx.shp***), manteniendo todas las características al medir la distancia y guardando la cuadrícula resultante como **dist_tectmx_g**.

3.3.2.1.2 Distancia de la red de desagüe

Los pasos siguientes se aplican para estimar la distancia de la red de desagüe.

1. Utilizar el proceso descrito en la sección 3.3.2.1.1 para generar el raster final, y guárdelo con el nombre de una para la parte de la línea (**corrienteagua.shp***) y la otra para la parte del polígono (**cuerposagua.shp***) de la serie de datos del desagüe. Nombrar a los resultados **dist_drainmx_l** y **dist_drainmx_p**, respectivamente. Esto se tiene que hacer en forma separada, ya que ArcGIS 9.x no puede tratar las líneas y los polígonos al mismo tiempo.
2. Obtener la distancia mínima de la red de desagüe al conjuntar las cuadrículas resultantes, tanto la **dist_drainmx_l** como la **dist_drainmx_p**, empleando para ello el siguiente proceso:
 - a) usar la función del menú Spatial Analyst>Raster Calculator y escribir la fórmula siguiente en la ventana de cálculo: **([dist_drainmx_l]-[dist_drainmx_p])**. El GRID resultante se guarda de manera automática como calculation.
 - b) emplear la función del menú Spatial Analyst>Reclassify y reclasificar el valor negativo de calculation como “1” y todos los restantes como “NoData”. EL GRID resultante recibe, por el *default*, el nombre de Reclass of calculation.
 - c) utilizar la función del menú spatial Analyst>Raster Calculator y escribir la fórmula siguiente en la ventana de cálculo: **([Reclass of Map calculation]*[distmx_drain_l])**. La cuadrícula resultante se guarda de manera automática como calculation 2.
 - d) usar la función del menú Spatial Analyst> Raster Calculator y teclear la fórmula siguiente en la ventana de cálculo: **([dist_drainmx_p]-[distmx_drain_l])**. El GRID resultante se denomina calculation 3.
 - e) emplear la función del menú Spatial Analyst>Reclassify y reclasificar los valores negativos de calculation 3 como “1” y todos los restantes como “NoData”. El GRID resultante recibe por sistema, el nombre de Reclass of calculation 3.
 - f) utilizar la función Analysis>Map Calculator y escribir la fórmula siguiente en la ventana de cálculo: **([Reclass of Map calculation 3]*[dist_drainmx_p])**. El GRID resultante se denomina calculation 4.
 - g) usar la función del menú Spatial Analyst>Raster calculator y colocar la siguiente Formula Merge([Calculation 2],[Calculation 4]) para fusionar calculation 2 con calculation 4 y crear un GRID en la que cada celda corresponda a la distancia mínima de la línea de desagüe (líneas o polígonos).
 - h) guardar el raster como **dist_drainmxF** dando un clic derecho sobre Calculation 5 y en las opciones del Menú seleccione *export data*.

3.3.2.2 Creación de la capa de distribución de la elevación relativa

En un GRID, la elevación relativa corresponde a la diferencia en elevación que existe entre un pixel y los ocho pixeles adyacentes. A continuación se presenta el proceso que se utiliza para calcular esta capa en el contexto del Atlas:

1. En ArcGIS 9.x, abra la capa del Modelo de Elevación Digital (DEM, Digital Elevation Model) para la República Mexicana (**dem_mx90***).

2. Hacer que el GRID **dem_mx90** sea el tema activo.
3. En ArcGIS 9.x usar la función del menú Spatial Analyst>Neighborhood Statistics y especificar lo siguiente en la ventana Neighborhood Statistics”:
 - a) En input data: dem_mx90.
 - b) Field: Value.
 - c) Statistic type: “Minimum”.
 - d) “Rectangle” como el tipo de análisis de los alrededores, en “neighborhood”.
 - e) 3 como “Width” y “Height” en el cuadrante de “cell”.
 - f) Output raster **NbrMin**.
4. Emplear la función del menú Spatial Analyst>Raster Calculator y escribir la fórmula siguiente en la ventana de la calculadora: $([dem_mx90]-[NbrMin])$.
5. Guardar la cuadrícula resultante como **rel_elevMX**.

3.3.3 Reclasificación de las capas de distribución de los factores causales

Una vez listas las capas de distribución de los diferentes factores causales, el siguiente paso consiste en reclasificar dichas capas de acuerdo con una escala ordinal del 0 al 10. Este proceso se describe en las secciones siguientes.

3.3.3.1 Reclasificación de la distancia de las carreteras, redes de desagüe

La distancia de las carreteras y de las redes de desagüe guardan una correlación negativa respecto a la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra (ver la sección 3.2.3.1). Además, se decidió que las carreteras o los ríos ubicados más allá de los 5,000 metros no tendrían ningún efecto sobre la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra (ver la sección 3.2.3.1.1).

Los pasos que aquí se presentan describen cómo se reclasificaron las capas de distribución de la distancia a las carreteras y las capas de la red de desagüe, con el fin de obtener valores decrecientes a partir de 10 cuando la distancia sea igual a 0, y desde el 0 cuando la distancia sea de 5,000 metros.

1. En ArcView, subir los GRIDS de la distribución de distancia de las carreteras (**dist_roads_mx**) y la red de desagüe (**dist_drainmxF**).
2. Usar la función del Menú Spatial Analyst/Raster Calculator e ingresar la fórmula siguiente en la ventana de la calculadora: $(([dist_roads_mx]-(5000))*(-0.002))$. El GRID resultante se denomina de manera automática **calculation 1**.
3. Utilizar la función del Menú Spatial Analyst/Raster calculator y seleccionar todas los pixeles que forman parte de **calculation 1**. que presenten un valor > 0 . El GRID resultante, misma que se denomina de manera automática Calculation 2, asigna un valor de “1” a los pixeles que presenten un valor inferior a los 5,000 metros y un valor de “0” a los pixeles que exhiban un valor superior a los 5,000 metros.
4. Emplear la función del Menú Spatial Analyst/Raster Calculator e ingresar la fórmula siguiente en la ventana de la calculadora $([calculation 1] * [Calculation 2])$. Asignar el nombre de **roads_scr** a al GRID resultante. Este GRID muestra la puntuación de la distancia de las carreteras en una escala del 0 al 10.
5. Repetir los pasos 2 al 4 en el GRID de distribución de la red de desagüe (**dist_drainmxF**) y guardar el resultado como **drainage_networks_scr**.

3.3.3.2 Reclasificación de la distancia de las fallas

En forma similar a la distancia de las redes de carreteras y de desagüe, la distancia de las fallas guarda una correlación negativa respecto a la susceptibilidad a los deslizamientos, pero el efecto tiene una distancia de hasta 10,000 metros. El proceso utilizado para volver a establecer la escala del área de trabajo es, por lo tanto, idéntico al proceso descrito para el caso de las redes carreteras y de desagüe en la sección 3.3.3.1, excepto que la fórmula a utilizar en el paso 2 debe ser la siguiente: $(([\text{tect_mx}] - (10,000)) * (-0.001))$. El GRID resultante se debe guardar como **faultsmx_scr**.

3.3.3.3 Reclasificación de las precipitaciones y la elevación relativa

Los rasters de la precipitación diaria máxima anual, y la elevación relativa guardan una correlación positiva respecto a la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra. Esto significa que a las áreas con las mediciones máximas se les asigna un valor de 10, y un valor de 0 a aquellas con las mediciones mínimas. El proceso que se utiliza para reclasificar estas cuadrículas a una escala entre el 0 y el 10 se describe a continuación:

1. En ArcView, subir a una vista el periodo de retorno de 5 años de la precipitación diaria máxima (**precMX_5**), y la elevación relativa (**rel_elev_mx**).
2. Hacer que **precMX_5** sea el tema activo.
3. Usar la función Theme>Edit Legend y seleccionar Statistics en la ventana Legend Editor. Anotar los valores mínimo y máximo que aparezcan en el GRID.
4. Emplear la función Analysis/Map Calculator e ingresar la fórmula siguiente en la ventana de la calculadora: $(([\text{precmx}_5] - R_{\text{min}}) * 10) / (R_{\text{max}} - R_{\text{min}})$; donde:
 - a) $R_{\text{mín}}$ = el valor mínimo encontrado en la cuadrícula, en el punto 3.
 - b) $R_{\text{máx}}$ = el valor máximo encontrado en la cuadrícula, en el punto 3.
 - c) Rango estandarizado = 10.
5. Guardar la cuadrícula resultante como **precmx_5_scr**.
6. Repetir los pasos 2 al 5 en las otras dos capas, guardando las cuadrículas resultantes como **rel_elevmx_scr**.

3.3.3.4 Reclasificación de la pendiente

El siguiente proceso se utiliza para reclasificar el mapa de distribución de la pendiente de acuerdo con la escala seleccionada.

1. Activar el layer **slp_p_mex_e**.
2. Usar la opción Analysis/Reclassify module para reclasificar este GRID de acuerdo a la clasificación reportada en la **Tabla 8**.
3. Guardar el GRID resultante como **slpmx_scr**.

3.3.3.5 Cobertura del suelo

El proceso siguiente se utiliza para reclasificar el mapa de distribución de la cobertura del suelo de acuerdo con la escala seleccionada.

1. En ArcView, subir el GRID Landcover de la distribución de la cobertura del suelo (**lc_mx**) y hacer que ésta sea el tema activo.
2. Usar la función Analysis/Reclassify para reclasificar el GRID de acuerdo con la clasificación reportada en la **Tabla 8**.
3. Guardar el GRID resultante como **lcmx_scr**.

3.3.3.6 Textura del Suelo

El proceso siguiente se emplea para reclasificar el mapa de distribución de la textura del suelo de acuerdo con la escala seleccionada.

1. Convertir el archivo shape de la textura del suelo en un raster, de la siguiente manera:
 - a) En ArcView, subir a una vista el mapa de la distribución de la textura del suelo (**soil_texturemx**) y convertirlo en el tema activo.
 - b) Usar la función Theme>Convert to Grid y las especificaciones siguientes:
 - Asignar el nombre de **soil_textmx** a la cuadrícula resultante.
 - Elegir “same as **border_mex_e.shp**” como el Grid Extent output.
 - “0.008333” grados como la dimensión de output cell.
 - Utilizar el número que da el sistema para los valores del número de filas y columnas
 - “texture” como el campo de “cell value”.
 - Seleccionar el nombre del campo que se va a convertir y hacer clic en “OK”.
 - c) Hacer clic en “Yes” para unir los atributos de las características a la cuadrícula
 - d) Hacer clic en “Yes” para agregar el tema a la vista.
 - e) Hacer que **mx_soil_text** sea el tema activo.
2. Emplear el módulo Analysis/Reclassify para reclasificar esta cuadrícula de acuerdo con el esquema de clasificación presentado en la **Tabla 10**.
3. Asignar el nombre de **soilmx_txt_scr** al GRID resultante.

3.3.4 Creación de los mapas de distribución de la susceptibilidad y del nivel de intensidad del peligro de deslizamientos de tierra

Las capas reclasificadas de distribución de los factores causales (excepto pendiente) se combinan con las ponderaciones que resultaron del análisis de comparación pareada (**Tabla 14**) empleando el método de combinación lineal ponderada (WLC, Weighted Linear Combination) como se indica a continuación.

1. En ArcView, subir todas las capas reclasificadas de distribución de los factores causales (**soilmx_txt_scr**, **precmx_5_scr**, **faultsmx_scr**, **rel_elevmx_scr**, **drainage_networks_scr**, **roads_scr** y **lcmx_scr**).
2. Usar la función Analysis/Map Calculator e ingresar la fórmula siguiente en la ventana de la calculadora:

$$(([\text{soilmx_txt_scr}] * 0.350) + (\text{precmx_5_scr}] * 0.237) + ([\text{faultsmx_scr}] * 0.032) + ([\text{rel_elevmx_scr}] * 0.046) + ([\text{drainagenetworks_scr}] * 0.154) + ([\text{roads_scr}] * 0.070) + ([\text{lcmx_scr}] * 0.111)).$$
3. Guardar el GRID resultante como **ldsmx**. (los metadatos asociados al mismo se pueden encontrar en el **Anexo 25** y **Anexo 26**).
4. Reclasificar **ldsmx** en 5 clases de la siguiente manera
 - a) Usar la función Analysis/Reclassify colocando las siguientes especificaciones en la ventana “Reclassify Value”.
 - b) En Classification Field revisar q este seleccionado “Value”.
 - c) Presione el Boton “Classify” y cambie las configuraciones en Método selecciones “Equal Interval” en Number of Classes “5” y presione OK.
 - d) Guarde el GRID resultante como **st_ar_fct_cl**.
5. El siguiente paso consiste en calcular la distribución del nivel de intensidad de deslizamientos mediante la combinación de **ldsmx** y la pendiente reclasificada **st_ar_fct_cl** siguiendo el siguiente proceso:
 - a) Asegúrese de tener ambos GRIDs abiertos en Arcmap - ArcView
 - b) Use la opción Spatial Analyst tools/Local/Combine.
 - c) Agregue ambos raster y output raster coloque el nombre **d_combine_r**
 - d) Abra la tabla de atributos de **d_combine_r**
 - e) Agregue un nuevo campo en la tabla de atributos con add field llamado “**desliza**”.

f) En modo edición introduzca los valores que se indican en la **Tabla 15**, en el campo “desliza”.

Tabla 15. Valores del deslizamiento final.

<i>Factor de deslizamiento (ldsmx)</i>	<i>Pendiente (st_ar_fct_cl)</i>	<i>Deslizamiento Final</i>
1	1	1
2	1	1
3	1	1
4	1	2
5	1	2
1	2	1
2	2	2
3	2	2
4	2	3
5	2	3
1	3	3
2	3	3
3	3	4
4	3	4
5	3	5
1	4	3
2	4	4
3	4	5
4	4	5
5	4	5

- Use la opción Spatial Analyst tools/Reclass/Lookup, en input raster seleccione **d_combine_r** en lookup field seleccione **desliza** y en output raster indique la ruta y guárdelo con el nombre **ldsmx_cln**.

El mapa de distribución del peligro de deslizamientos de tierra obtenido a través de la aplicación de este enfoque se presenta en la **Figura 24** y los metadatos asociados al mismo se pueden encontrar en el **Anexo 25** y **Anexo 26**.

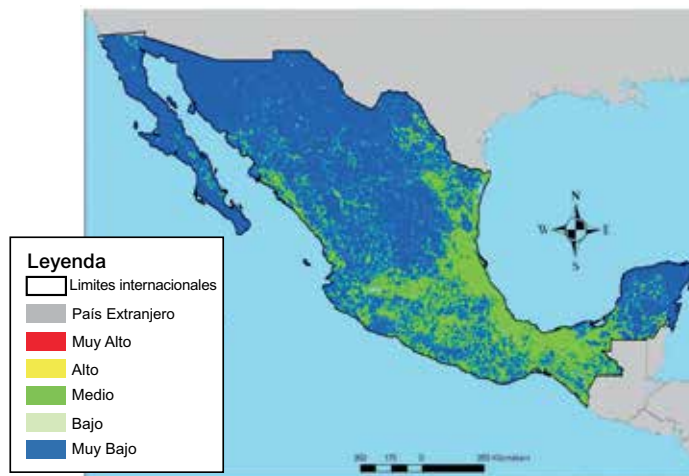


Figura 24. Distribución reclasificada de la distribución del peligro de deslizamientos de tierra para la República Mexicana

3.4 Bibliografía y lecturas recomendadas

1. El Morjani Z., Ebener S., J. Boos, Abdel Ghaffar E., Musani A. (2007). “Reducing the health impact of some disasters: modeling the spatial distribution of 5 natural hazards in the context of the WHO/EMRO Atlas of Disaster Risk2”, *International Journal of Health Geographics* 2007, 6:8.
2. Anbalagan R, 1992. Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Engineering geology*, 32:269–277.
3. Anbalagan R and Singh B, 1996. Landslide hazard and risk assessment mapping of mountainous terrains—a case study from Kumaun Himalaya, India. *Engineering geology*, 43:237–246.
4. Atkinson PM and Massari R, 1998. Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the Central Apennines, Italy, *Computers & geosciences*, 24(4):373–385.
5. Ayalew L and Yamagishi H, 2004. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan, *Geomorphology*, 65(1–2):15–31.
6. Ayenew T and Barbieri G, 2005. Inventory of landslides and susceptibility mapping in the Dessie área, northern Ethiopia. *Engineering geology*, 77(1–2):1–15.
7. Barisone G and Bottino G, 1990. A practical approach for hazard evaluation of rock slopes in mountainous areas. *Proceedings of the 6th IAEG Congress:1509–1515*. Rotterdam, Balkema.
8. Barredo JI, Benavides A, Hervás J and Van Westen CJ, 2000. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain, *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 2(1):9–23.
9. Baum RL, Chleborad AF and Schuster RL, 1998. Landslides triggered by the winter 1996–1997 storms in the Puget Lowland, Washington. Reston, Virginia, US Geological Survey, Open-File Report 98-239. At <http://pubs.er.usgs.gov/usgspubs/ofr/ofr98239>; accessed 10 April 2007.
10. Bender S, 1991. *Primer on Natural Hazard Management in Integrated Regional Development Planning*. Washington, DC, Department of Regional Development and Environment, Executive Secretariat for Economic and Social Affairs, Organization of American States
11. Brabb EE, 1984. Innovative approaches to landslide hazard mapping. *Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides*, vol 1:307–324. Toronto, Canadian Geotechnical Society.
12. Carrara A, 1989. Landslide hazard mapping by statistical methods: a “black-box” model approach. *Proceedings of the International Workshop on Natural Disasters in European–Mediterranean Countries*. Perugia, June 27–July 1, 1988:205–224. Rome, Consiglio Nazionale delle Ricerche/US National Science Foundation.
13. Carrara A, Cardinali M, Detti R, Guzzetti F, Pasqui V and Reichenbach P, 1991. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth surface processes and landforms*, 16(5):427–445.
14. Clerici A, Perego S, Tellini C and Vescovi P, 2002. A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology*, 48:349–364.
15. Dai FC and Lee CF, 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42:213–228.
16. Donati L and Turrini MC, 2002. An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslides with the GIS methodology: application to an área of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy). *Engineering geology*, 63:277–289.
17. Duman TY, Can T, Gökçeoğlu C and Nefeslioğlu HA, 2005. Landslide susceptibility mapping of Çekmece área (Istanbul, Turkey) by conditional probability. *Hydrology and earth system sciences discussions*, 2:155–208.
18. Eastman JR, 2003. *Idrisi Kilimanjaro: guide to GIS and image processing versión 14.00*. Worcester, Massachusetts, Clark University.

19. Ercanoğlu M and Gökçeoğlu C, 2002. Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach, *Environmental geology*, 41(6):720–730.
20. Ercanoğlu M, Gökçeoğlu C and Van Asch ThWJ, 2004. Landslide susceptibility zoning north of Yenice (NW Turkey) by multivariate statistical techniques. *Natural hazards*, 32:1–23.
21. Ercanoğlu M and Gökçeoğlu C, 2004. Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey), *Engineering geology*, 75:229–250.
22. Esmali A and Ahmadi H, 2003. Using GIS & RS in mass movements hazard zonation—a case study in Germichay Watershed, Ardebil, Iran. *Map India Conference 2003*. At http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/landslides/ma03004.htm; accessed 11 April 2007.
23. Glassey PJ, Forsyth PJ and Turnbull M, 1997. A GIS-based hazard information system: Dunedin pilot project. *IPENZ transactions (general)*, 24(1). At <http://www.ipenz.org.nz/ipenz/publications/transactions/Transactions97/general/4glassey.pdf>; accessed 11 April 2007.
24. Gökçeoğlu C and Aksoy H, 1996. Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. *Engineering geology*, 44:147–161.
25. Gomes A, Gaspar JL, Goulart C and Queiroz G, 2005. Evaluation of landslide susceptibility of Sete Cidades Volcano (S. Miguel Island, Azores). *Natural hazards and earth system sciences*, 5:251–257.
26. Gupta RP and Joshi BC, 1990. Landslide hazard zoning using the GIS approach—a case study from the Ramganga Catchment, Himalayas. *Engineering geology*, 28:119–131.
27. Guzzetti F, Carrara A, Cardinali M and Reichenbach P, 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, central Italy, *Geomorphology*, 31:181–216.
28. Guzzetti F, Cardinali M, Reichenbach P and Carrara A, 2000. Comparing landslide maps: a case study in the upper Tiber river basin, central Italy. *Environmental management*, 25(3):247–263.
29. Hansen A, 1984. Landslide hazard analysis. In: Brunsden D and Prior DB, eds., *Slope instability*. New York, Wiley, 523–602.
30. Hansen A and Franks CAM, 1991. Characterization and mapping of earthquake triggered landslides for seismic zonation. *Proceedings of the 4th International Conference on Seismic Zonation*, Stanford, California, August 26–29, 1991:149–195.
31. Jager S and Wieczorek GF, 1994. Landslide susceptibility in the Tully Valley area, Finger Lakes region. Washington. Reston, Virginia, US Geological Survey, Open-File Report 94-615. At <http://pubs.er.usgs.gov/usgspubs/ofr/ofr94615>; accessed 11 April 2007.
32. Jakob M, 2000. The impacts of logging on landslide activity at Clayoquot Sound, British Columbia. *Catena*, 38:279–300.
33. Kelarestaghi A, 2003. Investigation of effective factors on landslides occurrence and landslide hazard zonation—case study Shirin Rood drainage basin, Sari, Iran. At http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/landslides/ma03003pf.htm; accessed 11 April 2007.
34. Komac M and Ribičič M, 2006. Landslide susceptibility map of Slovenia at scale 1:250.000, *Geophysical research abstracts*, 8:03990. At <http://www.cosis.net/abstracts/EGU06/03990/EGU06-J-03990.pdf>; accessed 11 April 2007.
35. Koukis G and Ziourkas C, 1991. Slope instability phenomena in Greece: a statistical analysis. *Bulletin of the International Association of Engineering Geologists*, 43:47–60.
36. Luzi L and Pergalani F, 1999. Slope instability in static and dynamic conditions for urban planning: the “Oltre Po Pavese” case history (Regione Lombardia—Italy). *Natural hazards*, 20(1):57–82.

37. Maharaj R, 1993. Landslide processes and landslide susceptibility analysis from an upland watershed: a case study from St Andrew, Jamaica, West Indies, *Engineering geology*, 34(1–2):53–79.
38. Martinez A. 2003. Elaboration d'un SIG pour la gestion des zones à risque de glissements de terrain dans le quartier de Villatina Medellín, Colombie. Certificate of Geomatics, University of Geneva
39. Nagarajan R, Roy A, Vinod Kumar R, Mukherjee A and Khire MV, 2000. Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 58:275–287.
40. Pachauri AK and Pant M, 1992. Landslide hazard mapping based on geological attributes, *Engineering geology*, 32:81–100.
41. Pachauri AK, Gupta PV and Chander R, 1998. Landslide zoning in a part of the Garhwal Himalayas. *Environmental geology*, 36(3–4):325–334.
42. Ramakrishnan SS, Kumar VS, Sadiq Z and Venugopal K, 2002. Landslide zonation for hill area development. At http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/landslides/nhls0013pf.htm; accessed 11 April 2007.
43. Roth RA, 1983. Factors affecting landslide susceptibility in San Mateo County, California, *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 20(4):353–372.
44. Saaty TL, 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, 15:234–281.
45. Saaty TL, 1990, *Decision making for leaders: the analytical hierarch process for decision in a complex world*. Pittsburgh, Pennsylvania, RWS Publications.
46. Sarkar S and Kanungo DP, 2002. Landslides in relation to terrain parameters—a remote sensing and GIS approach. At http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/landslides/nhls0010pf.htm; accessed 11 April 2007.
47. Sidle RC, Pearce AJ and O'Loughlin CL, 1985. Hillslope stability and land use. Water Washington DC, American Geophysical Union. Resources Monograph Series No. 11.
48. Simos J, 1990. Evaluer l'impact sur l'environnement : une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation. Lausanne, Switzerland, Presses polytechniques et universitaires romandes.
49. Sinha LK, Paul RS and Mehta SD, 1999. Landslide hazard zonation in a part of Giri Basin, Sirmur district (H.P.) using remote sensing techniques & GIS. At http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/landslides/nhls0012pf.htm; accessed 11 April 2007.
50. Suzen ML and Doyuran V, 2004. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental geology*, 45:665–679.
51. Talib JA, 1997. Slope Instability and Hazard Zonation Mapping Using Remote Sensing and GIS Techniques in the Area of Cameron Highlands, Malaysia. At <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1997/ts3/ts3001pf.htm>; accessed 11 April 2007.
52. Tangestani MH, 2003. Landslide susceptibility mapping using the fuzzy gamma operation in a GIS, Kakan catchment area, Iran. At http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/landslides/pdf/40.pdf; accessed 11 April 2007.
53. Turrini MC and Visintainer P, 1998. Proposal of a method to define areas of landslide hazard and application to an area of the Dolomites, Italy. *Engineering geology*, 50:255–265.
54. Van Westen CJ, Seijmonsbergen AC and Mantovani F, 1999. Comparing landslide hazard maps. *Natural hazards*, 20:137–158.
55. Van Westen CJ, 2003. Statistical landslide hazard analysis. At <http://www.itc.nl/ilwis/applications/application05.asp>; accessed 11 April 2007.

56. Varnes DJ, 1978. Slope movement types and processes. In Schuster RL and Krizek RJ, eds. Landslides, analysis, and control, Washington DC, Transportation Research Board. Special Report 176.
57. Voogd H, 1983. Multicriteria evaluations for urban and regional planning. London, Pion Press.
58. Wachal DJ and Hudak PF, 2000. Mapping landslide susceptibility in Travis County, Texas, USA. *Geojournal*, 51:245–253.
59. Zezere JL, Ferreira AB and Rodrigues ML, 1999. Landslides in the North of Lisbon Region (Portugal): conditioning and triggering factors. *Physics and chemistry of the Earth, part A: solid Earth and geodesy*, 24(10):925–934.
60. Zabler L, 1986. A world soil file for global climate modeling. New York, NASA Goddard Institute for Space Studies. NASA Technical Memorandum 87802.

CAPÍTULO IV

Metodología y procesos de implementación para el peligro de olas de calor

4.1 Introducción

La metodología utilizada para la distribución de calor pasa por dos fases. La primera fase se apoya en las técnicas del análisis de frecuencia para estimar el índice diario máximo anual con diferentes periodos de retorno en estaciones climáticas selectas ubicadas en la República Mexicana y sus alrededores. En la segunda fase, se emplea un modelo de regresión múltiple para producir una interpolación del índice de calor diario máximo anual antes de obtener la distribución espacial del nivel de la intensidad del peligro de olas de calor para la región entera.

4.2 Metodología

Las estimaciones de la distribución espacial de los datos meteorológicos tienen una importancia cada vez mayor en el modelado regional y global de peligros. Este atlas utiliza una técnica de mapeo objetiva que emplea datos empíricos y procedimientos estadísticos para estimar la distribución espacial del índice de olas de calor diario máximo anual en periodos de retorno de dos, cinco, ocho y diez años, como medida del peligro de calor en la República Mexicana.

4.2.1 Índices meteorológicos

Muchos índices biometeorológicos se han propuesto en la literatura para evaluar las olas de calor. Para una breve descripción de estos índices, referirse a Parsons [2003] y Discoll [1992].

4.2.1.1 Índice de calor Steadman

El índice de calor (también denominado temperatura aparente) es una medida de cuánto calor se siente cuando la humedad relativa (rh) se suma a la temperatura real del aire. Así, cuando la humedad es baja, la temperatura aparente será inferior a la temperatura del aire, ya que la transpiración se evapora con rapidez para enfriar al cuerpo. Sin embargo, cuando la humedad es elevada (es decir, cuando el aire está saturado con vapor de agua) la temperatura aparente “se siente” más elevada que la temperatura real del aire, debido a que la transpiración se evapora con mayor lentitud [Steadman, 1979, 1984]. Se calcula el índice mediante datos del National Climatic Data Center (CNDC). Esto se calcula mediante una fórmula compleja (Ecuación 4.1), que es obtenida mediante un conjunto de complicadas mediciones y se ha analizado matemáticamente por regresión múltiple para producir la siguiente ecuación para obtener el índice de calor estimado con un error de $\pm 1.3^{\circ}\text{F}$.

Ecuación 4.1

$$\begin{aligned} \text{Índice}_{\text{calor}} = & -42.379 + 2.04901523Ta + 10.14333127rh \\ & - 0.22475541Trh - 6.83783 \times 10^{-3}Ta^2rh \\ & - 5.481716 \times 10^{-2}rh^2 + 1.22874 \times 10^{-3}T^2rh \\ & + 8.5282 \times 10^{-4}Tarh^2 - 1.99 \times 10^{-6}Ta^2rh^2 \end{aligned}$$

en la cual, Ta : es la temperatura ambiente máxima en cada periodo de retorno (en grados Fahrenheit); rh : es la humedad relativa máxima en cada periodo de retorno (en porcentaje).

La siguiente fórmula sencilla para estimar el índice de calor es la desarrollada por Michelozzi et al., [2007]. Esta fórmula se ha aplicado en el proyecto “Evaluación y prevención de los efectos agudos de las condiciones meteorológicas en salud en Europa” (PHEWE):

Ecuación 4.2

$$AT = -2.653 + 0.994 T_a + 0.0153 (T_d)^2$$

En la cual, AT: Es la temperatura aparente; T_a : Es la temperatura del aire en °C; T_d : Es la temperatura del punto de rocío.

Comparando la ecuación 4.1 y la ecuación 4.2 con la tabla Steadman [Steadman, 1979] el resultado de diversos estudios biometeorológicos, la **Tabla 16** muestra que la ecuación 4.1 es más precisa.

Tabla 16. Comparación entre la fórmula de Michelozzi et al. [2007] (usada en el PHEWE) y la fórmula NCDC (usada en este estudio), basadas en la tabla Steadman 1979.

	Ta: Temperatura ambiente (°C)	Td: Temperatura del punto de rocío (°C)	Rh: Humedad relativa (%)	HI: Índice de calor (°C)	Diferencias con la Tabla Steedman
Michelozzi formula	37	25		43,6875	2,3125
NCDC formula	37	25	50	46	0
Steadman table 1979	37	25	50	46	
Michelozzi formula	32	28		41,1502	2,8498
NCDC formula	32	28	80	44	0
Steadman table 1979	32	28	80	44	
Michelozzi formula	44	23		49,1767	2,8233
NCDC formula	44	23	30	52	0
Steadman table 1979	44	23	30	52	
Michelozzi formula	50	10		48,577	0,577
NCDC formula	50	10	10	48	0
Steadman table 1979	50	10	10	48	

4.2.1.2 Índice de calor Humidex

El índice de calor de Canadá, Humidex se ha utilizada por primera vez en 1965. Humidex da una medida de la cantidad de malestar sentido por el efecto combinado de la temperatura y la humedad. En general, los valores Humidex tienden a ser mayores que los valores del índice de calor de Steadman, excepto en el extremo, donde tiende a ser ligeramente inferior. El Humidex se calcula basado en el trabajo de Masterton y Richardson [1979] de la siguiente manera:

Ecuación 4.3

$$\text{Humidex} = (T_a) + h$$

En la cual: $h = (0.5555) * (e - 10.0)$; $e = 6.11 * \exp(5417.7530 * ((1/273.16) - (1/T_d)))$

4.2.1.3 Temperatura efectiva neta (NET)

La temperatura efectiva neta (NET), es desarrollado por el observatorio de Hong Kong [Li y Chan, 2000] y combina el efecto de la temperatura del aire, velocidad del viento y la humedad relativa. La siguiente fórmula se utiliza para calcular la NET:

Ecuación 4.4

$$NET = 37 - (37 - T_a) / (0.68 - 0.0014 \cdot RH + 1 / (1.76 + 1.4 \cdot W_s^{**0.75})) - 0.29 \cdot T_a \cdot (1 - 0.01 \cdot RH)$$

En la cual: T = Temperatura del aire; W_s = Velocidad del viento (m/s); RH = humedad relativa (%)

4.2.1.4 Temperatura aparente

La temperatura aparente (AT), se inventó a finales de 1970, fue diseñada para medir la sensación térmica en condiciones interiores. Fue ampliada en la década de 1980 para incluir el efecto del sol y el viento. La Australian Bureau of Meteorology usa dos maneras para la fórmula del cálculo de la AT basadas en aproximaciones del valor proporcionado por un modelo matemático del balance de calor en el cuerpo humano. Se pueden incluir los efectos de la temperatura, humedad, velocidad del viento y la radiación. Una de ellas incluye los efectos de la temperatura, la humedad y el viento:

Ecuación 4.5

$$AT = T_a + 0.33 \cdot e - 0.70 \cdot W_s - 4.00$$

y otra versión incluye los efectos de la temperatura, la humedad, el viento y la radiación

Ecuación 4.6

$$AT = T_a + 0.348 \cdot e - 0.70 \cdot W_s + 0.70 \cdot Q / (W_s + 10) - 4.25$$

En la cual: T_a = temperatura de bildo seco (°C); e = vapor de la presión de agua (hPa) [humedad]; W_s = velocidad del viento (m/s) a una altura de 10m; Q = radiación neta absorbida por unidad de superficie de área corporal (w/m²)

Entre los índices biometeorológicos ya descritos, hemos utilizado en este trabajo el índice de calor Steadman con el fin de evaluar la ola de calor en las República Mexicana. En primer lugar porque este índice es de mayor uso común para medir el calor. En segundo lugar, se tienen en cuenta solo dos parámetros: temperatura y humedad que son espacialmente menos variables y pueden ser utilizados para dar un buen diagnóstico de una región. Otros factores como el viento y la radiación están muy influenciados por el entorno inmediato. Por ejemplo, la velocidad del viento se reduce por la capacidad de protección de cinturones de árboles y la radiación solar se va afectado por fenómenos cortos.

La aplicación del método elegido en este trabajo pasa por la aplicación de los siguientes pasos (**Figura 25**).

1. La extracción de los datos de la temperatura y punto de rocío diarios.
2. Cálculo del índice de calor diario utilizando la fórmula de Steadman para cada estación meteorológica.
3. Cálculo del índice promedio de la ola de calor máximo anual, y su frecuencia por año, teniendo en cuenta el tamaño y la secuencia de los días de la ola de calor.
4. Estimación de la ola de calor máximo anual con periodos de retorno de dos, cinco, ocho y diez años mediante el análisis de frecuencia Gumbel, con el fin de tener en cuenta el cambio climático global.
5. La identificación de los parámetros relevantes y periodo de retorno, la selección del modelo de regresión para espacializar la ola calor máximo anual empleando un análisis de regresión por pasos.
6. La interpolación de la ola de calor máximo anual para cada periodo de retorno, utilizando los modelos de regresión seleccionados.
7. La agregación y clasificación de los mapas resultantes, para obtener el mapa de la distribución de olas de calor.

4.2.2 Extracción de los datos climáticos

La temperatura y el punto de rocío diarios máximos anuales se extrajeron del resumen de los datos diarios de la superficie global (<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/climatedata/html>) de 164 estaciones climáticas ubicadas dentro de la República Mexicana y en sus alrededores, producido por el Centro Nacional de Datos Climáticos (NCDC) entre 1997 y 2010. En este análisis se utilizaron exclusivamente los datos de las estaciones climáticas que presentaran registros de trece años, por lo menos y que no se encontraran ubicadas en islas, para predecir el índice de calor diario máximo anual con periodos de retorno de dos, cinco, ocho y diez años.

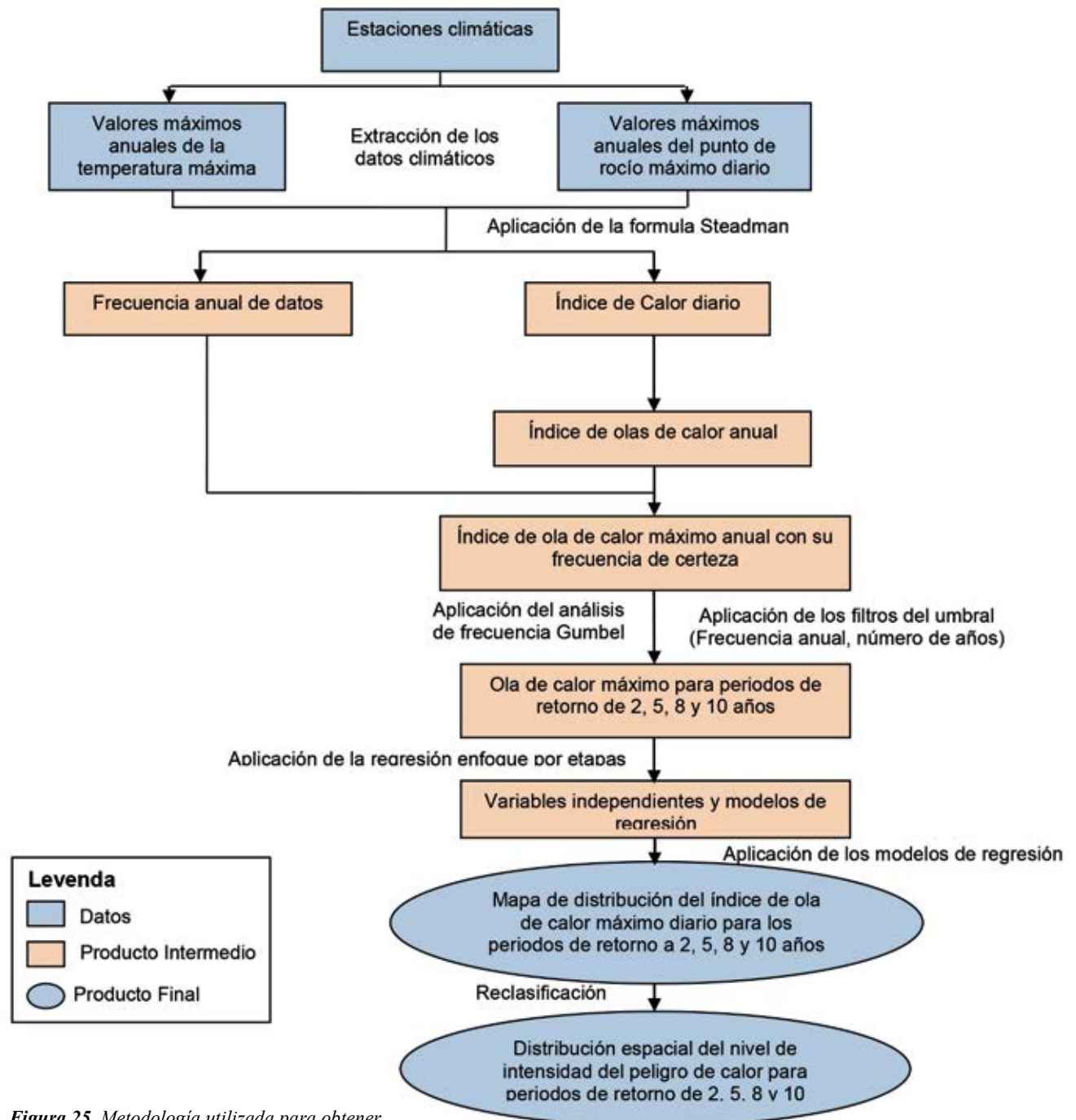


Figura 25. Metodología utilizada para obtener la distribución espacial del nivel de peligro de la intensidad de calor en la República Mexicana

4.2.3 Cálculo del índice de calor diario

Steadman [1979; 1984] desarrolló el índice de calor (también denominado temperatura aparente) como un medio para cuantificar los efectos de diversos factores ambientales, incluyendo el viento, la radiación y el contenido de humedad en la atmósfera, sobre la capacidad que tiene el cuerpo humano para disipar el calor. El índice de calor, tal como se usa en este estudio y al cual nos referimos como el “índice de calor de Steadman” (SHI, Steadman heat index) es una medida del estrés que los niveles elevados de humedad atmosférica imponen a los seres humanos (esta versión del índice de calor no toma en cuenta los efectos de los cambios del viento y de la radiación) [Delworth et al., 1999].

Este SHI, expresado en grados Fahrenheit (F) es una medida de cuánto calor se siente cuando la humedad relativa (rh) se suma a la temperatura real del aire. Así, cuando la humedad es baja, la temperatura aparente será inferior a la temperatura del aire, ya que la transpiración se evapora con rapidez para enfriar al cuerpo. Sin embargo, cuando la humedad es elevada (es decir, cuando el aire está saturado con vapor de agua) la temperatura aparente “se siente” más elevada que la temperatura real del aire, debido a que la transpiración se evapora con mayor lentitud. Por ejemplo una temperatura del aire de 35°C con una humedad relativa de 60 por ciento se traduce a una temperatura aparente (índice de calor) de 45°C . La diferencia entre el SHI y la temperatura del aire es una medida de la tensión de calor colocado en el cuerpo humano por un contenido elevado de vapor de agua atmosférico [Delworth et al., 1999].

El proceso utilizado para calcular el índice de calor diario se describe por los siguientes pasos:

1. Por cada estación climática y día de observación, se obtuvo la humedad relativa diaria rh , utilizando la fórmula siguiente:

Ecuación 4.7

$$rh = \frac{\rho_w}{\rho_{ws}} \times 100$$

en la cual:

Ecuación 4.8

$$\rho_w: \text{presión de vapor real} \quad \rho_w = 6.11 \times 10^{\frac{7.5 \times T_d}{237.7 + T_d}}$$

Ecuación 4.9

$$\rho_{ws}: \text{presión de vapor saturado} \quad \rho_{ws} = 6.11 \times 10^{\frac{7.5 \times T}{237.7 + T}}$$

donde:

T = temperatura máxima diaria del aire en grados Celsius

T_d = temperatura máxima diaria del punto de rocío en grados Celsius.

2. La aplicación de la fórmula Steadman (ecuación 4.1) para generar el índice de calor diario. La fórmula se basa en el cuadro desarrollado por Steadman en 1979 (**Tabla 17**). La tabla mencionada se obtuvo mediante un conjunto de complicadas mediciones y se ha analizado matemáticamente por regresión múltiple para producir la siguiente ecuación para obtener el índice de calor estimado con un error de $\pm 1.3^{\circ}\text{F}$. Para mayor información acerca del índice de calor, favor de consultar a Rothfus [1990] y el sitio de internet del Índice de Calor del Servicio Meteorológico Nacional de la Asociación Oceanográfica y Atmosférica Nacional de Estados Unidos (<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/climatedata/html>).

Notas: 1) Con el objeto de que la fórmula del índice de calor funcione correctamente, la anotación de la humedad relativa (*rh*) se debe hacer utilizando el porcentaje y no la fracción decimal de la unidad, de la siguiente manera: “65” y no “0.65”; 2) La ecuación es útil únicamente en el caso de las temperaturas de 80°F o superiores y de una humedad relativa igual al 40% o más elevada.

Tabla 17. Cuadro del índice de calor de Steadman °F (°C)

Temp.	Relative humidity (%)													
	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
110 (47)	136 (58)													
108 (43)	130 (54)	137 (58)												
106 (41)	124 (51)	130 (54)	137 (58)											
104 (40)	119 (48)	124 (51)	131 (55)	137 (58)										
102 (39)	114 (46)	119 (48)	124 (51)	130 (54)	137 (58)									
100 (38)	109 (43)	114 (46)	118 (48)	124 (51)	129 (54)	136 (58)								
98 (37)	105 (41)	109 (43)	113 (45)	117 (47)	123 (51)	128 (53)	134 (57)							
96 (36)	101 (38)	104 (40)	108 (42)	112 (44)	116 (47)	121 (49)	126 (52)	132 (56)						
94 (34)	97 (36)	100 (38)	103 (39)	106 (41)	110 (43)	114 (46)	119 (48)	124 (51)	129 (54)	135 (57)				
92 (33)	94 (34)	96 (36)	99 (37)	101 (38)	105 (41)	108 (42)	112 (44)	116 (47)	121 (49)	126 (52)	131 (55)			
90 (32)	91 (33)	93 (34)	95 (35)	97 (36)	100 (38)	103 (39)	106 (41)	109 (43)	113 (45)	117 (47)	122 (50)	127 (53)	132 (56)	
88 (31)	88 (31)	89 (32)	91 (33)	93 (34)	95 (35)	98 (37)	100 (38)	103 (39)	106 (41)	110 (43)	113 (45)	117 (47)	121 (49)	
86 (30)	85 (29)	87 (31)	88 (31)	89 (32)	91 (33)	93 (34)	95 (35)	97 (36)	100 (38)	102 (39)	105 (41)	108 (42)	112 (44)	
84 (29)	83 (28)	84 (29)	85 (29)	86 (30)	88 (31)	89 (32)	90 (32)	92 (33)	94 (34)	96 (36)	98 (37)	100 (38)	103 (39)	
82 (28)	81 (27)	82 (28)	83 (28)	84 (29)	84 (29)	85 (29)	86 (30)	88 (31)	89 (32)	90 (32)	91 (33)	93 (34)	95 (35)	
80 (27)	80 (27)	80 (27)	81 (27)	81 (27)	82 (28)	82 (28)	83 (28)	84 (29)	84 (29)	85 (29)	86 (30)	86 (30)	87 (31)	

4.2.4 Cálculo de la media de la ola de calor máximo anual

Una ola de calor se define por Robinson [2001] como un período de calor inusualmente alto y prolongado relacionado a un estrés atmosférico, lo que causa modificaciones en el estilo de vida, y que puede tener impactos considerables sobre la mortalidad humana, las economías regionales, y los ecosistemas ([Reid et al., 2010, Gosling et al., 2008, 2007; Hajat et al., 2006; Meehl and Tebaldi, 2004; WHO, 2003; Easterling et al., 2000]. No existe una definición universal de una ola de calor [Souch and Grimmond, 2006; Meehl and Tebaldi, 2004, Robinson, 2001], el término es relativo a las condiciones climáticas en una área en particular. Temperaturas que las personas de un clima caluroso pueden considerar normales pueden ser una ola de calor en una zona fría si están fuera del patrón del clima normal para dicha zona [Robinson, 2001]. Muchas definiciones se han utilizado en la literatura para las olas de calor que cuantifican la duración y/o intensidad de un evento extremo, y depende de los países y regiones [Baccini et al., 2008; Gosling et al., 2008; Ebi and Meehl, 2007; Schär et al., 2004; Palecki et al., 2001; Hurth et al., 2000].

En los países bajos, una ola de calor se define como periodo de al menos 5 días consecutivos en los que la temperatura máxima sea superior a 25°C (77°F), incluyendo por lo menos 3 días con una temperatura

máxima superior a 30°C (86°F) [Huynen et al., 2001]. La misma definición se utiliza en Bélgica y Luxemburgo. En Dinamarca una ola de calor se define como un período de al menos 3 días consecutivos con un periodo de temperatura máxima media supera los 28°C para más del cincuenta por ciento del país (82.4°F). En China, los días de calor se definen cuando la temperatura máxima diaria supera los 35°C (95°F) [Tan et al. 2007]. Beniston [2004] define a las olas de calor en tres días consecutivos que la temperatura supera el percentil 90 de la temperatura máxima en verano. Gosling et al. [2007] define las olas de calor como los períodos que duran tres o más días consecutivos donde la temperatura máxima diaria fue igual o mayor que el percentil 95 de la temperatura máxima en verano durante todo el periodo de registro. En el proyecto Euroheat una ola de calor se define como un periodo donde el índice de calor máximo y mínimo están por encima del percentil 90 de la distribución mensual durante al menos dos días. (OMS, 2010). En Canadá, la ola de calor es un período al menos de 2 días consecutivos durante el cual el máximo Humidex supera los 40°C (104°F). En los Estados Unidos, el servicio Meteorológico Nacional definió una ola de calor como un periodo de al menos 2 días consecutivos durante los cuales el índice de calor (HI) bajo durante el día y alto durante la noche exceda los valores del umbral de estrés térmico de 40°C (105°F) y 27°C (80°F), respectivamente.

La Organización Meteorológica Mundial define una ola de calor, cuando la temperatura máxima diaria de más de cinco días consecutivos supera la temperatura máxima media de 5°C (41°F), periodo normal entre 1961 – 1990, según el estudio en el documento (Frich et al, 2002). Sin embargo, en ausencia de una definición adecuada de una ola de calor y de la necesidad de evaluarla, con referencia al impacto humano, aunque se trata de un fenómeno meteorológico [Gosling et al, 2008; Kovats y Jendritzky de 2006, Robinson, 2001], hemos propuesto en este estudio la definición sobre la base de los umbrales de las previsiones de estrés térmico con referencia a los impactos humanos, desarrollados por el National Weather Service (NWS) (**Tabla 18**).

Los criterios del NWS de calor excesivo de asesoramiento se basan en el máximo diario y HI mínimo. Sin embargo, la máxima y mínima de datos de punto de rocío a partir de (CNDC) no están disponibles. Así, para nuestro estudio definimos una ola de calor como un período de al menos tres días consecutivos del año (el usuario puede elegir sus propios días consecutivos) que tiene un valor máximo de la media del índice de calor en comparación con todas las tripletas de del mismo año. Los umbrales adoptados por NWS para alarmas y avisos se han utilizado en este trabajo para estimar la sensación de calor humano.

Tabla 18. Correspondencia entre los niveles de intensidad del índice de calor (HI) y trastornos específicos (US National Weather Service)

Índice de calor	Peligro
130°F o superior (54°C o superior)	Inminente golpe de calor o insolación es muy probable con la exposición continua
105-129°F (41-54°C)	Probable insolación, calambres musculares y/o agotamiento por el calor. Posible golpe de calor cuando va aunado a la exposición prolongada y/o a la actividad física
90-105°F (32-41°C)	Posible insolación, calambres musculares y/o agotamiento por el calor cuando va aunado a la exposición prolongada y/o a la actividad física.
80-90°F (27-32°C)	La fatiga es posible con exposición prolongada y/o física.

La metodología utilizada para el cálculo de la ola de calor de una estación meteorológica (**Tabla 19**):

1. Cálculo de la media del índice de calor para cada período, de días consecutivos (el usuario puede elegir sus propios días consecutivos (3, 5, 7...)). A continuación se muestra un ejemplo del cálculo de la media del índice de calor para cada tres días consecutivos (mediante la exploración de un rango de tres días). En el caso de la temperatura inferior a 70 ° F (ver sección 4.2.3), para los días no consecutivos, el índice promedio de calor no podrá ser calculado (**Tabla 19**).
2. Cálculo del índice de la ola de calor anual para cada estación meteorológica mediante el uso de la función máximo; (ejemplo Max (...; 76,5351, 75,9861, 76,9819; 78.471; 78.471; 79.151; ...) es 96,8181.

Tabla 19. Ejemplo del cálculo de la media del índice de calor para grupos de tres días consecutivos

Fecha	Índice de calor diario	Media del índice de calor para 3 días consecutivos
⋮	⋮	⋮
19940223	78.9626	77.9145
19940224	77.1466	0
19940225	0	0
19940226	0	0
19940227	76.7119	0
19940228	75.2886	76.5351
19940301	77.6049	75.9861
19940302	75.0647	0
19940303	0	0
19940304	75.6268	0
19940305	77.3278	76.9819
19940306	77.991	78.471
19940307	80.0941	79.151
19940308	79.368	78.9108
19940309	77.2702	78.9887
19940310	80.3279	81.1047
19940311	85.7159	84.0922
19940312	86.2328	84.6696
19940313	82.06	83.7727
19940314	83.0254	82.1133
19940315	81.2545	80.6407
19940316	77.6421	0
19940317	0	0
19940318	0	0
19940319	76.4011	0
⋮	⋮	⋮

4.2.5 Estimación de predicciones futuras de la ola de calor máxima anual

En la última década es cada vez más evidente el hecho de que el clima esta cambiando. El grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en ingles) reporta que las olas de calor han ido en aumento hacia finales del siglo 20 [IPCC, 2007], y se prevé que la frecuencia, intensidad y duración siga aumentando en todo el mundo [OMS, 2010; Baccini et al, 2008;. IPCC, 2007; Meehl et al, 2007;. Robinson, 2001], y eventos como las olas de calor del año 2003 en Europa serán mas comunes [Meehl et al., 2007]. Estos eventos podría dar lugar a futuros aumentos en la morbilidad y mortalidad [Reid et al, 2010;. Baccini et al, 2008; Campbell-Lendrum y Woodruff, 2007; OMS, 2003b;. Delworth et al, 1999]. Estos cambios climáticos son causados por el impacto combinado de la creciente población humana y las actividades económicas [OMS, 2003b].

El IPCC [2000] ha desarrollado una serie de 40 escenarios de posibles trayectorias futuras de crecimiento de la población, desarrollo económico y tecnológico. Cada escenario ofrece una estimación de los niveles de emisión de gases de efecto invernadero, y predice los cambios en la temperatura [Campbell-Lendrum y Woodruff, 2007]. Por ejemplo la temperatura se puede estimar en 2030 en un aumento del 0.54 °C (Escenario B2 (escenario de bajas emisiones)), 0.84°C (escenario A1B (escenario medio de emisiones)) o 1.02 °C (escenario A2(escenario de emisiones altas)), en relación con el periodo de referencia [OMS,2010].

En este trabajo, se ha decidido no utilizar los escenarios del IPCC para la espacialización de la distribución de la proyección de olas de calor para la republica Mexicana por las siguientes dos razones:

1. Se da una tasa constante de cambio de temperatura en relación con el periodo de referencia, añadiendo a la temperatura diaria (T) el correspondiente cambio proyectado de temperatura media (DT) en una sola celda del GRID (por ejemplo $\Delta T = 0.54^{\circ}\text{C}$ para el escenario B2, $\Delta T = 0.84^{\circ}\text{C}$ para el escenario A1B and $\Delta T = 1.02^{\circ}\text{C}$ para el escenario A2). Por lo tanto se obtiene una estimación no realista en el futuro.
2. Se requiere de un análisis detallado de los cambios climáticos para las evaluaciones nacionales, contribuyendo a los responsables políticos y científicos para la selección de escenarios y modelos para la representación de la incertidumbre sobre las condiciones futuras. Este proceso requiere una cierta cantidad de tiempo para realizarlo y por lo tanto no es factible en este estudio.

Sin embargo, y debido a que los datos meteorológicos varían a través del espacio y tiempo, es necesario analizar los datos de periodos anteriores y numerosos lugares para interpretar adecuadamente las tendencias pasadas. La identificación de los patrones históricos permite estimar las tendencias meteorológicas futuras. La predicción de las tendencias meteorológicas se basa en el uso de una función de distribución de las probabilidades de acuerdo con lo que varios autores argumentan [Fuller , 1914; Foster, 1935; Gumbel, 1941; Gumbel, 1942; Kite, 1977; Stolte y Dumontier, 1977; Gerard y Karput, 1979; Condie y Lee, 1982; Moin y Shaw, 1985; Stedinger y colaboradores, 1992; USACE, 1993; y Jones y colaboradores, 2005]. La función de la distribución de las probabilidades produce las condiciones meteorológicas esperadas en diversos periodos de tiempo (periodos de retorno) en el futuro.

Este enfoque no requiere una comprensión total de la meteorología ni de los fenómenos meteorológicos, sino que examina la relación entre la magnitud registrada y la frecuencia de la ocurrencia de los fenómenos para lograr identificar alguna regularidad estadística entre las mismas. Así, el pasado se extrapola al futuro. Con frecuencia, las funciones de distribución de probabilidades que se utilizan incluyen la Gumbel, la logarítmica normal, la Pearson tipo 3, la log-Pearson tipo 3 y la gamma. A pesar de la abundante literatura que existe sobre este tema, no hay ninguna función de distribución preferente para el análisis de frecuencia de los datos meteorológicos, debido a que cada función tiene su propio conjunto de ventajas y desventajas únicas. El problema se complica por la necesidad de evaluar los datos meteorológicos para los periodos de retorno que exceden la duración del registro observado.

Dentro de nuestro contexto, la función de distribución de valores extremos de Gumbel [Gumbel, 1941; Gumbel, 1954; Gumbel, 1960; Landwehr et al., 1979; Vogel, 1986; Sarma, 1999; El Morjani, 2003; Koutsoyiannis, 2004; He et al., 2006] es la función más apropiada, puesto que busca identificar la distribución temporal de los valores extremos en los diversos periodos de retorno.

En particular, la distribución de Gumbel es un caso especial de la distribución de Fisher-Tippett (el nombre de Sir Ronald Aylmer Fisher (1890-1962) y Leonard Henry Caleb Tippett (1902-1985)), también conocida como la distribución de los log-Weibull. Además, esta función de distribución de probabilidades (ecuación 4.4) es una de las que se emplea más ampliamente para la predicción de valores extremos al analizar datos hidrológicos y meteorológicos [Meylan y Musy, 1998]:

Ecuación 4.10

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-a}{b}}}$$

en la cual: $F(x)$ = la función de la distribución acumulativa; a y b = los parámetros de ajuste; a es un parámetro del lugar y b es un parámetro de la escala.

Al reemplazar $\frac{x-a}{b}$ por la variable reducida u , la función de la distribución acumulativa se convierte en:

Ecuación 4.11

$$F(x) = e^{-e^{-u}} \rightarrow u = -\ln[-\ln F(x)] = -\ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right]$$

en la cual: $F(X) = 1 - \frac{1}{T}$ y T = periodo de retorno.

Si tomamos como ejemplo la estación de Saltillo en Coahuila y la temperatura, la serie de valores extremos de la temperatura máxima diaria anual se adapta a la distribución de Gumbel por medio de los siguientes pasos (**Tabla 16**).

1. La serie de la temperatura máxima diaria anual se categoriza en orden ascendente (**Tabla 16**).
2. La frecuencia empírica se calcula por cada valor, utilizando la fórmula de Hazen [Meylan y Musy, 1998]

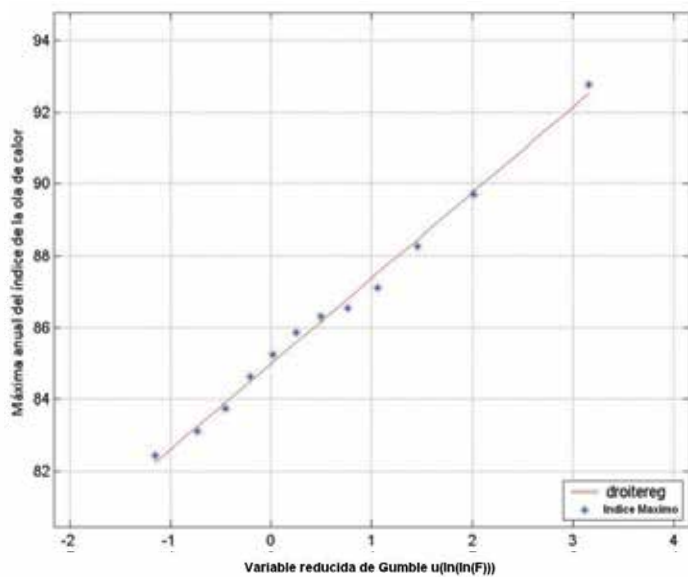
$$F = \frac{r - 0.5}{n}$$

en la cual r es la categoría de cada valor y n es el número de los años del registro (**Tabla 16**).

3. La variable reducida de Gumbel, u , se calcula aplicando la ecuación 4.5 (**Tabla 20**).
4. Después se calcula la media de la variable meteorológica y de la variable reducida de Gumbel.
5. El ajuste de la distribución de Gumbel se estima en forma visual, trazando una gráfica donde se presentan los datos del índice de la ola de calor anual y la variable reducida de Gumbel, u (**Figura 26**). La gráfica permite identificar los valores atípicos, mismos que se pueden eliminar de la serie de datos. En el caso de la estación meteorológica de Saltillo (**Figura 26**), la gráfica muestra un ajuste adecuado a la distribución de Gumbel y la ausencia valores atípicos.

Tabla 20. Categorización de la frecuencia empírica de la ola de calor anual, de la variable reducida de Gumbel y los parámetros estadísticos asociados, para la estación de ejemplo.

Año	Max ola calor (T)	Rango	Frecuencia empírica (F) $F(x)=(r-0.5)/n$	Reducción de Gumbel (u) $u=-\ln(-\ln F(x))$
1997	82.4377	1	0,041667	-1,1563
1996	83.101	2	0,125	-0,7321
2005	83.7529	3	0,20833	-0,45019
2004	84.6323	4	0,29167	-0,20876
2003	85.2341	5	0,375	0,019357
1997	85.8586	6	0,45833	0,24826
1999	86.2935	7	0,54167	0,48922
1994	86.524	8	0,625	0,75501
2000	87.1099	9	0,70833	1,0647
2001	88.2756	10	0,79167	1,4541
2002	89.7226	11	0,875	2,0134
1998	92.7673	12	0,95833	3,1568
Mean	86.3091			0,55446
Standard deviation	2.9217			1,2273
a	84.9892			
b	2.3806			

**Figura 26.** Índice de la ola de calor anual y la distribución de la variable reducida de Gumbel, en el caso de la estación meteorológica de Saltillo, Coahuila.

6. Los parámetros de ajuste estadístico de la distribución (a y b) se derivan empleando el método de los mínimos cuadrados (**Tabla 20**):

Ecuación 4.12

$$b = \frac{S_x}{S_u}$$

Ecuación 4.13

$$a = \bar{x} - b\bar{u}$$

en las cuales: S_x = la desviación estándar de la variable meteorológica

S_u = la desviación estándar de la variable reducida de Gumbel.

\bar{x} = la media de la variable meteorológica.

\bar{u} = la media de la variable reducida de Gumbel.

Los parámetros de ajuste permanecerán iguales en cada periodo de retorno (**Tabla 21**).

7. La temperatura máxima diaria anual se calcula para el periodo de retorno deseado, T (dos, cinco y 10 años), utilizando el siguiente modelo estadístico (**Tabla 21**):

Ecuación 4.14

$$X_T = a + bu = a + b \left(-\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right)$$

en la cual: X_T = valor de la variable con un periodo de retorno T

El proceso de cálculo se divide en las siguientes tres etapas, utilizando en el ejemplo un periodo de retorno de cinco años.

a) El cálculo de la probabilidad no debe excederse $F(x) = 1 - \frac{1}{T}$ puesto que $T = 5$ años,

$F(x) = 0.8$.

b) El cálculo de la variable reducida de Gumbel empleado en la ecuación 4.5, $u = 1.5$.

c) El cálculo de la temperatura máxima diaria anual, utilizando la relación lineal indicada en la ecuación 4.8 (a y b se determinan por medio de la ecuación 4.6 y la ecuación 4.7):

$$a = 84.82 \text{ y } b = 1.34 \rightarrow X_5 = 84.82 + (1.34 \times 1.5) = 86.84.$$

Tabla 21. Ola de calor máxima anual para la estación meteorológica de ejemplo, con periodos de retorno de dos, cinco, ocho y 10 años.

Periodo de retorno (años)	Parámetros de ajuste		Temperatura diaria máxima anual (°C)
	a	b	
2	84.9892	2.3806	85.8617
5	84.9892	2.3806	88.5601
8	84.9892	2.3806	89.7823
10	84.9892	2.3806	90.3464

El proceso antes descrito se repitió 328 veces, para generar la temperatura máxima diaria anual y la humedad relativa de cada estación meteorológica y para cada periodo de retorno (dos, cinco, ocho y 10 años).

4.2.6 Identificación de los parámetros y selección del modelo de regresión

La interpolación espacial se utiliza de manera muy amplia para traducir los datos meteorológicos dispersos e irregulares (los datos recolectados en lugares diferenciados, p. e., en los extremos) a superficies de datos continuos (rasters). La elección del método de interpolación tiene una importancia especial en la República Mexicana, donde los datos meteorológicos son escasos y existen importantes cambios de valores en distancias espaciales cortas. Además, la densidad espacial, la distribución y la variabilidad espacial de las estaciones de muestreo influyen en la selección de la técnica de interpolación [McEachren y Davidson, 1987]. Al disponer de un conjunto de datos meteorológicos, los investigadores se ven desafiados por una diversidad de métodos de interpolación espacial estocásticos y deterministas para estimar los valores de los datos en los lugares no muestreados:

- *métodos de estimación determinista*, que incluyen los métodos de *ponderación de la distancia inversa* [Legates y Willmont, 1990; Eischeid et al., 1997; Lennon y Turner, 1997; Willmott y Matsuura, 1997; Collins y Bolstad, 1996; Ashraf et al., 1997; Dodson y Marks, 1997] y los *métodos de spline* [Eckstein, 1989; Hutchinson y Gessler, 1994; Hulme et al., 1997; Lennon y Turner, 1997; Collins y Bolstad, 1996];
- *técnicas estocásticas*, que incluyen las técnicas de kriging y cokriging [Matheron, 1963; Hudson y Wackernagel, 1994; Collins y Bolstad, 1996; Hammond y Yarie, 1996; Holdaway, 1996; Ashraf et al., 1997; El Morjani, 2003] y de regresión polinomial [Myers, 1990; Collins y Bolstad, 1996; Benzi et al., 1997; Chessa y Delitala, 1997; Hargy, 1997; Vogt et al., 1997; Agnew y Palutikof, 2000; El Morjani, 2003; Li et al., 2006].

Para un resumen de la descripción de estos métodos, se debe consultar a Collins y Bolstad [1996] y a El Morjani [2003].

Las características de los datos que se encontraron en el caso de la República Mexicana dieron resultados inverosímiles al aplicar los métodos de ponderación de la distancia inversa y de interpolación kriging, como a continuación se explica con mayor detalle.

La aplicación del método de ponderación de la distancia inversa a un área de prueba generó efectos de puntos pequeños o de “ojo de pájaro” alrededor de la ubicación de las estaciones meteorológicas, los cuales no resultaban verosímiles, ya que la variación espacial del índice de calor diario máximo no seguía una tendencia regular.

La aplicación de la técnica kriging a la misma área de prueba produjo resultados inconsistentes con los datos originales. Sin importar el modelo utilizado (esférico, exponencial o gaussiano), la validación estadística cruzada no se ajustó al semi-variograma espacial teórico. Esto probablemente se debió a que la densidad de las estaciones meteorológicas fue demasiado baja en una área de estudio demasiado grande, como para poder apoyar el uso del método de interpolación de kriging. Por lo tanto, fue necesario encontrar otro modelo que produjera resultados de buena calidad.

Se revisaron las publicaciones especializadas para identificar primero un conjunto de variables que estuvieran correlacionadas de manera significativa con el índice de olas de calor.

Las variables topográficas

- *La altitud (Z)*: se le conoce como un factor fuertemente determinante de la temperatura y, en consecuencia, del índice de calor. En un promedio global, a pesar de las variaciones estacionales y geográficas, las tasas de lapso respecto a la altitud tienen un promedio de 6.5°C por 1000 m de elevación en la troposfera libre [Lutgens y Tarbuck, 1997].
- *La altitud media dentro de cada pixel (Z9)* de la ventana de 3 x 3 pixeles para medir la amplitud de la influencia de la altitud sobre la temperatura en cualquier lugar [He et al., 2006].
- *El aspecto (ASP)* como medida del efecto del clima local (microclima) que puede ser generado por la orientación de la pendiente. Por ejemplo, como los rayos solares provienen del poniente a la hora más caliente del día, durante la tarde, en la mayoría de los casos una pendiente con orientación hacia el poniente será más caliente que una pendiente abrigada, orientada hacia el este. Esto puede tener efectos mayores sobre la distribución de la vegetación que requiere grandes cantidades de humedad.
- *La pendiente (SLP)*, como un factor que determina la cantidad de radiación solar que se recibe; ésta podría tener un impacto sobre el aumento de la temperatura y, en consecuencia, sobre el índice de calor.

Las variables geográficas

- La longitud (X) y la latitud (Y) para explicar los gradientes de gran escala del índice de calor que se pueden observar en la República Mexicana.
- La distancia a la costa más cercana (d_Coast) para explicar las influencias marítimas sobre el índice de calor.

Una vez identificadas las variables, a las cuales se agregan también sus cuadrados y sus cubos, se empleó la técnica de regresión lineal por pasos (hacia atrás y hacia adelante) para identificar su importancia estadística, en su caso, su contribución relativa a la determinación de la variable dependiente (el índice de olas de calor máximo diario), eliminando así a todas las variables no significativas.

Se efectuó un análisis de regresión lineal por pasos, utilizando el programa S-Plus 6.0. La validación de cada regresión se efectuó utilizando un análisis de varianza R^2 , así como un análisis detallado de probabilidad y residual para identificar las variables significativas y, de esa manera, seleccionar el mejor modelo de regresión. Como ejemplo, el análisis de regresión por pasos para un periodo de retorno de 2 años, aplicado a las estaciones meteorológicas, arroja los resultados que se presentan en el **Tabla 22**.

Sólo cinco de las 17 variables independientes contribuyen a explicar la mayor parte de la variación del índice de calor máximo en el caso del periodo de retorno de dos años. Estas cuatro variables son la Altitud (Z), la longitud (distx), distancia a la costa norte (D.Coast.N.km), la distancia a la costa más cercana (d_Coast) y distancia al costa sur (diss), se utilizaron para derivar la siguiente ecuación de regresión:

Ecuación 4.15

$$\begin{aligned}
 HI_2 = & ([d.x] * 0.378545785706) - ([d.x] * [d.x] * 0.000180363114) + ([d.x] * [d.x] * [d.x] * \\
 & 0.000000025116) - ([d.Coast.S.km] * [d.Coast.S.km] * 0.000328391855) + ([d.Coast.S.km] * \\
 & [d.Coast.S.km] * [d.Coast.S.km] * 0.000000242434) - ([d.Coast.N.km] * 0.162082260783) + \\
 & ([d.Coast.N.km] * [d.Coast.N.km] * [d.Coast.N.km] * 0.000000028841) + ([d.Coast.km] * \\
 & [d.Coast.km] * 0.000082402263) - ([Z] * 0.031528155945)
 \end{aligned}$$

Esta ecuación muestra una correlación positiva entre *D.Coast.S.km* y *Dist_X_mexkme*, y *d.Coast.km*, así como una correlación inversa respecto a *D_north_ke* (Distancia a la costa norte), Z (Modelo digital de

elevación). Esto significa que el índice de olas de calor máximo aumenta con la distancia a la costa más cercana, con la distancia a la costa sur y con la longitud, y disminuye con la distancia más cercana a la costa norte y la altura.

Noventa y dos por ciento de la varianza en el índice de calor extremo se explica por las cinco variables retenidas en la ecuación de regresión ($R^2 = 0.92$). El modelo se considera válido y confiable, por la fuerte correlación ($R = 0.92$) y el alto grado de confianza que existe en las variables seleccionadas (una probabilidad muy pequeña [estadística F]). Es claro que esto es significativo estadísticamente, así que la pendiente verdadera de la línea de regresión probablemente no es de cero.

4.2.7 Espacialización del índice de olas de calor máximo diario anual en la República Mexicana

Una vez que se encontraron los modelos de regresión para los periodos de retorno, se aplicaron, antes de agregar los mapas para formar una capa que cubriera a la República Mexicana.

Tabla 22. Modelo de regresión del índice de olas de calor máximo diario anual (periodo de retorno de dos años)

Variable	Coefficiente de regresión	Error estándar	Valor de t	Probabilidad Pr(> t)
z9	-0.016767677763	0.001825172077	-9.186902415683	0.000000000000
d.y.	-0.025884346582	0.013594516043	-1.904028543512	0.058887431930
I(d.y.^2)	0.000024846550	0.000011471755	2.165889203920	0.031954424053
I(d.y.^3)	-0.000000007535	0.000000003401	-2.215693361455	0.028271319144
d.x.	0.164584842231	0.018466815487	8.912464758452	0.000000000000
I(d.x.^2)	-0.000072865869	0.000010727199	-6.792627375608	0.000000000264
I(d.x.^3)	0.000000009947	0.000000001656	6.004966034454	0.000000014684
I(d.Coast.S.km ^2)	-0.000005732820	0.000003600736	-1.592124293687	0.113534492450
d.Coast.N.km	-0.032071037397	0.009805427941	-3.270743264887	0.001340280772
I(d.Coast.N.km ^2)	0.000027205651	0.000005189796	5.242142549729	0.000000550268

Residual standard error: 27.4896067478 on 130 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.926075538259

F-statistic: 180.950207126 on 9 and 130 degrees of freedom, the p-value is 0

4.2.8 Clasificación de los mapas de distribución del índice de olas de calor máximo diario anual en los mapas finales de peligro

La etapa final de la metodología consistió en derivar la distribución espacial del nivel de intensidad del peligro de olas de calor por cada periodo de retorno, a partir de los mapas de distribución del índice de olas de calor máximo diario anual. Esto se hizo reclasificando los mapas de acuerdo con los cinco niveles de intensidad seleccionados para este proyecto (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto).

Esta reclasificación se realiza utilizando el índice de olas de calor del Servicio Meteorológico Nacional de EU (US National Weather Service) (http://www.srh.noaa.gov/bmx/tables/heat_index.php) que se presenta en la **Tabla 23** en donde se vincula a los cinco niveles de intensidad con las clasificaciones correspondientes del Servicio Meteorológico Nacional de EU (US National Weather Service), incluyendo los rangos del índice de olas de calor y los efectos fisiológicos inducidos por el calor.

4.3 Implementación de la metodología

Este capítulo describe cómo se implementó la metodología que se presentó en la sección 4.2, utilizando el software mencionado en la sección 4.3.1. Los nombres de los archivos se presentan en negrita dentro del texto. Cuando un “*” aparece al final del nombre de un archivo, esto indica que se trata de los datos de entrada que se describen en el documento *Metodología y proceso de implementación para generar las series de datos*, que se encuentra descrito en el primer capítulo.

Tabla 23. Correspondencia entre los niveles de intensidad del peligro de calor y la clasificación del Servicio Meteorológico Nacional de EU (US National Weather Service)

Nivel de intensidad	Índice de calor	Peligro	Categoría
Muy alto	130°F o superior (54°C o superior)	Inminente golpe de calor o insolación	Peligro extremo
Alto	105-129°F (41-54°C)	Probable insolación, calambres musculares y/o agotamiento por el calor. Posible golpe de calor cuando va aunado a la exposición prolongada y/o a la actividad física	Peligro
Medio	90-105°F (32-41°C)	Posible insolación, calambres musculares y/o agotamiento por el calor cuando va aunado a la exposición prolongada y/o a la actividad física	Precaución extrema
Bajo	80-90°F (27-32°C)	El ejercicio resulta más extenuante de lo normal	Precaución
Muy bajo	Este nivel no forma parte del cuadro desarrollado por el Servicio Meteorológico Nacional de los EU (US National Weather Service)		

4.3.1 Software requerido

La implementación de los métodos y procesos presentados en este documento requiere del siguiente software:

- ArcView 3.x con la extensión Spatial Analyst 1.1, ambos desarrollados por el Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales (ESRI, Environmental Systems Research Institute, Inc.) para operaciones geoespaciales. También se utilizaron los siguientes scripts, que están disponibles sin costo alguno en el sitio de internet ArcScripts del ESRI en <http://arcscripts.esri.com/>, o en la sección de Herramientas del primer volumen del Atlas:
- Grid Analyst (GridAnalyst.avx)
- Compiled_Table_Tools.avx
- XTools (XTOOLS.MH.avx)
- GRID and theme projector v.2 (grid_theme_prj.avx)
- Matlab 6.x desarrollado por The MathWorks, para la creación de una aplicación con una interfaz de usuario grafica interactiva para el calculo y estimación de la predicción para el futuro de la ola de calor máxima anual, esta aplicación se llama “Model Heat Wave”. Este programa se ha utilizado por la siguientes razones:
 - En esta metodología tratamos con archivos de gran tamaño (tablas de aproximadamente 160,000 filas), software como Excel son limitados para este tipo de análisis.
 - En esta aplicación, los cálculos se realizan constantemente con ciclos, condiciones de prueba, pruebas detenidas, por otra parte, estas pruebas son la ejecución un conjunto de varias funciones relacionadas entre sí, de ahí la necesidad de un software que proporcione una plataforma para poder programarlas.
 - Matlab considera que cualquier variable como una matriz, por lo que los archivos procesados se almacenan en las variables que se consideran como matrices, por lo que el tratamiento de la información es más rápido en comparación con la transformación directa de los archivos.

La aplicación, los códigos de programación desarrollados y el archivo de instrucciones están disponibles para el usuario en el directorio llamado “Software HeatWaveIndex” que contiene los archivos de las siguientes funciones:

calcul_HeatIndex()	fct_CalculHeatIndexPerDay()	index_retour()
calcul_HeatWave()	fct_HeatIndexPerYear()	save_liste_STNs()
delete_errorLine()	fct_MainProgram()	save_one_STN()
delete_null_line()	fct_Preprocessing()	verif_succession()
fixe_threshold()	Gumbel()	
f_rank()	GUI_HWI_Gumbel()	

Estas funciones se explican en las siguientes secciones:

- WordPad o Bloc de notas para visualizar las tablas de resultados
- S-Plus 6.0, desarrollado por Insightful Corporation, para explorar e identificar los parámetros estadísticamente significativos y su contribución relativa a la espacialización del índice de calor empleando una regresión múltiple por pasos.

Estos scripts se deben cargar en ArcView antes de iniciar el proceso que se describe en las secciones siguientes.

4.3.2 Extracción de los datos meteorológicos y pre procesamiento

La fuente de los datos meteorológicos empleados en este protocolo es el Resumen de los Datos Diarios de la Superficie Global producido por el Centro Nacional de Datos Climáticos (NCDC, National Climatic Data Center). El atributo de esta serie de datos incluye los siguientes elementos de los datos diarios:

- temperatura media
- punto medio de rocío
- presión media al nivel del mar
- presión media de la estación
- visibilidad media
- velocidad media del viento
- velocidad máxima sostenida del viento
- velocidad máxima de las ráfagas de viento
- temperatura máxima
- temperatura mínima
- cantidad de precipitación
- profundidad de la nieve
- indicador de la presencia de niebla
 1. lluvia o llovizna
 2. nieve o gránulos de hielo
 3. granizo
 4. truenos
 5. tornado/nube en forma de embudo

De estas variables, se utilizaron los datos diarios de la temperatura media y del punto medio de rocío entre 1997 y 2010.

4.3.2.1. Preparación de los datos meteorológicos

El proceso utilizado para calcular la temperatura y la humedad relativa máximas diarias anuales se describe a continuación:

1. Descargar y guardar los 12 archivos comprimidos con formato .tar de los datos anuales (**all-1997.tar** a **all-2010.tar**) desde la dirección electrónica <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/global sod/>.
2. Abrir los archivos mensuales o semanales en formato .txt para cada año dado n (n = 1997, 1997, ..., 2010) en Microsoft Office Access y guardarlo como un cuadro DBF 4 (dBase IV) (*.dbf) empleando un nombre convencional específico (p.e., **mes_año.dbf** o **semana_año.dbf**). Estos archivos no se abrirán en Microsoft Office Excel porque contienen más de 65,356 registros. Los nombres de los campos y sus descripciones también se pueden encontrar en el **Anexo 27**.
3. Conservar solo las columnas necesarias para el presente trabajo, para esto seguir el siguiente procedimiento:
 - a) En ArcView: constatar que la extensión “Compiled Table Tools” esté cargada.
 - b) En el proyecto ArcView, seleccionar “table” y agregue **mes_1994.dbf** o **semana_1994.dbf**.
 - c) Utilice la opción C-Tables Tools>Delete Multi-Fields y seleccione todos los campos que desee eliminar (Excepto: Campo 1: STN, Campo 3: YEARMODA, Campo 4: TEMP y Campo 6: DEWP).
4. Obtener los archivos nuevos para cada año de observación (1997...2010) de la siguiente manera: estos archivos son necesarios para la sección de pre-procesamiento (4.3.2.2.).
 - a) Abrir los archivos **mes_1994.dbf** o **semana_1994.dbf** y agregar un campo llamado “dato_cadena” en la tabla de atributos con el fin de convertir la fecha en un dato de tipo texto.

- b) Seleccione el campo con encabezado “dato_cadena” y haga clic en “calcular”.
- c) Escriba la siguiente fórmula en la ventana de la calculadora [YEARMODA].AsString
- d) Agregue una columna nueva a la derecha y llámelo “año”.
- e) Seleccione el campo con encabezado “año” y haga clic en el botón calcular.
- f) Escriba la siguiente fórmula en la ventana de la calculadora [date_str].Left(4). De esta manera este campo contiene el año de observación para cada estación.
- g) Seleccione el año = 1997, y guarde la tabla en Year.txt (year= 1997, 1998, ..., 2010), seleccionando File>Export y exportar el archivo con el formato delimited Text (.txt).
- h) En Word pad o bloc de notas, eliminar el primer registro que contiene el nombre de los campos “Campo1”, “Campo 2”, “Campo 3”, “Campo 4”, “Campo 5”, con el fin de tener archivos con contenido numérico exclusivamente. Esta operación facilita el tratamiento en Matlab.
- i) Repita los pasos de la “a-h” para los demás años de observación.
- j) Poner todos los archivos creados Año.txt (año= 1997, 1998, ..., 2008) en la carpeta denominada “Datos”.

4.3.2.2. Pre-procesamiento

Antes de iniciar el pre-procesamiento de los datos, nos proponemos a presentar los requisitos del sistema para la generación de la aplicación del “modelo de ola de calor” creada en el software Matlab.

Requerimientos de Hardware

El mínimo requerimiento de hardware para ejecutar el software Matlab y el modelo “Heat Wave Modeling” es el siguiente:

- Procesador Intel Pentium 3 o superior.
- 256 MB de memoria RAM (512 es mas recomendable).
- 600 MB de espacio en disco duro (1GB es mas recomendable).
- Una tarjeta de grafica (SVGA es mas recomendable).

Sin embargo, todas las pruebas relativas a la aplicación del modelo “Heat Wave Modeling” se han realizado en un equipo con las siguiente características:

- Procesador Pentium IV (1.4 GHZ).
- 512 MB de memoria RAM.
- 2 GB de espacio libre en disco duro.


Por lo consiguiente se recomienda, de ser posible utilizar un ordenador con estas características o superiores.

Requerimientos de Software

La aplicación “Heat Wave Modeling” ha sido diseñada para trabajar con la siguiente configuración:

- Windows NT 4 (Service Pack 5 o 6), Windows 2000 (Service Pack 3 o 4) and Windows XP (todas las versiones)
- MATLAB (6.x o superior)

Con el fin de empezar a utilizar la aplicación “Heat Wave Modeling”:

1. Ejecute el software MATLAB, le aparecerá la siguiente ventana, como se muestra en la **Figura 27**.
2. Antes de continuar, especifique la ruta de la aplicación “Heat Wave Modeling” como directorio actual, utilizando el botón Examinar carpeta .
3. Inicie la aplicación, haciendo clic en el menú File>open, y seleccione el archivo “GUI_HWI_Gumbel” como se muestra en la **Figura 28**. El programa principal se abrirá en el software MATLAB como se muestra en la **Figura 29**.

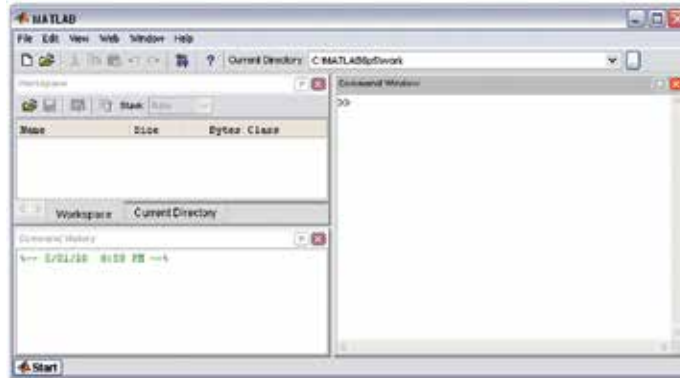


Figura 27. Interface del software MATLAB

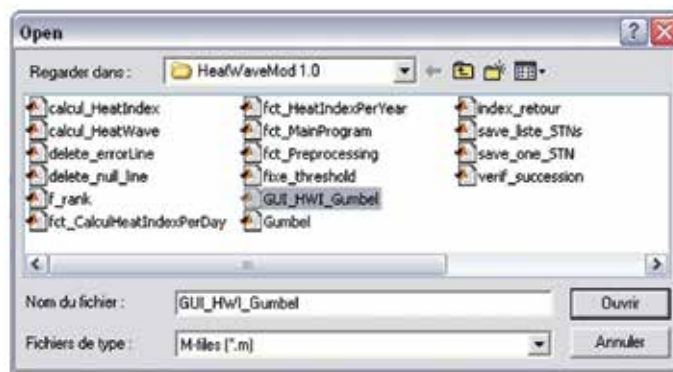


Figura 28. Seleccione el programa principal de la aplicación “Heat Wave Modeling”

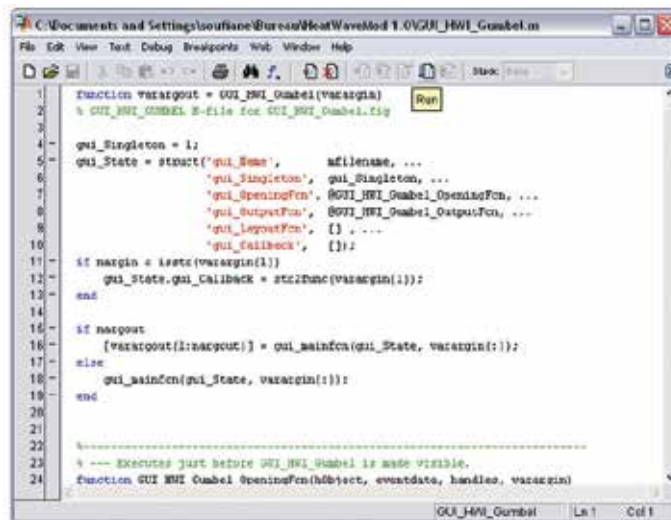


Figura 29. Abriendo el programa principal de la aplicación “Heat Wave Modeling”

4. Presione F5 o haga clic en el botón ejecutar para ejecutar la aplicación “Heat Wave Mod”. La interfaz grafica del usuario de la aplicación se muestra en la **Figura30**.

Ahora, estamos listos para utilizar las capacidades de la aplicación “Heat Wave Modeling”, que consiste en la aplicación del cálculo del máximo anual de ola de calor para una secuencia específica de días y para estimar la predicción futura de ola de calor.

Este menú contiene dos controles: “Operation” y “About”. Al hacer clic en el control “About”, tenemos acceso al archivo de ayuda o a la pantalla resumen (**Figura 31**).

El control “Operation” contiene cinco opciones:

- **Pre-processing**, Permite el pre-procesamiento de datos;
- **Heat Wave Index**, permite calcular el índice máximo anual de la ola de calor
- **Saving STN**, permite guardar los datos de cada estación en un archivo;
- **Gumbel method**: permite calcular el índice de ola de calor par a diferentes periodos de retorno, y contiene dos sub menús:
 - **All station**: permite aplicar el método Gumbel a todas las estaciones.
 - **One station**: permite aplicar el método Gumbel en una sola estación;
- **Exit**: Salir de la aplicación

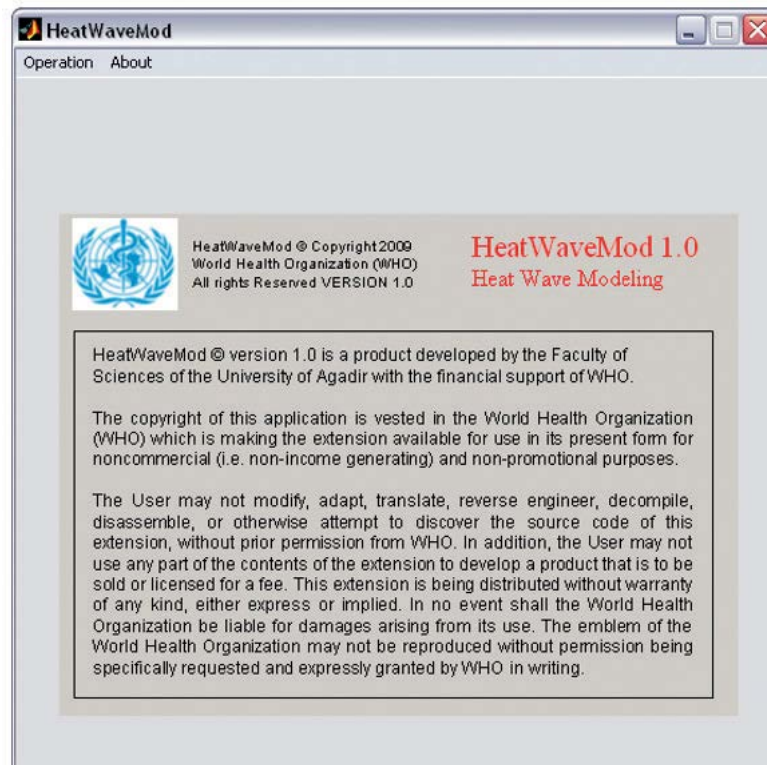


Figura 30. Pantalla de inicio de la aplicación “Heat Wave Modeling”

En las siguientes secciones se describen las diferentes ventanas y los pasos necesario para ejecutar el modelo.

El paso de pre-procesamiento consiste en 1) la eliminación de los registros sin datos de la temperatura de aire o del punto de rocío (líneas con valores 9999.9), y 2) ordenar los registros por estación y por fecha. Dos funciones `Delete:errorLine()` y `fct_Pre-processing()` se realizan para realizar dichas operaciones.



Figura 31. HeatWaveMod© Pantalla resumen

Para iniciar el pre-procesamiento, haga clic en Operation/Pre-processing. Aparecerá la pantalla del asistente como se muestra en la **Figura 32**.

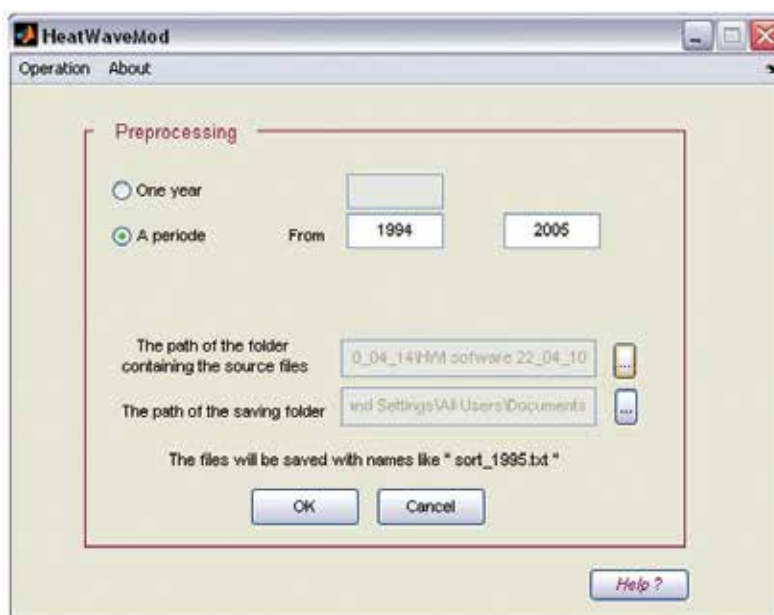



Figura 32. Ventana utilizada para el paso de pre-processing

En los cuadros de dialogo que aparecen en la ventana (**Figura 32**), el usuario puede solicitar el pre-procesamiento de los datos creados en (sección 4.3.2.1) para un solo año “One year”, o durante un periodo de años consecutivos seleccionando la segunda opción “A period”. Recordemos que los archivos de datos son nombrados por años **año.txt** (Ejemplo 1997.txt) almacenamos en la carpeta asignada.

Esta ventana también tiene como fin especificar la ubicación de la carpeta donde están almacenados los datos fuentes y la ubicación de la carpeta donde los resultados del pre-procesamiento se guardarán, haciendo un clic sobre el botón de examinar .

Una vez llenado todo el cuadro de dialogo de la ventana de pre-processing, presione el botón OK para correr la operación. Hecho esto, aparecerá la barra de espera, como se muestra en la **Figura 33**. Esta

ventana aparece para informar al usuario el tiempo necesario para terminar la operación cada año de datos. Este paso se lleva algo de tiempo dependiendo del procesador, el tamaño de los archivos y la complejidad de la operación de ordenación. Al final, el programa guardara los nuevos archivos con el nombre de “sort_year.txt” por ejemplo sort_1997 (**Figura 34**) en la carpeta seleccionada (se recomienda crear una carpeta con el nombre “pre-procesamiento”).

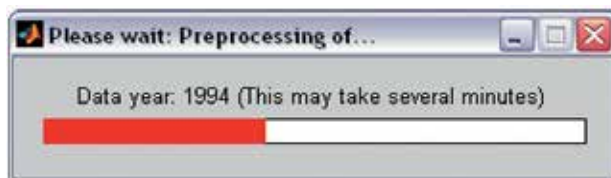


Figura 33. Barra de espera para la operación pre-processing del HeatWaveMod

4.3.3 Cálculo de la media de la ola de calor máximo anual

Este conjunto de pasos nos permite calcular el índice de calor para todos los días mediante la fórmula de Steadman que se describe en la sección 4.2.2. y el cálculo de la media máxima anual del índice de ola de calor.

Archivo	Edición	Ver	Insertar	?
766950	20050910	5.719	2.9418536	
766950	20050911	4.816	2.4663501	
766950	20050912	5.819	3.0447336	
766950	20050913	5.22	2.685168	
766950	20050914	6.221	3.2000824	
766950	20050915	5.32	2.7875336	
766950	20050916	6.32	3.251008	
766950	20050917	6.315	3.248436	
766950	20050918	5.218	2.6841392	
766950	20050919	5.522	2.8105168	
766950	20050920	5.12	2.633728	
766950	20050921	5.621	2.8914424	
766950	20050922	7.72	3.971168	
766950	20050923	6.12	3.118128	
766950	20050924	3.92	2.016448	
766950	20050925	6.919	3.5591336	
766950	20050926	5.118	2.6326992	
766950	20050927	4.82	2.179108	
766950	20050928	6.519	3.3533736	
766950	20050929	6.018	3.0956592	
766950	20050930	5.218	2.6841392	
766950	20051001	6.419	3.3019336	
766950	20051002	5.518	2.8384592	
766950	20051003	6.32	3.251008	
766950	20051004	8.82	4.537008	
766950	20051005	5.919	3.0117336	
766950	20051006	5.87	2.993808	
766950	20051007	5.32	2.736608	
766950	20051008	6.02	3.096688	
766950	20051009	4.919	2.5303336	
766950	20051010	5.119	2.6332136	
766950	20051011	5.42	2.788048	
766950	20051012	5.921	3.0457624	
766950	20051013	6.319	3.2501936	
766950	20051014	5.72	2.942368	

Figura 34. Resultados después de aplicar la operación pre-processing (sort_2005.txt) Columna1: estación, Columna 2: Fecha, Columna 3: Temperatura del aire diaria (°F), Columna 4: (Punto de rocío de la temperatura diario (°F))

4.3.3.1. Cálculo del índice de calor para todos los días

El índice de calor para todos los días se ha calculado utilizando la función `fcn_CalculHeatIndexPerDay()`, donde se han aplicado las ecuaciones (4.1, 4.7, 4.8 y 4.9). La **Figura 35** muestra una parte del extracto del código de esta función.


```

1 function [f_out]=fct_CalculHeatIndexPerDay(matrix_txt_file)
2
3
4 f_in=dlmread(matrix_txt_file);
5
6 [rows,cols]=size(f_in);
7 f_out=zeros(rows,cols+4);
8
9 f_out(:,1:cols)=f_in(:,1:cols);
10
11 for i=1:rows
12
13     Tf=f_out(i,3);
14     T=(Tf-32)*0.5555555;
15
16     Tdf=f_out(i,4);
17     Td=(Tdf-32)*0.5555555;
18
19     e =6.11*10^((7.5*Td)/(237.7+Td));
20     es=6.11*10^((7.5*T)/(237.7+T));
21     rh=(e/es)*100;
22
23     if (Tf>=70)
24         Indexheat = -42.379 + (2.04901523*Tf) + (10.14333127*rh)...
25                 - (0.22475541*Tf*rh) - (6.83783*(10^-3)*Tf^2)...
26                 - (5.481717*(10^-2)*rh^2) + (1.22874*(10^-3)*(Tf^2)*rh)...
27                 + (8.5282*(10^-4)*Tf*rh^2) - (1.99*(10^-6)*Tf^2*rh^2);
28     else

```


Figura 35. Extracto del código utilizado en la función `fct_CalculHeatIndexPerDay`

4.3.3.2. Cálculo de la media anual máxima de la ola de calor

Las tres funciones siguientes se han programado para estimar la máxima anual de la ola de calor.

1. **fct_MainProgram()** para extraer el bloque de registros de datos de cada estación y el cálculo de la frecuencia de datos. Esta función utiliza las siguientes funciones (**Figura 36**).
2. **fct_HeatIndexPerYear()** para el cálculo del índice de la media de ola de calor, de tal manera que el tamaño del rango se igual al tamaño de la ola de calor. Este cálculo se realiza solo para los datos con fechas sucesivas. Esta función también se ha utilizado para seleccionar el máximo de la ola de calor para cada estación meteorológica.
3. **verif_succession()** para comprobar el estado de la sucesión de fechas (**Figura 36**).

Todas estas funciones han sido compiladas para el cálculo del índice máximo anual de la ola de calor en la presente aplicación. Para iniciar esta tarea, haga clic en la opción “Operación Heat>Heat wave index”. Enseguida se mostrara la ventana del asistente. Como se muestra en la **Figura 37**.

En este cuadro de dialogo como en el paso anterior (pre-procesamiento), el usuario puede aplicar el calculo de la máxima de calor media anual del índice de ola de calor para un solo año eligiendo solo “one year”, o bien durante un periodo de años consecutivos al seleccionar la segunda opción “A period”, y se debe especificar la ubicación de los archivos resultantes del paso anterior “Pre-processing”, la operación y la carpeta donde se guardaran los resultados (se recomienda llamar a esta carpeta “HW”, haciendo clic en el botón de la carpeta  (**Figura 37**). Un nuevo parámetro que se ha introducido en este paso es el tamaño del rango de la ola de calor en termino de días consecutivos. En este estudio hemos

aplicado este cálculo mediante la elección de tres días como el tamaño de la ola de calor (**Figura 37**), el usuario puede establecer un valor diferente dependiendo de las características de la zona de estudio.

```

1 function [f_out,f_inter]=fct_MainProgram(f_in,wind_days)
2
3
4 [rows,cols]=size(f_in);
5
6 i=1;
7 k=1;
8 while i<=rows
9
10     STN_Name=f_in(i,1);
11
12     nbr_days = 0;
13
14     while (i<=rows && f_in(i,1)== STN_Name)
15         nbr_days=nbr_days+1;
16         Mat_inter(nbr_days,2)=f_in(i,6);
17         Mat_inter(nbr_days,1)=f_in(i,2); % colonne des dates pour la
18
19     end
20
21
22     [f_inter,max_ch]=fct_HeatIndexPerYear(Mat_inter,wind_days);
23
24     p=nbr_days/365;
25     f_out(k,1)=STN_Name;
26     f_out(k,2)=max_ch;
27     f_out(k,3)=p;

```

Figura 36. Extracto de código de las funciones *fct_MainProgram()* y *verif_sucesion()*

Después de completar todas las opciones del cuadro de dialogo, seleccione el botón **OK** para ejecutar el proceso del cálculo de la ola de calor. Una ventana de barra de espera aparecerá, como se muestra en la **Figura 38**. En esta ventana se informa a los usuarios sobre el tiempo necesario para terminar esta operación para los datos de cada año y se cerrará automáticamente al final del cálculo.

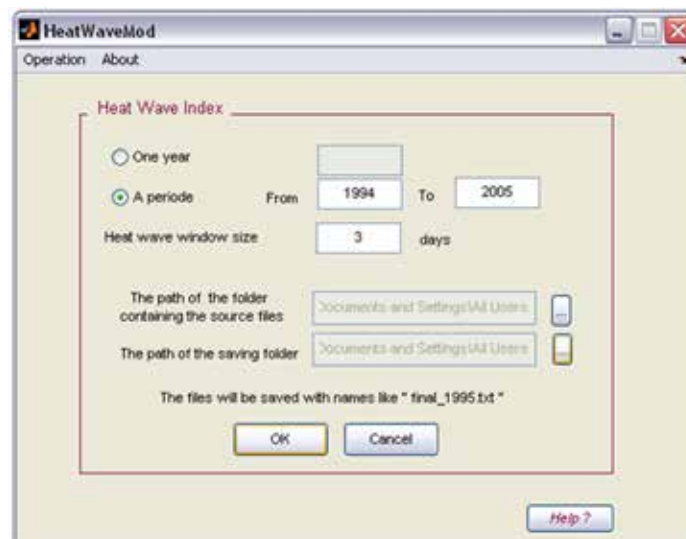


Figura 37. Interface de la ventana utilizada para calcular el índice máximo de ola de calor

Al final de la ejecución de la aplicación “Heat Wave Mod”. Se habrán producido dos nuevos archivos: 1) “calcul_year.txt” (ejemplo-calcul_1997.txt) que contiene los cálculos diarios del índice de calor. 2)

“final_year.txt”(ejemplo-“final_1997.txt) que contiene para cada estación la media del índice máximo anual de ola de calor y la frecuencia de cálculo anual para cada año de observación mediante la siguiente fórmula= $n/365$, donde n es el número total de días de observación por año (**Figura 39**)

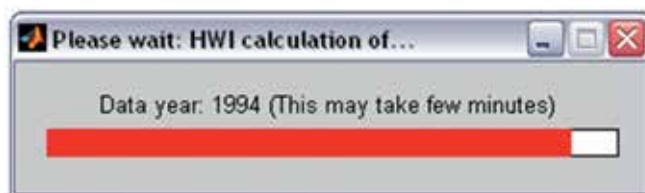



Figura 38. Barra de espera del proceso de ola de calor HeatWaveMod ©

4.3.4 Estimación de la ola de calor máximo anual en diferentes periodos de retorno

4.3.4.1 Creación de archivos para cada estación

Los archivos finales resultantes de la etapa anterior que contienen los valores de la ola de calor máxima anual para todas las estaciones por año (**final_1997.txt**, **final_1998.txt**, **final_2008.txt...**). Se les aplicara el método de frecuencia Gumbel para cada estación para predecir la ola de calor máxima anual para diferentes periodos de retorno, se requiere crear una carpeta para cada estación que contenga los valores de la ola de calor durante todo el periodo estudiado. Esta operación se lleva a cabo a través de **Operation>Saving STN**. Como se muestra la ventana del asistente (**Figura 40**).

En este cuadro de dialogo, el usuario debe de especificar: 1) el periodo de años consecutivos, 2) la ubicación de los archivos resultantes de proceso de ola de calor, que contengan la carpeta “HW”, 3) la ubicación de la carpeta donde se guardaran los resultados (recomendamos nombrar esta carpeta (STN)) para esto, hacer clic en el botón examinar  (**Figura 40**).

Estación	Media máxima de la ola de calor	Frecuencia anual
690150	11.2257512	0.92
722500	10.0431456	1.00
722505	10.6089856	1.00
722506	9.6300824	1.00
722510	10.3003456	1.00
722515	11.0205056	1.00
722516	8.7571456	1.00
722517	7.6249512	1.00
722520	9.0642424	1.00
722524	9.2715456	1.00
722526	7.8265960	1.00
722530	8.2427456	1.00
722535	7.6769056	1.00
722536	8.1897674	1.00
722610	8.9114656	1.00
722615	9.4767912	1.00
722640	10.3445840	0.98
722650	10.3003456	1.00
722656	10.5575456	1.00
722680	9.0657856	1.00
722687	9.5287456	1.00
722688	9.1136248	1.00
722700	9.8373856	1.00
722710	8.2427456	1.00
722725	12.6953920	0.99

Figura 39. Resultados después de la aplicación de la operación de ola de calor (final_2005.txt), (con la Columna 1: Nombre de la estación, Columna 2: Media máxima de la ola de calor, Columna 3: frecuencia anual)

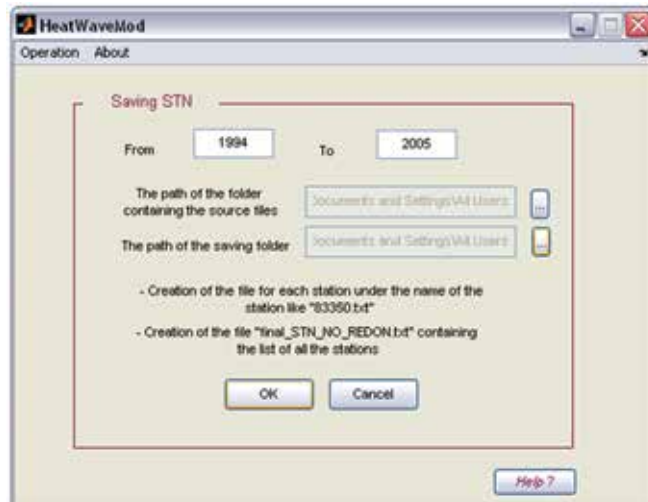


Figura 40. Interface de la ventana para crear los archivos por estación

Dos funciones se han involucrado en esta operación: `save_list_STNs ()` y `save_one_STN()`, la primera permite la extracción de todas las estaciones de todos los archivos anuales resultantes de la etapa del cálculo de la ola de calor, después de la clasificación y eliminación de datos redundantes. El resultado ha sido guardado como “final_STN_NO_REDON.txt”.

La segunda función toma a cada estación del archivo anterior y toma todos los archivos anuales para extraer los datos (ola de calor anual máximo y la frecuencia anual) correspondientes a cada estación. El resultado ha sido guardado con el número de la estación “station_numer.txt” (por ejemplo “83910”) (**Figura 41**).

Archivo	Edición	Insertar
1994	88.532	1
1995	95.666	1
1996	92.343	1.0027
1997	91.09	1
1998	91.628	0.98904
1999	92.724	0.99726
2000	97.81	1.0027
2001	92.116	0.99452
2002	91.769	0.99452
2003	99.46	1
2004	97.511	1.0027
2005	88.782	1

Figura 41. Creación del archivo para cada estación (83910.txt). (Columna 1: Periodo de estudio, Columna 2: máximo anual de ola de calor, Columna 3: Frecuencia anual)

4.3.4.2 Aplicación del método Gumbel

La técnica de análisis de frecuencia Gumbel ha sido programada e incluida en esta aplicación para predecir la ola de calor anual para un periodo de retorno dado. El uso de esta aplicación requiere la introducción de dos filtros que definen un umbral que comprueban los datos de cada estación antes de cualquier cálculo.

El primer umbral es la frecuencia anual (véase la sección 4.3.3.2), el año en que la frecuencia de una determinada estación está por debajo de este umbral, no se tomara en cuenta en el cálculo, ya que existen algunos casos cuyos datos de las estaciones se refieren a unas pocas semanas y que pueden no coincidir

con los días en que las olas de calor son considerables. En este estudio, hemos optado por un umbral del 70%.

El segundo umbral es el número de años en lo que tienen un valor la ola de calor. Una estación meteorológica que tiene el número de años de ola de calor por debajo de este umbral no será tomada en cuenta. Por ejemplo, en este estudio se ha fijado este umbral en 14 años con el fin de utilizar serie de registros completos a largo plazo para un número considerable de estaciones meteorológicas (171 estaciones para la República Mexicana) que se utilizaron en la espacialización (el uso del umbral de 10 años solo se tomaron en cuenta 161 estaciones). El umbral de 8 años dará una buena predicción de la ola de calor para periodos de retorno que no superan los 8 años. En este trabajo hemos evaluado la ola de calor para periodos de retorno de 2, 5, 8 y 10 años. El periodo de 10 años se da solo como muestra. En la actualidad, no hay pruebas que demuestren que la distribución Gumbel es válida más allá de este periodo. En esta aplicación, hemos permitido que el usuario especifique los umbrales, de acuerdo a la calidad de sus datos (**Figura 42**).

Con el fin de comenzar a ejecutar el método de frecuencia Gumbel haga clic en el menú **Operation>Gumbel Method**, en esta opción es posible elegir entre dos capacidades para la aplicación del método Gumbel: “All stations” o “one station”. Esta segunda opción podría ser utilizada para hacer la corrección y el ajuste del método, cuando tenemos observaciones atípicas (presencia de los puntos aislados).

4.3.4.2.1 Aplicación Gumbel para todas las estaciones

Después de seleccionar la opción “All stations”, la ventana del asistente se muestra en la **Figura 42**.

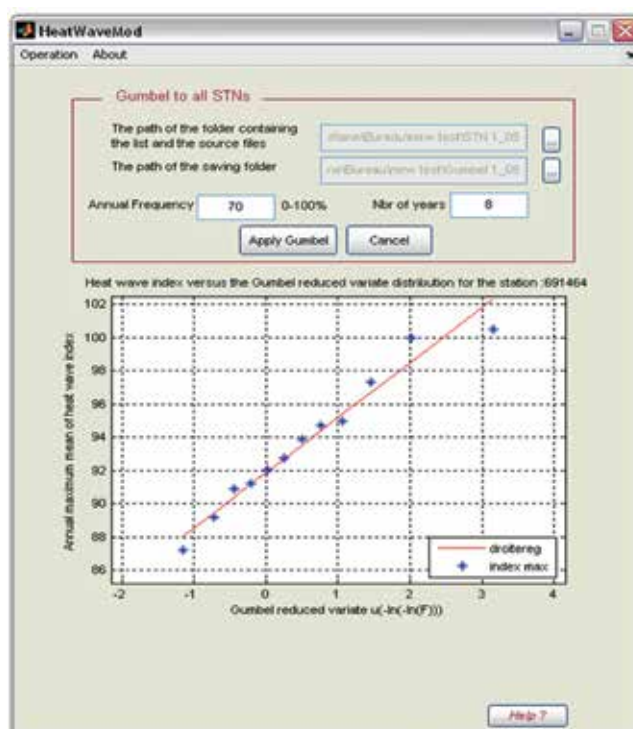



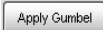
Figura 42. Interfaz de la ventana para la aplicación de Gumbel para todas las estaciones

En este cuadro de diálogo, el usuario debe especificar: 1) la ubicación del archivo resultante de la etapa anterior que contiene la carpeta “STN”, 2) la ubicación de la carpeta para guardar los resultados (se

recomienda llamar a esta carpeta “Gumbel”, haciendo clic en el botón examinar  y 3) los cuadros de los dos umbrales descritos anteriormente (de frecuencia anual y el número de años donde los valores de las olas de calor para cada estación).

La función principal que se utiliza para aplicar este método es `Apply_Gumbel_allSTN()`, esta llama a cuatro funciones cuyas características se describen a continuación:

1. `fixe_ghreshold ()`: Se utiliza para eliminar las líneas cuya frecuencia anual es inferior al umbral establecido;
2. `Gumbel ()`: Devuelve las tablas que contienen los valores de los parámetros que intervienen en el método de frecuencia Gumbel (Variable de reducción Gumbel, frecuencia empírica, media y desviación estándar);
3. `f_rank ()`: Se utiliza para asignar la categoría de la ola de calor anual (el rango puede ser el mismo en el caso de los valores de la misma ola de calor)
4. `index_retour ()`: calcula la ola de calor para el 2,5,8 y 10 años de período de retorno.

Después de completar todas las opciones en el cuadro de diálogo, haga clic en el botón , para visualizar el gráfico correspondiente a la aplicación del método Gumbel para cada estación. El paso de un gráfico de una estación a otra se realiza automáticamente. Al final del procedimiento, la aplicación ha producido para cada estación un nuevo archivo de imagen guardado como “numSTN.jpg” en la carpeta “Gumbel” (por ejemplo numSTN se refiere al número de estación, “85940.jpg”, “600600.jpg”, “601410.jpg”, ...). Este archivo corresponde a una gráfica que representa la ola de calor anual vs. variable aleatoria de reducción de Gumbel (**Figura 43**).

Además de estos archivos de imágenes, se genera un archivo “HeatWaveIndex_allSTN_return_2-5-10_Fq-0.7_NbrY-8.txt” en la misma carpeta, que contiene el índice de la ola de calor con periodos de retorno de dos, cinco, ocho y 10 años y el valor de correlación de todas las estaciones (**Figura 44**) para los dos umbrales (70% y 8 años) “Fq-07_NbrY-8”.

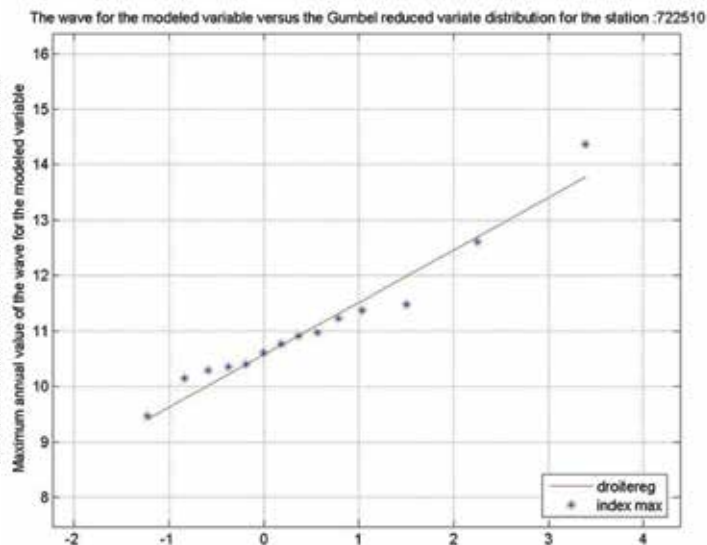


Figura 43. La ola de calor anual en comparación con la variable aleatoria de reducción Gumbel, para la estación climática 722510 con un umbral de frecuencia anual (70%) y 8 como número de años

Archivo	Edición	Ver	Insertar	Formato	Ayuda	
690150	92.744612	96.008934	97.487776	98.170199	0.96817928	
722500	88.542711	91.592855	92.974667	93.612315	0.98333193	
722510	94.136596	97.87732	99.562927	100.34076	0.96664083	
722520	86.09897	89.015384	90.336613	90.946304	0.9779335	
722530	83.286031	85.218108	86.0934	86.497311	0.94738071	
722540	87.634356	91.041433	92.584948	93.297215	0.97806798	
722550	84.000093	85.987576	86.887969	87.303462	0.96475266	
722560	86.970687	89.86117	91.17065	91.77492	0.94337013	
722570	82.485015	85.56147	86.955202	87.598351	0.94263559	
722580	89.625568	93.615821	95.423533	96.257715	0.96555469	
722590	90.957411	94.118919	95.551184	96.212113	0.9447097	
722600	91.221331	94.637105	96.18456	96.898645	0.98384712	
722610	90.042541	93.629417	95.254386	96.00424	0.96163627	
722620	91.928145	96.168702	98.089809	98.976319	0.96289355	
722630	88.768292	92.319483	93.928286	94.67068	0.94771355	
722640	89.059526	92.393213	93.903479	94.600403	0.99225551	
722650	78.948545	80.719722	81.322122	81.892395	0.99217285	
722660	79.338118	80.252531	80.666789	80.857952	0.9476919	
722670	85.799258	88.092297	89.131117	89.610488	0.96101629	
722680	83.790382	85.49671	86.26973	86.626447	0.96762255	
722690	90.086521	93.031778	94.366073	94.981794	0.96222529	
722700	90.034041	91.984147	92.867607	93.275286	0.98022768	
722710	98.947365	102.30966	103.83289	104.5358	0.9411985	
722720	92.755482	96.83219	98.67907	99.531326	0.99281639	
722730	94.183166	96.96221	98.221205	98.802178	0.95557884	
722740	96.852773	100.15633	101.65294	102.34357	0.92726702	
722750	87.44166	89.23266	90.04404	90.418457	0.95390504	
722760	89.460289	92.179293	93.411089	93.979511	0.98331893	
722770	87.280335	88.967351	89.731624	90.084303	0.98883286	
722780	94.604012	97.137743	98.285604	98.815293	0.98256899	
722790	95.85791	98.438325	99.607335	100.14678	0.9908651	
722800	84.778757	92.007981	93.017891	93.483922	0.98229179	

Figura 44. Ejemplo del archivo resultante de la aplicación del método Gumbel para todas las estaciones

Nota: Para obtener una comprobación eventual (siguiente paso), comprobar si la ola de calor (puntos) muestran una buena conformidad a una línea recta (todos los datos de puntos azules están cerca de la línea recta de color rojo) o si una correlación de los valores no está cerca de 1. Si este es el caso, escribir el encabezado del número de la estación para un chequeo o una eventual corrección (siguiente paso).

4.3.4.2.2 Aplicación del método Gumbel a solo una estación

Este paso permite aplicar el método de Gumbel a una estación, con el fin de comprobar, o corregir si es posible la gráfica que muestra un ajuste no adecuado para la distribución Gumbel y la presencia de valores extremos que pueden ser mantenidos o eliminados del conjunto de datos. Por esta razón, es necesario marcar antes los números de las estaciones que se revisaron en la etapa anterior mediante la comprobación de imágenes o mediante la búsqueda de un valor de correlación pequeña en el archivo de resumen almacenado en la carpeta “Gumbel”.

Por ejemplo en el caso de la estación meteorológica 404.050 (Figura 45), en la gráfica se puede identificar un punto aislado alrededor de los 106.1144° F para el índice de ola de calor. Si tenemos la información de que este valor está escrito de forma errónea por los instrumentos de medición utilizados en el año correspondiente (2000) se cambia o se mueve, se propone no tomar en cuenta este punto durante la aplicación del método Gumbel. Para corregirlo, abra el archivo de la estación correspondiente almacenado en la carpeta “STN” (Figura 46), Elimine el registro correspondiente al valor del Índice de ola de calor 106.1144°F para el año 2000 y guarde el archivo en la misma ruta (no se mueve), siempre es preferible tener una copia antes de cualquier modificación.

Después de modificar el archivo, vaya al menú Operation>Gumbel Method>One station (Figura 47). En esta ventana, el usuario debe especificar: 1) la ubicación del archivo de estaciones que contengan la lista de nombres de todas las estaciones, esto se carga automáticamente en la siguiente lista con el fin de simplificar la búsqueda de la estación para ser modificado, 2) la estación en cuestión que debe corregirse, y 3) los umbrales de los valores (frecuencia anual y número de años)(el usuario puede mantener los valores antiguos o cambiarlos).

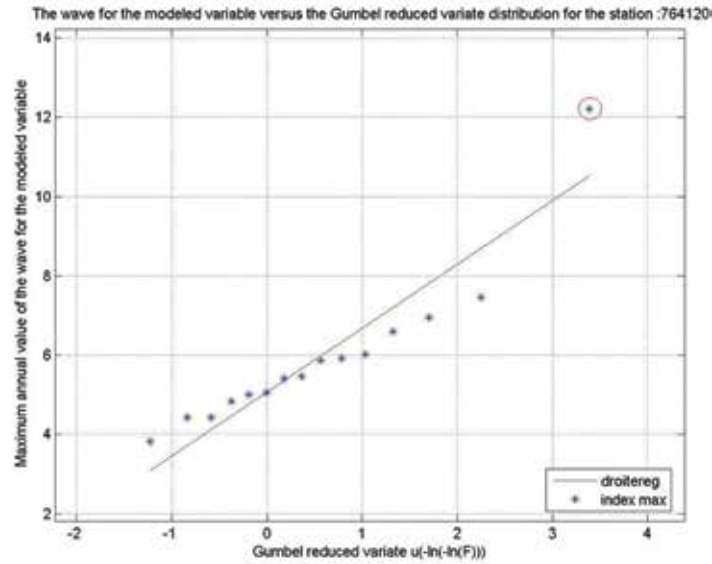


Figura 45. Ventana que nos muestra un ajuste no adecuado para la distribución Gumbel

Una vez completado el cuadro anterior, haga clic en el botón . Se muestra el nuevo grafico, si el resultado es satisfactorio, guarde el grafico y el archivo de texto que lo acompaña mediante la selección de la carpeta con el botón , a continuación, guarde los archivos dando un clic en el botón .

Year	Value	Index
1997	95.0627	1
1998	98.439	1
1999	94.6382	0.99452
2000	106.1144	1
2001	97.4928	0.99726
2002	95.6107	1
2003	97.3998	0.99726
2004	93.9909	1.0027
2005	99.179	1
2006	97.5423	1
2007	100.3932	0.99726
2008	98.4903	1

Figura 46. Borrando el registro correspondiente al año 2000 considerado dudoso

4.3.5 Selección de los parámetros e identificación del modelo de regresión

Como se describió en la sección 4.2.4, el análisis de regresión por pasos se utilizó para identificar las variables que explican la variación del índice de calor máximo diario anual en cada periodo de retorno en la República Mexicana y así derivar el modelo de regresión a utilizar para la espacialización.

Este proceso se implementó en tres etapas, que se explican en las siguientes secciones:

- La preparación de las capas que contienen la distribución espacial de los factores causales;
- La preparación del análisis de regresión por pasos;
- La aplicación del análisis de regresión por pasos;

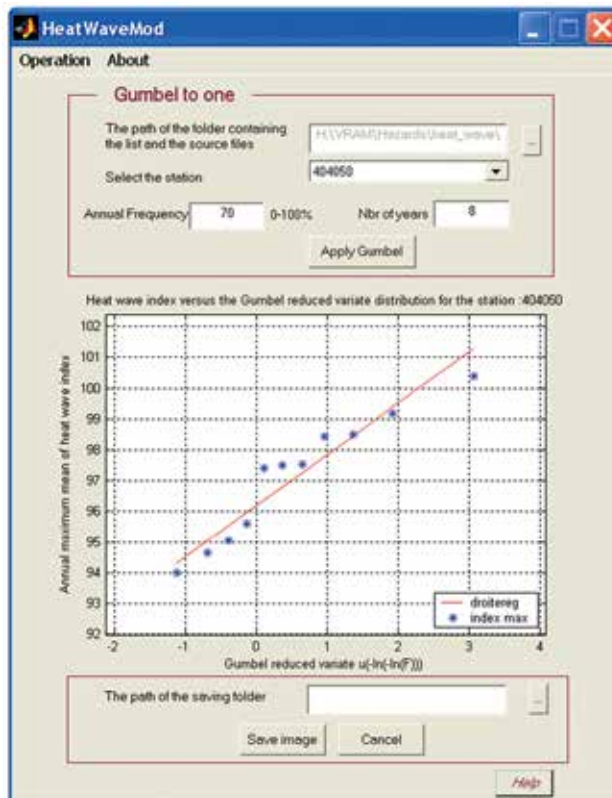


Figura 47. Interface resultante de la aplicación Gumbel, después de la corrección

4.3.5.1 Preparación de los GRIDs de distribución de los factores causales

Si la distribución espacial de varios factores causales ya formaba parte de las series de datos desarrolladas para el primer volumen del Atlas, fue necesario derivar la elevación media a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE). Todas las capas de distribución de los factores causales tuvieron que ser re proyectadas nuevamente al sistema de proyección cilíndrica. Los procesos aplicados para realizar este trabajo se presentan en las secciones siguientes.

4.3.5.1.1 Creación de la capa de distribución de la elevación media

La cuadrícula de distribución de la elevación media se derivó del MDE aplicando los siguientes pasos.

1. Verificar que la extensión Grid Analyst se encuentre cargada en ArcView.
2. Agregar a la vista la cuadrícula **dem_mx_new_e** * y actívela.
3. Utilizar la función Analysis>Neighborhood Statistics, especificando lo siguiente en la ventana que aparece:
 - a) Bajo “statistic”, elija “Mean”;
 - b) Bajo “neighborhood”, elija “Rectangle” como el tipo de alrededores para el análisis;
 - c) Seleccionar el indicador de “cell”; y disponga “Width” y “Height” en tres celdas;
 - d) Guardar el GRID resultante como **mx_Z9**.

4.3.5.1.2 Derivación de los GRIDs booleanos para el mapa de dirección

Para el uso de la capa de distribución de la variable de aspecto predictor para la regresión, hemos obtenido ocho GRIDs booleanos aspX (donde X es N, NE, E, SE, S, SW, W Y NW), para las siguientes clasificaciones:

- 0-22.5 and 337.5-360: **N**
- 22.5-67.5: **NE**
- 67.5-112.5: **E**
- 112.5-157.5: **SE**
- 157.5-202.5: **S**
- 202.5-247.5: **SW**
- 247.5-292.5: **W**
- 292.5-337.5: **NW**

Quedando, por ejemplo, aspN teniendo un valor de 1 si el pixel se inclina hacia el norte y 0 si el pixel se encuentra en cualquier otra dirección. El procedimiento utilizado para crear estos GRIDs booleanos se presenta en los siguientes pasos:

1. Hacer activa la capa de Aspecto en la vista de ArcView.
2. Seleccione la función Analysis>Map calculator e ingrese en la ventana la siguiente fórmula ([Aspecto]>=67.5) and ([Aspecto]<112.5).
3. Guardar el GRID resultante como aspe. Esto corresponde a la distribución espacial del aspecto de celdas con dirección al Este.
4. Repita estos pasos para las otras direcciones que se presentan en la clasificación de la parte superior para generar aspN, aspNE, aspSE, aspS, aspSW, aspW, aspNW.


4.3.5.1.3 Creación de la capa de distribución del máximo anual de olas de calor para diferentes periodos de retorno

La espacialización del máximo anual de olas de calor para cada estación meteorológica se genero de acuerdo al siguiente procedimiento:


1. En MS Excel, abra el archivo “HeatWaveIndex_allSTN_return_2-5-10_Fq-0.7_NbrY-8.txt”, archivo creado en la sección 4,3.4.2.1., este archivo contiene la ola de calor con periodos de retorno de 2, 5, 8 y 10 años para todas las estaciones de la Republica Mexicana.
2. En el primer registro, añadir en los encabezados de las columnas A, B, C y D, los nombres STN: número de estación, HW_2: periodo de retorno de 2 años para la ola de calor máxima anual, HW_5: periodo de retorno de 5 años para la ola de calor máxima anual, HW_8: periodo de retorno de 8 años para la ola de calor máxima anual, HW_10: periodo de retorno de 10 años para la ola de calor máxima anual, respectivamente. Guarde el archivo resultante como **MX_HW_2_5_8_10.XLS**.
3. Unir el archivo **MX_HW_2_5_8_10.XLS** con el archivo **estaciones2_mod_e.shp** con los siguientes pasos:
 - a) Abrir ambos archivos en Arcmap 9.x.
 - b) Dar clic derecho sobre el archivo estacione2_mod_e.shp e ir a la opción Join and relates >join.
 - c) Seleccione en la opción What do you want to join this layer? “Join attributes from a table”.
 - d) En la opción 1 seleccione el campo STN y la opción 2 seleccione la tabla del archivo **MX_HW_2_5_8_10**.
 - e) En la opción 3 seleccione STN.
 - f) De esa manera queda unida la tabla del archivo **MX_HW_2_5_8_10** al shapefile **estaciones2_mod_e.shp**.
4. Guarde el archivo resultante dando un clic sobre **estaciones2_mod_e.shp** y dele un clic en Data>export data e indique la ruta del archivo resultante guárdelo como **MX_HW.shp**.

4.3.5.1.4 Reproyección de las diferentes capas

Esta operación se utilizó para cambiar las unidades de las diferentes capas del mapa utilizadas en el análisis, de grados decimales a kilómetros, con el fin de poder medir las distancias. Dicha operación se efectuó, de manera separada, sobre las capas vectoriales y de rasters. Para la capa vectorial de las fronteras internacionales (**border_mx_e.shp***):

1. Verificar que la extensión GRID and theme projector v.2 esté cargada en ArcView.
2. Hacer clic sobre el botón  o bien utilice la función GRID Projector>Grid and Theme Projector.
3. Seleccionar **border_mx_e.shp*** de la lista, como el tema a proyectar.
4. En la ventana Theme Projector:
 - a) Especificar los parámetros de la proyección actual
Category = projection of the World
Type = Geographic
Current Projection Units = decimal degrees
 - b) Especificar los parámetros de la nueva proyección
Category = projection of the World
Type = Equal-Area Cylindrical
New Projection Units = kilometres
5. Guardar el tema resultante como **border_mx_e_km.shp**.

El proceso siguiente se empleó para reproyectar las capas de rasters (altitud: **dem_mx_new_e** ; altitud media: **mx_Z9**; pendiente **slope_p_mx_g**; aspecto: **asp_mx_new**).

1. Hacer clic sobre el botón  o bien utilice la función GRID Projector>Grid and Theme Projector.
2. Seleccionar la cuadrícula a proyectar.
3. En la ventana Grid Projector:
 - a) Especificar los parámetros de la proyección actual
Category = projection of the World
Type = Geographic
Current Projection Units = decimal degrees
 - b) Especificar los parámetros de la nueva proyección
Category = projection of the World
Type = Equal-Area Cylindrical
New Projection Units = kilometres
 - c) En la ventana siguiente, especificar la nueva dimensión de celda nueva como “1”;
 - d) Elegir “Bilinear interpolation” como “Interpolation method” y especifique “4” como “Transformation Order”;
 - e) Guardar la cuadrícula resultante como **mx_raster_km**, nombre en el cual **raster** debe corresponder al nombre de la capa de rasters en cuestión (MDE, elevación media, pendiente y aspecto).

4.3.5.1.5 Creación de la franja de amortiguamiento de 300 km alrededor de cada zona climática

Con el fin de garantizar una buena interpolación en el borde de cada zona climática, se agregó una franja de amortiguamiento de 300 km a la extensión de cada zona, por medio del proceso siguiente:

1. Extraer las cuatro zonas climáticas de la capa de fronteras internacionales, aplicando los siguientes pasos en ArcView:
 - a) Verificar que XTools Extensión se encuentre cargada en ArcView;
 - b) Agregar la versión reproyectada de la capa de las fronteras internacionales **border_mx_e_km.shp**;

- c) Convertir al shapefile **border_mx_e_km.shp** en el tema activo;
2. Crear la franja de amortiguamiento de 300 km, de la siguiente manera:
 - a) Desde View>Properties, cambiar “map units” y “Distance Units” a kilómetros;
 - b) Seleccionar Theme>Create Buffer; y aparece el asistente de Create Buffers;
 - c) En el primer cuadro de diálogo del asistente, seleccionar **border_mx_e_km.shp** como los elementos a amortiguar;
 - d) En el segundo cuadro de diálogo del asistente, seleccionar “At a Specified Distance” como el método utilizado para crear la franja de amortiguamiento e ingresar un “300” como la anchura de la franja de amortiguamiento. Verificar que las unidades de distancia estén dispuestas en kilómetros;
 - e) En el tercer cuadro de diálogo del asistente, crear la franja de amortiguamiento utilizando la opción “only inside of the polygon parameter”. Especificar que la franja de amortiguamiento se guarde como un tema nuevo y nómbrelo como **border_mx_e_buffer_300.shp**.

4.3.5.1.6 Dimensionando las diferentes capas sobre las capas de la zona de amortiguada climática

Los siguientes pasos se aplicaron para cortar la distribución de las estaciones meteorológicas en la zona climática amortiguada.

1. Verificar que XTools Extensión se encuentre cargada en ArcView.
2. Desplegar en la vista tanto las fronteras internacionales amortiguadas de la primera zona climática (**border_mx_e_buffer_300.shp**) como la capa que contiene la distribución de las estaciones meteorológicas con el shapefile asociado del índice de calor máximo diario anual (**mx_HW.shp**).
3. Utilizar la función XTools>Polygon(s).
4. Seleccionar el archivo **mx_HW.shp** como el tema que contiene las características que desea cortar.
5. Seleccionar **border_mx_e_buffer_300.shp** como el tema que contiene los polígonos que se utilizarán como referencia para el recorte.
6. Especificar el nombre del nuevo shapefile que se va a crear, como **mx_HW_shp**.



En referencia a las capas de rasters, se aplicaron los siguientes pasos para el recorte:

1. Constante que la extensión GRID Analyst se encuentre cargada en ArcView.
2. En la vista activa, agregar los shapefiles **mx_dem_km**, **mx_Z9_km**, **mx_slope_km**, **mx_aspect_km** y **zone_n_int_bord_buffer_300.shp**.
3. Activar la primera cuadrícula (**mx_dem_km**) y utilizar la función GRID Analyst>Extract GRID Theme Using Polygon.
4. Seleccionar primero el archivo **border_mx_e_buffer_300.shp**, de la lista que se despliega, para usarlo en el recorte.
5. Convertir el GRID resultante en el tema activo y seleccionar la función Theme>Convert to Grid para guardar el GRID resultante como **mx_dem_c**.
6. Repetir los pasos indicados en los incisos 3 al 6 para las demás capas de rasters.

4.3.5.1.7 Cómo se trazan los mapas de las distancias desde la costa y cómo se determina la latitud y longitud relativas de cada zona climática

La distancia de la costa en cada una de las zonas climáticas, se calculó de la manera siguiente:

1. Verificar que la extensión XTools se encuentre cargada en ArcView.
2. Desplegar el archivo **border_mx_e_km.shp** en la vista.
3. Utilizar la función XTools>Convert polygon to polyline y elegir **border_mx_e_km.shp** como el tema que se va a convertir a polilíneas.
4. Guardar la capa resultante como **border_mx_e_line.shp**.

5. Comenzar a editar el shapefile **mx_bord_line.shp** e identificar el lugar donde la frontera internacional cambia, de litoral, a frontera del interior.
6. Desplazarse por “ArcView’s drawing tools” (representadas por el icono ) y seleccionar la herramienta “draw line to split feature polygon” ().
7. Utilizando esta herramienta, dibujar una línea en donde se desea dividir la frontera internacional entre litoral y frontera del interior. Después, hacer clic sobre el segmento de la línea que considere no ser litoral, así como la línea de la división y bórrelas.
8. Repetir esta operación hasta que sólo tenga segmentos del litoral en el shapefile.
9. Guardar el resultado como **coast.shp**.
10. Navegar a Analysis>Find Distance, para crear una cuadrícula de distancias desde las costas, en kilómetros.
 - a) En el siguiente menú, seleccionar Output Grid Specification;
 - b) Disponer Output Grid Extent como Same As **coast.shp**;
 - c) Disponer Output Grid Cell Size como **As Specified below**;
 - d) Disponer Cell Size = 1 km;
 - e) Utilizar el número que da el sistema para las filas y las columnas;
 - f) Guardar el resultado como **dist_coast**.
11. Para la distancia de la costa sur y norte:
 - a) Abrir el archivo coast.shp;
 - b) Activar el archivo coast.shp ir al menú theme y hacer clic en convert to shapefile para guardar el archivo como dist_coast_s;
 - c) Ir al menú Theme, hacer clic en Start Editing y seleccionar la línea del Golfo de México, una vez seleccionada borrarla con suprimir;
 - d) Ir al menú Theme, hacer clic en la opción Stop Editing y hacer clic en guardar los cambios;
 - e) Repetir el mismo procedimiento para la costa norte, en este caso borrar la línea del Pacífico y guardar el archivo como dist_coast_n;
 - f) Usar el proceso descrito en el paso 10 para generar la distancia a la costa sur y norte, almacenar los archivos como dist_north_e y dist_soth_e.

Las dos últimas capas que se necesitaron crear correspondieron a la latitud y la longitud relativas de cada zona climática. El proceso que se describe a continuación fue aplicado para el caso de la latitud relativa:

1. Crear un shapefile de línea que corresponda a la latitud mínima observada en la primera zona climática indicada en el shapefile **border_mx_e_km.shp**, de la manera siguiente:
 - a) Agregar el archivo **border_mx_e_km.shp** a la vista;
 - b) Crea un nuevo tema de línea empleando View>New Theme;
 - c) En forma manual, digitalizar una línea recta horizontal que pase por el punto ubicado más al sur de la República Mexicana;
 - d) Guardar el trabajo de edición como **mx_Y.shp**.
2. Usar el paso 10 del proceso descrito anteriormente para generar la distancia desde la costa, con el fin de crear un GRID que contenga la distancia desde la línea almacenada en el shapefile **mx_Y.shp**, y guardar la capa resultante como **Dist_Y_mex_e.shp**.

El proceso utilizado para crear una capa que contenga la longitud relativa (las distancias desde la frontera occidental) de cada zona climática es idéntico al proceso descrito para la latitud relativa, trazando, en esta ocasión, una línea vertical en la frontera occidental de la República Mexicana. El resultado se guardó como **dist_X_mex_e** (la *n* corresponde al número asociado con cada zona climática).

4.3.5.2 Preparación del análisis de regresión por pasos

Antes de realizar el análisis de regresión por pasos, fue necesario preparar una tabla que incluyera el índice de calor máximo diario anual por estación meteorológica y periodo de retorno, así como las variables extraídas de cada GRID preparada en la sección 4.3.4.1. El procedimiento que se empleó para integrar este cuadro se describe a continuación.

1. Verificar que la extensión GRID Analyst se encuentre cargada en ArcView.
2. En una vista, agregar los GRID de distribución de los siete factores causales (**mx_dem**, **mx_Z9**, **mx_slope**, **mx_aspect**, **mx_dist_coast**, **mx_dist_X**, **mx_dist_Y**) y el shapefile que contiene la distribución de la estación meteorológica a la cual se asociaron los índices de calor máximo diario anual por los tres periodos de retorno en la primera zona. (**mx_HW.shp**).
3. Convertir al shapefile **mx_HW.shp** en el tema activo y utilizar la función GRID Analyst>Extract X, Y and Z values para el tema de los puntos de la cuadrícula, después seleccionar en la lista la primer GRID que aparece indicada en el paso 2. Esta función agregará y luego rellenará tres campos nuevos en la tabla de atributos de **mx_HW.shp** (Xval, Yval y Zval); el último almacenará el valor que se extrajo de la capa del GRID.
4. Abrir la tabla de atributos del shapefile **mx_HW.shp** y hacer clic sobre el encabezado de la columna "Zval".
5. Dar un nombre nuevo a este campo, que corresponda al tema de la capa de los rasters (es decir: **Z**, en el caso de la elevación; **Z9**, de la elevación media; **SLP**, de la pendiente; **ASP**, del aspecto; **d_Coast**, de la distancia de la costa; **d_X**, de la distancia de la longitud relativa; **d_Y**, de la distancia de la latitud relativa) empleando la función C-Tables Tools>rename/resize/Copy Field(s).
6. Repetir los pasos indicados en los incisos 3 al 5 sobre los GRIDs de distribución del resto de factores causales, hasta que el Zval de cada uno de ellos quede integrado a la tabla de atributos del shapefile **mx_HW.shp**.
7. Guardar el GRID resultante como **mx_HW_regresion.dbf**.
8. Repetir los pasos descritos en los incisos 2 al 7 sobre las demás zonas climáticas, cambiando los nombres de los archivos resultantes de manera correspondiente.

4.3.5.3 Aplicación del análisis de regresión por pasos

Una vez que la tabla de regresión por pasos se encuentra listo, es posible efectuar el análisis de regresión por pasos en cada zona y periodo de retorno. Este procedimiento se realizó utilizando el software S-Plus 6.0, como se describe a continuación.

1. Abrir el software S-Plus.
2. Elegir la función File>Import Data>From File para importar la tabla de regresión por pasos que se creó con anterioridad para la zona climática (**mx_HW_regression.dbf**).
3. Elegir la función Statistics>Regresión>Stepwise.
4. En el cuadro de diálogo "Stepwise linear Regresión" que aparece:
 - a) Bajo **Data set**, desplazar hacia abajo en la lista y hacer clic sobre **mx_HW_regression**;
 - b) Hacer clic sobre la casilla Create formula y escribir la fórmula siguiente:

$$Mx_hw_2 \sim z9 + z9^2 + z9^3 + slp + slp^2 + slp^3 + d.y. + d.y^2 + d.y^3 + dx + dx^2 + dx^3 + d.coast.s.km + d.coast.s.km^2 + d.coast.s.km^3 + d.coast.n.km + d.coast.n.km^2 + d.coast.n.km^3 + d.coast.km + d.coast.km^2 + d.coast.km^3 + z + z^2 + z^3 + asp.w + asp.sw + asp.se + asp.s + asp.nw + asp + asp.n^2 + asp^3 - 1$$
 En la cual:
 mw_HW_2 = índice de ola de calor máximo anual para un periodo de retorno de dos años;
 Z = altitud;
 Z9 = altitud media;
 SLP = pendiente;
 ASP = aspecto;
 Asp.N = aspecto norte;

Asp.NE = aspecto noreste;
 Asp.E = aspecto este;
 Asp.SE = aspecto sureste;
 Asp.S = aspecto sur;
 Asp.SW = aspecto suroeste;
 Asp.W = aspecto oeste;
 Asp.NW = aspecto noroeste;
 d.Coast.km = distancia de la costa;
 d.Coast.N.km = distancia de la costa Norte;
 d.Coast.S.km = distancia de la costa Sur;
 d.X = distancia de la longitud;
 d.Y = distancia de la latitud.

c) Hacer clic en OK.

Se crea un informe que muestra el resultado de este procedimiento de selección, con el coeficiente de las variables seleccionadas y su nivel de significancia, error estándar residual, R-cuadrada múltiple y valor de probabilidad (estadística *F*). La **Tabla 24** cuadro 6 presenta el informe obtenido para el periodo de retorno de dos años.

La ecuación de regresión que explica el índice de calor máximo para este periodo de retorno (dos años) y en particular se puede leer como se indica enseguida:

$$\begin{aligned}
 & - ([z9] * 0.016767677763) - ([d.y] * 0.025884346582) + ([d.y] * [d.y] * 0.000024846550) - ([d.y] * \\
 & [d.y] * [d.y] * 0.000000007535) + ([d.x] * 0.164584842231) - ([d.x] * [d.x] * 0.000072865869) \\
 & + ([d.x] * [d.x] * [d.x] * 0.000000009947) - ([d.Coast.S.km] * [d.Coast.S.km] * \\
 & 0.000005732820) - ([d.Coast.N.km] * 0.032071037397) + ([d.Coast.N.km] * [d.Coast.N.km] * \\
 & 0.000027205651) + ([d.Coast.km] * 0.055792339497) - ([d.Coast.km] * [d.Coast.km] * \\
 & 0.000130522380) + ([d.Coast.km] * [d.Coast.km] * [d.Coast.km] * 0.000000097125) + ([Z] * \\
 & [Z] * [Z] * 0.00000000699) + ([asp_nw] * 3.544933357931) - ([asp] * 0.010380995741).
 \end{aligned}$$

5. Repetir los pasos indicados en los incisos 3 al 4 para los demás periodos de retorno.

Todas las tablas de regresión resultantes se presentan en el **Anexo 28**.

4.3.6 Espacialización del índice máximo anual de olas de calor

El mapa de distribución del índice de calor máximo diario anual para cada periodo de retorno se crea aplicando las regresiones descritas en la sección 4.3.5 sobre los GRIDs correspondientes, como se explica a continuación:

1. Verificar que todas las capas de distribución de los siete factores causales de la primera zona climática se encuentren cargados en la vista.
2. Seleccionar la función Analysis>Map Calculator e ingresar la fórmula siguiente en la ventana de la calculadora: $- ([z9] * 0.016767677763) - ([d.y] * 0.025884346582) + ([d.y] * [d.y] * 0.000024846550) - ([d.y] * [d.y] * [d.y] * 0.000000007535) + ([d.x] * 0.164584842231) - ([d.x] * [d.x] * 0.000072865869) + ([d.x] * [d.x] * [d.x] * 0.000000009947) - ([d.Coast.S.km] * [d.Coast.S.km] * 0.000005732820) - ([d.Coast.N.km] * 0.032071037397) + ([d.Coast.N.km] * [d.Coast.N.km] * 0.000027205651) + ([d.Coast.km] * 0.055792339497) - ([d.Coast.km] * [d.Coast.km] * 0.000130522380) + ([d.Coast.km] * [d.Coast.km] * [d.Coast.km] * 0.000000097125) + ([Z] * [Z] * [Z] * 0.00000000699) + ([asp_nw] * 3.544933357931) - ([asp] * 0.010380995741)$

Tabla 24. Resultados del análisis de regresión del índice de calor máximo diario anual, para un periodo de retorno de dos años

Variable	Coefficiente de regresión	Error estándar	Valor de t	Probabilidad Pr(> t)
z9	-0.016767677763	0.001825172077	-9.186902415683	0.000000000000
d.y	-0.025884346582	0.013594516043	-1.904028543512	0.058887431930
I(d.y ²)	0.000024846550	0.000011471755	2.165889203920	0.031954424053
I(d.y ³)	-0.000000007535	0.000000003401	-2.215693361455	0.028271319144
d.x.	0.164584842231	0.018466815487	8.912464758452	0.000000000000
I(d.x ²)	-0.000072865869	0.000010727199	-6.792627375608	0.000000000264
I(d.x ³)	0.000000009947	0.000000001656	6.004966034454	0.000000014684
I(d.Coast.S.km ²)	-0.000005732820	0.000003600736	-1.592124293687	0.113534492450
d.Coast.N.km	-0.032071037397	0.009805427941	-3.270743264887	0.001340280772
I(d.Coast.N.km ²)	0.000027205651	0.000005189796	5.242142549729	0.000000550268
d.Coast.km	0.055792339497	0.014480159627	3.853019644437	0.000174666131
I(d.Coast.km ²)	-0.000130522380	0.000044413588	-2.938793842892	0.003834979597
I(d.Coast.km ³)	0.000000097125	0.000000041303	2.351532396887	0.020041818896
I(z ³)	0.000000000699	0.000000000413	1.692887814762	0.092624284308
asp.nw	3.544933357931	1.336837270314	2.651731393679	0.008899141178
asp	-0.010380995741	0.004048696457	-2.564034091321	0.011363680221

Residual standard error: 4.30294608845 on 145 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.99803467167

F-statistic: 4602.12630862 on 16 and 145 degrees of freedom, the p-value is 0


3. Guardar el GRID resultante como **mx_hi_2**. Ésta corresponde a la distribución espacial del índice de calor máximo diario anual en la primera zona climática para un periodo de retorno de dos años.
4. Repetir los pasos 2 y 3 para los otros periodos de retorno, utilizando las regresiones correspondientes que se presentan en el **Anexo 28**. Los metadatos asociados con estas cuadrículas se presentan en el **Anexo 29**.

4.3.7 Creación de los mapas de distribución del nivel de intensidad del peligro de calor

El último paso de este método consistió en reclasificar los mapas de distribución del índice de calor máximo diario anual para que correspondieran con los cinco niveles de intensidad seleccionados para este proyecto, empleando el proceso siguiente.

1. Cargar a la vista las tres cuadrículas de distribución del índice de calor máximo diario anual.
2. Convertir el GRID **mx_hW_2** en el tema activo.
3. Emplear la función Analysis>Reclassify para volver a clasificar el tema activo de acuerdo con las categorías siguiente:

Rangos del índice de calor (°F)	Nivel de intensidad
<80	1
80-90	2
90-105	3
105-129	4
>130	5

4. Guardar el GRID resultante como **mx_hW_2.cl**.
5. Seleccionar Theme>Edit Legend, en la ventana Legend Editor y cambiar la leyenda a:
 - 1: muy bajo
 - 2: bajo
 - 3: medio
 - 4: alto
 - 5: muy alto
6. Proyectar la cuadrícula **mx_hW_2.cl** de la cilíndrica a la geográfica, empleando el proceso siguiente:
 - a) Hacer clic en el botón () o bien seleccionar la función Grid Projector>Grid and Theme Projector.
 - b) Seleccionar la cuadrícula **mx_hW_2.cl** que se va a proyectar
 - c) En la ventana Grid Projector, especificar los parámetros de la proyección actual:
 - Category = projection of the world
 - Type = Equal-Area Cylindrical
 - Current Projection Units = kilometres
 - d) Especificar los parámetros de la nueva proyección
 - Category = projection of the World
 - Type = Geographic
 - New Projection Units = decimal degrees
 - e) En la ventana siguiente especificar la nueva dimensión de los pixeles como “0.008333”
 - f) Elegir “Bilinear Interpolation” como “Interpolation method” y especificar el valor de “4” como “Transformation Order”
 - g) Guardar el GRID resultante como **mx_hW2**
7. Repetir los pasos 1 al 5 para los otros periodos de retorno y guarde los resultados como **mx_hW5**, **mx_hi10**.

El resultado obtenido a través de la implementación del proceso presentado en este documento se muestra en la **Figura 48** y los metadatos asociados se pueden ver en el **Anexo 30**.

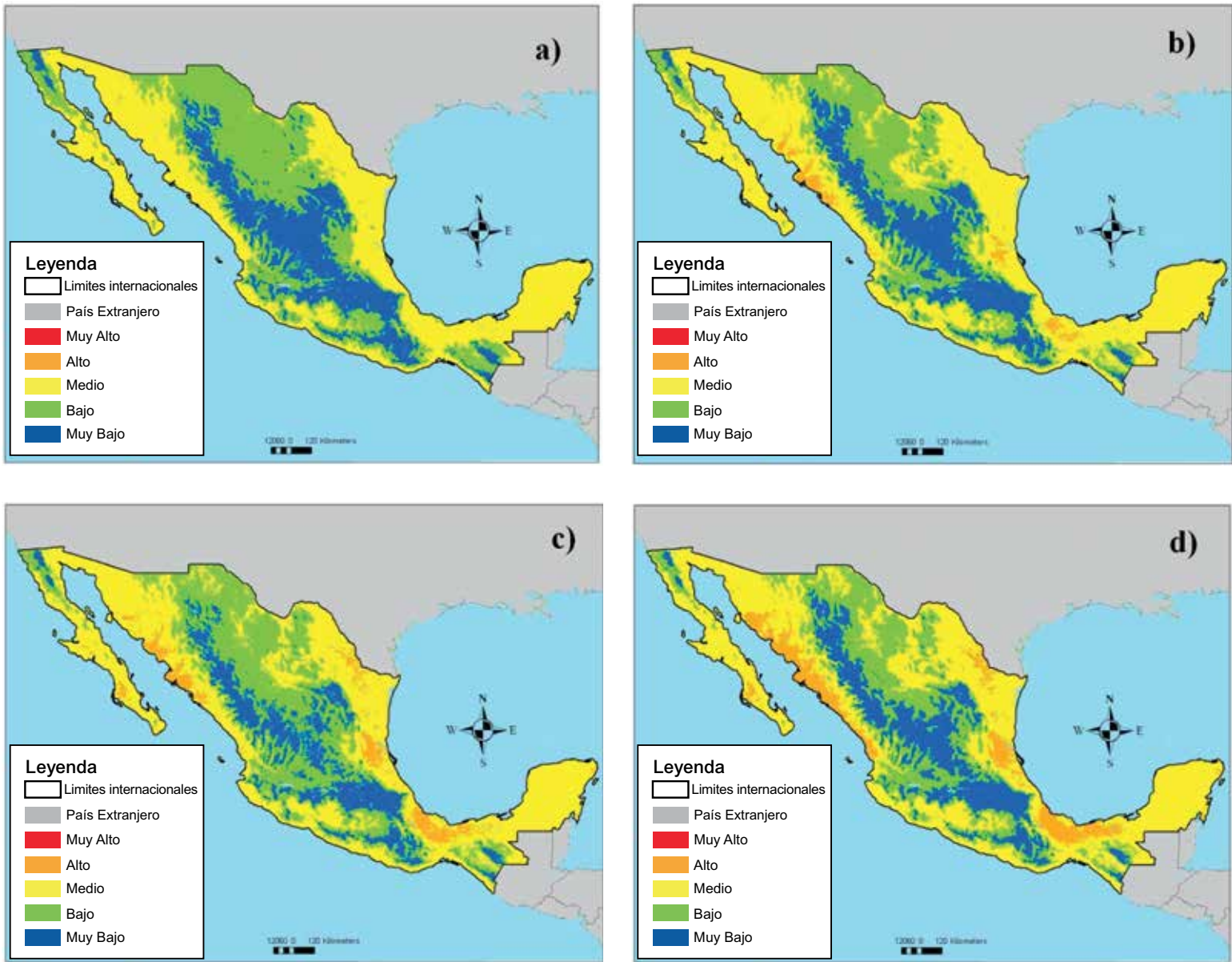


Figura 48. Distribución espacial de los niveles de intensidad de máximo anual de olas de calor para la República Mexicana correspondientes a los periodos de retorno de a) 2 años b) 5 años c) 8 años y d) 10 años

4.4 Bibliografía y lecturas recomendadas

1. Agnew MD and Palutikof JP, 2000. GIS-based construction of baseline climatologies for the Mediterranean using terrain variables. *Climate research*, 14:115–127.
2. André J.C, Déqué M, Rogel P and Planton S, 2004. La vague de chaleur de l'été 2003 et sa prévision saisonnière. *C. R. Geoscience*, 336: 491–503.
3. Ashraf M, Loftis JC and Hubbard KG, 1997. Application of geostatistics to evaluate partial weather station networks. *Agricultural and forest meteorology*, 84(3–4):255–271.
4. Baccini M, Biggeri A, Accetta G, Kosatsky T, Katsouyanni K, Analitis A, Anderson HR, Bisanti L, D'Ippoliti D, Danova J, Forsberg B, Medina S, Paldy A, Rabczenko D, Schindler C, Michelozzi P, 2008. Heat effects on mortality in 15 European cities. *Epidemiology*, 9(5):711-719.
5. Baldi M., Pasqui M., Cesarone F and De Chiara G, 2005: Heat waves in the Mediterranean Region: Analysis and model results. Paper presented in the 16th Conference on Climate Variability and Change - (San Diego, CA).
6. Beniston M, 2004. The 2003 heat wave in Europe: a shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophys Res Lett* 31. doi:10.1029/2003GL018857.
7. Benzi R, Deidda R and Marrocu M, 1997. Characterization of temperature and precipitation fields over Sardinia with principal component analysis and singular spectrum analysis. *International journal of climatology*, 17(11):1231–1262.
8. Campbell-Lendrum D, Woodruff R, 2007. Climate change: quantifying the health impact at national and local levels. WHO Environmental Burden of Disease Series No. 14. http://whqlibdoc.who.int/publications/2007/9789241595674_eng.pdf.
9. Chessa PA and Delitala AM, 1997. Objective analysis of daily extreme temperatures of Sardinia (Italy) using distance from sea as independent variable. *International journal of climatology*, 17(13):1467–1485.
10. Collins FC Jr and Bolstad PV, 1996. A comparison of spatial interpolation techniques in temperature estimation, *Proceedings of the Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*. January 21–25, 1996, Santa Fe, New Mexico, USA.
11. Condie R and Lee KA, 1982. Flood frequency analysis with historic information. *Journal of hydrology*, 58:47–61.
12. Delworth TL, Mahlman JD and Knutson TR, 1999. Changes in Heat Index Associated with CO₂-Induced Global Warming. *Climatic Change*, 43, 369-386.
13. Dodson R and Marks D, 1997. Daily air temperature interpolated at high spatial resolution over a large mountainous region. *Climate research*, 8(1):1–20.
14. Driscoll DM, 1992. Thermal Comfort Indexes: Current Uses and Abuses. *National Weather Digest*, 17, 4: 33-38.
15. Easterling DR, Meeh GA, Parmesan C, Changnon SA, Karl TR, Mearns LO, 2000. Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts, *Science*, 289: 2068 – 2074.
16. Ebi K and Meehl GA, 2007. Heatwaves and Global Climate Change, The Heat is On: Climate Change and Heatwaves in the Midwest. In: *Regional Impacts of Climate Change: Four Case Studies in the United States*. Pew Center on Global Climate Change, Arlington, 8-21.
17. Eckstein BA, 1989. Evaluation of spline and weighted average interpolation algorithms. *Computers & geosciences*, 15(1):79–94.
18. Eischeid JK, Baker FB, Karl TR and Diaz HF, 1995. The quality control of long-term climatological data using objective data analysis. *Journal of applied meteorology*, 34(12):2787–2795.
19. El Morjani Z, 2003. Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc). Doctoral thesis, University of Geneva. *Terre et environnement*, vol. 42.

20. El Morjani Z, Steeve E, Boos J, Abdel Ghaffar E and Musani A, 2007. Modelling the spatial distribution of five natural hazards in the context of the WHO/EMRO Atlas of Disaster Risk as a step towards the reduction of the health impact related to disasters. *International Journal of Health Geographics*, 6:8.
21. Foster HA, 1935. Duration curves. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 99:1213–1235.
22. Frich A., Alexander LV, Della-Marta P, Gleason B, Haylock M., Klein Tank A.M.G and Peterson T, 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19: 193–212.
23. Fuller WE, 1914. Flood flows. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 77:564–617.
24. Garcia-Plazaola JI, Esteban R, Hormaetxe K, Fernandez-Marin B and Becerril JM, 2008. Photoprotective responses of Mediterranean and Atlantic trees to the extreme heat-wave of summer 2003 in Southwestern Europe. *Trees*. 22:385-392.
25. Gerard R and Karpuk EW, 1979. Probability analysis of historical flood data. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 105(HY9):1153–1165.
26. Glickman Todd S, 2000. *Glossary of Meteorology*. Boston: American Meteorological Society.
27. Gosling SN, McGregor GR, Páldy A, 2007. Climate change and heat-related mortality in six cities. Part 1: model construction and validation. *Int J Biometeorol*, 51:525–540.
28. Gosling SN, Lowe JA, McGregor GR, Pelling M, Malamud BD, 2008. Associations between elevated atmospheric temperature and human mortality: a critical review of the literature. *Climatic Change*, 92 : 299-341.
29. Granger K and Berechree M, 2003. Heat wave risks. In: Granger K, Hayme M, eds. *Natural hazards and the risk they pose to south-east Queensland*. Canberra, Australian Geological Survey Organisation.
30. Gumbel EJ, 1941. The return period of flood flows. *American mathematical statistics*, 12(2):163–190.
31. Gumbel EJ, 1942. Statistical control curves for flood discharges. *Transactions, American Geophysical Union*, 23:489–500.
32. Gumbel EJ, 1954. The statistical theory of droughts. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 80:1–19.
33. Gumbel EJ, 1960. Bivariate exponential distribution. *Journal of the American Statistical Association*, 55:698–707.
34. Hajat S, Armstrong BJ, Baccini M, Biggeri A, Bisanti L, Russo A, Paldy A, Menne B, Kosatsky T, 2006. Impact of high temperatures on mortality. *Epidemiology* 17:632–638.
35. Hammond T and Yarie J, 1996. Spatial prediction of climatic state factor regions in Alaska. *Ecoscience*, 3(4):490–501.
36. Hargy VT, 1997. Objectively mapping accumulated temperature for Ireland. *International journal of climatology*, 17(9):909–927.
37. He Y, Bárdossy A, Brommundt J and Enzenhöfer R. 2006. Non-stationary flood frequency analysis in the context of climate variability. *Geophysical research abstracts*, 8, 04597.
38. Holdaway MR, 1996. Spatial modelling and interpolation of monthly temperature using kriging. *Climate research*, 6:215–225.
39. Hudson G and Wackernagel H, 1994. Mapping temperature using kriging with external drift: theory and an example from Scotland. *International journal of climatology*, 14:77–91.
40. Hulme M, Conway D, Jones PD, Jiang T, Barrow EM and Turney C, 1995. Construction of a 1961–1990 European climatology for climate change modelling and impact applications. *International journal of climatology*, 15:1333–1363.
41. Hutchinson MF and Gessler PE 1994. Splines—more than just a smooth interpolator, *Geoderma*, 62:45–67.
42. Huth R, Kysely J and Pokorna L., 2000. A GCM simulation of heat waves, dry spells, and their relationships to circulation. *Climatic Change*, 46:29-60.

43. Hutter H.P, Moshammer H, Wallner P, Leitner B and Kundi M, 2007. Heatwaves in Vienna : effects on mortality. *The Middle European Journal of Medicine*. 119/7-8: 223-227.
44. Huynen MMTE, Martens P, Schram D, Weijenberg MP, Kunst AE, 2001. The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population. *Environ Health Perspect*, 109: 463–470.
45. IPCC, 2000. Emissions Scenarios. A Special Report of IPCC Working Group III for the Intergovernmental Panel on Climate Change (<http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.htm>, accessed 17 February 2009).
46. IPCC, 2007. Summary for Policymakers. In *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
47. Jones T, Middelmann M and Corby N, 2005. Natural hazard risk in Perth, Western Australia. Canberra, Geoscience Australia.
48. Kite GW, 1977. Frequency and risk analyses in hydrology. Fort Collins, Colorado, Water Resources Publications.
49. Koppe C, Kovats S, Jendritzky G and Menne B, 2004. Heat-waves: risks and responses. World Health Organization. Regional Office for Europe. Health and Global Environmental Change, Series N° 2, Copenhagen, Denmark.
50. Koutsoyiannis D, 2004. On the appropriateness of the Gumbel distribution for modelling extreme rainfall In: *Hydrological risk: recent advances in peak river flow modelling, prediction and real-time forecasting. Assessment of the impacts of land-use and climate changes*:303–19. Bologna, Italy, Editoriale Bios, Castrolibero.
51. Kovats SR, Jendritzky G, 2006. Heat-waves and Human Health. In: Menne B, Ebi KL (eds.): *Climate Change and Adaptation Strategies for Human Health*. Steinkopff, Darmstadt, 63-97.
52. Landwehr JM, Matalas NC and Wallis JR, 1979. Probability weighted moments compared with some traditional techniques in estimating Gumbel parameters and quantiles. *Water resources research*, 15:1055–1064.
53. Legates DR and Willmott CJ, 1990. Mean seasonal and spatial variability in global surface air temperature. *Theoretical and applied climatology*, 41:11–21.
54. Lennon JJ and Turner JRG, 1995. Predicting the spatial distribution of climate: temperature in Great Britain. *Journal of animal ecology*, 64:370–392.
55. Li PW, Chan ST, 2000. Application of a weather stress index for alerting the public to stressful weather in Hong Kong. *Meteorological Applications*, 7 : 369-375.
56. Li J, Huang JF and Wang XZ, 2006. A GIS-based approach for estimating spatial distribution of seasonal temperature in Zhejiang Province, China. *Journal of Zhejiang University science A*, 7(4):647–656.
57. Lutgens FK and Tarbuck EJ, 1995. *The atmosphere*, 6th ed. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, Inc.
58. MacEachren AM and Davidson JV, 1987. Sampling and isometric mapping of continuous geographic surfaces. *American cartographer*, 14(4):299–320.
59. Masterton JM and Richardson FA, 1979. *Humidex: A Method of Quantifying Human Discomfort due to Excessive Heat and Humidity*, Environment Canada, Atmospheric Environment Service, Ontario, Canada, 1979.
60. Matheron G, 1963. Principles of geostatistics. *Economic geology*, 58:1246–1266.
61. Meehl G.A and Tebaldi C, 2004. More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. *Science*, 305 (5686): 994 – 997.
62. Meehl GA, Stocker TF, Collins WD, Friedlingstein P, Gaye AT, Gregory JM, Kitoh A, Knutti R, Murphy JM, Noda A, Raper SCB, Watterson IG, Weaver AJ, Zhao ZC, 2007. Global climate projections. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds) *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

63. Meylan P and Musy A, 1999. Hydrologie fréquentielle. Edition HGA Bucarest, 413p.
64. Michelozzi P, Kirchmayer U, Katsouyanni K, Biggeri A, McGregor G, Menne B, Kassomenos P, Anderson HR, Baccini M, Accetta G, Analytis A, Kosatsky T, 2007. Assessment and prevention of acute health effects of weather conditions in Europe, the PHEWE project: background, objectives, design. *Environmental Health*, 6-12.
65. Moin SMA and Shaw MA, 1985. Regional flood frequency analysis for Ontario streams: volume 1, single station analysis and index method. Burlington, Ontario, Inland Waters Directorate, Environment Canada.
66. Myers RH, 1990. Classical and modern regression with applications, Boston, Massachusetts, PWS-Kent Publishing.
67. Oke TR, 1995. The heat island characteristics of the urban boundary layer: Characteristics, causes and effects. In Cermak JE, Davenport AG, Plate EJ and Viegas DX. (eds). *Wind Climate in Cities*. 81-107. Netherlands: Kluwer Academic.
68. Palecki M.A., Changnon S.A and Kunkel KE, 2001. The nature and impacts of the July 1999 heat wave in the midwestern United States: learning from the lessons of 1995. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82:1353-1367.
69. Parsons KC, 2003. Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance. Taylor and Francis, London, New York, 527 pp.
70. Patzert WC, LaDochy S, Willis JK and Mardirosian T, 2007. Will the real Los Angeles stand up: Impacts of a weather station relocation on climatic records (and record weather). 16th Conference on Applied Climatology, AMS Annual Meet.
71. Rebetz M., Dupont O and Giroud M, 2008. An analysis of the July 2006 heatwave extent in Europe compared to the record year of 2003. *Theoretical and Applied Climatology*. Printed in The Netherlands.
72. Reid CE, O'Neill MS, Gronlund CJ, Brines SJ, Brown DG, Diez-Roux AV and Schwartz J, 2009. Mapping community determinants of heat vulnerability. *Environ. Health Perspect*, 117 1730–1736.
73. Robine JM, Cheung SLK, Le Roy S, Van Oyen H and Herrmann FR, 2003. Report on excess mortality in Europe during summer 2003. EU Community Action Programme for Public Health, Grant Agreement 2005114.
74. Robine JM, Cheung SLK, Le Roy S, et al., 2008. Death toll exceeded 70 000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies*, 331(2):171–178.
75. Robinson PJ, 2001. On the definition of a heat wave. *Journal of Applied Meteorology*, 40 (4): 762-775.
76. Rothfusz LP, 1990. The heat index “equation” (or, more than you ever wanted to know about heat index). Fort Worth, Texas, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Office of Meteorology. SR/SSD 90-23. At http://www.srh.noaa.gov/ffc/html/studies/ta_htindx.PDF. Accessed 2 April 2007.
77. Sarma P, 1999. Flood risk zone mapping of Dikrong sub basin in Assam. At http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/floods/nhcy0006pf.htm.
78. Schär C, Vidale PL, Lüthi D, Frei C, Häberli C, Liniger MA, Appenzeller C, 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427: 332-336.
79. Souch C and Grimmond S, 2006. Applied climatology: Urban climate. *Progress in Physical Geography*, 30: 270-279.
80. Steadman RG, 1979. The assessment of sultriness. Part 1: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *Journal of applied meteorology*, 18: 861-873.
81. Steadman RG, 1984. A universal scale of apparent temperature, *J. Clim. Appl. Meteorol.* 23, 1674-1687.
82. Stedinger JR, Vogel RM and Foufoula-Georgiou E, 1992. Frequency analysis of extreme events. In *Handbook of hydrology*, chapter 18, edited by D.A. Maidment, McGraw-Hill, New York.

83. Stolte W and Dumontier S, 1977. Flood frequency analysis for mountain and prairie streams. University of Saskatchewan and Alberta Environment.
84. Tamrazian A, LaDochy S, Willis JK and Patzert WC, 2008. Heat Waves in Southern California: Are They Becoming More Frequent and Longer Lasting? *APCG YEARBOOK*, 70: 59-69.
85. Tan J., Zheng Y, Song G, Kalkstein LS, Kalkstein AJ and Tang X, 2007. Heatwave impacts on mortality in Shanghai, 1998 and 2003. *Int J Biometeorol.*, 51: 193-200.
86. USACE, 1993. Hydrologic frequency analysis. Engineer Manual 1110-2-1415. Washington DC, US Army Corps of Engineers.
87. Vogel RM, 1986. The probability plot correlation coefficient test for normal, lognormal, and Gumbel distributional hypothesis, *Water resources research*, 22(4):587-590; corrections, 23(10):2013.
88. Vogt JV, Viau AA and Paquet F, 1997. Mapping regional air temperature fields using satellite-derived surface skin temperatures. *International journal of climatology*, 17(14):1559-1579.
89. Willmott CJ and Matsuura K, 1995. Smart interpolation of annually averaged air temperature in the United States. *Journal of applied meteorology*, 34(12):2577-2586.
90. World Health Organization (WHO), 2003a. The health impacts of 2003 summer heat waves. WHO Briefing Note for the Delegations of the 53rd session of the WHO Regional Committee for Europe. Vienna, Austria, 8 to 11 September 2003; available at www.euro.who.int/document/Gch/HEAT-WAVES%20RC3.pdf.
91. World Health Organization (WHO), 2003b. Methods of Assessing Human Health Vulnerability and Public Health Adaptation to Climate Change. World Health Organization, Geneva. Available at <http://www.euro.who.int/document/e81923.pdf>.
92. World Health Organization (WHO), 2009. Improving public health responses to extreme weather/heat-waves: EuroHEAT. Technical Summary. World Health Organization Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark.

CAPÍTULO V

Metodología y procesos de implementación para el peligro de velocidad del viento

5.1 Introducción

La metodología utilizada para la distribución del peligro de velocidad del viento comprende dos fases: la primera se fundamenta en técnicas de análisis de frecuencia para calcular la velocidad del viento promedio máxima diaria anual, en distintos periodos de retorno, en estaciones climatológicas específicas al interior de la República Mexicana. En la segunda fase, se emplea el modelado de regresión múltiple para obtener una interpolación de este parámetro climatológico, antes de ser reclasificadas para obtener la distribución espacial del nivel de intensidad de peligrosidad por velocidad del viento y los mapas de la distribución de peligros por velocidad del viento para México.

5.2 Metodología

Los cálculos de la distribución espacial de los datos de carácter meteorológico son cada vez más importantes en su calidad de insumos, al modelar los peligros meteorológicos globales y regionales. En este *Atlas* se emplea una técnica de mapeo objetiva, que usa datos empíricos y procedimientos estadísticos para estimar la distribución espacial de la velocidad del viento promedio máxima diaria anual para periodos de retorno de dos, cinco, ocho y diez años, como una medida del peligro por la velocidad del viento en la República Mexicana.

La realización de esta técnica incluye los siguientes pasos (**Figura 49**).

- Obtención de los datos sobre la velocidad del viento promedio diaria.
- Para cada estación meteorológica, el cálculo de la velocidad del viento promedio máxima diaria anual para periodos de retorno de dos, cinco, ocho y 10 años, empleando el análisis de frecuencia de Gumbel.
- Identificación de los parámetros relevantes para cada periodo de retorno; selección del modelo de regresión por pasos para espacializar la velocidad del viento promedio diaria máxima anual.
- Interpolación de la velocidad del viento promedio máxima diaria anual para cada periodo de retorno y zona, empleando los modelos de regresión seleccionados.
- Agrupación y clasificación de los mapas resultantes a fin de obtener el mapa de distribución del peligro por la velocidad del viento.

5.2.1 Obtención de los datos climatológicos

Se obtuvieron las velocidades promedio máximas diarias anuales del viento de 164 estaciones meteorológicas ubicadas al interior y en los alrededores de la República Mexicana, a partir del resumen de los datos diarios de la superficie global (Global Surface Summary of Day) disponible en la siguiente dirección electrónica: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/mpp/freedata.html> en el apartado “Global Summary of the Day (GSOD)” (Accesado febrero 2012) del Centro Nacional de Datos Climáticos de EU (NCDC), para el periodo comprendido entre 1997 y 2011.

Este conjunto de datos proporciona los siguientes 18 elementos meteorológicos para más de 9,000 estaciones:

- Temperatura media (.1 Fahrenheit)
- La media de punto de rocío (.1 Fahrenheit)
- La media de la presión a nivel del mar (.1 mb)
- Presión media de la estación (.1 mb)
- La media de visibilidad (.1 millas)

- La velocidad media del viento (.1 nudos)
- Velocidad máxima sostenida del viento (.1 nudos)
- Ráfaga de viento máxima (.1 nudos)
- Mínimo y máximo de temperatura (.1 Fahrenheit)
- Cantidad de precipitación (.01 pulgadas)
- Espesor de nieve (.1 pulgadas)
- Indicador de la presencia de: niebla, lluvia o llovizna, nieve o hielo granulado, Nube granizo, truenos y tornados

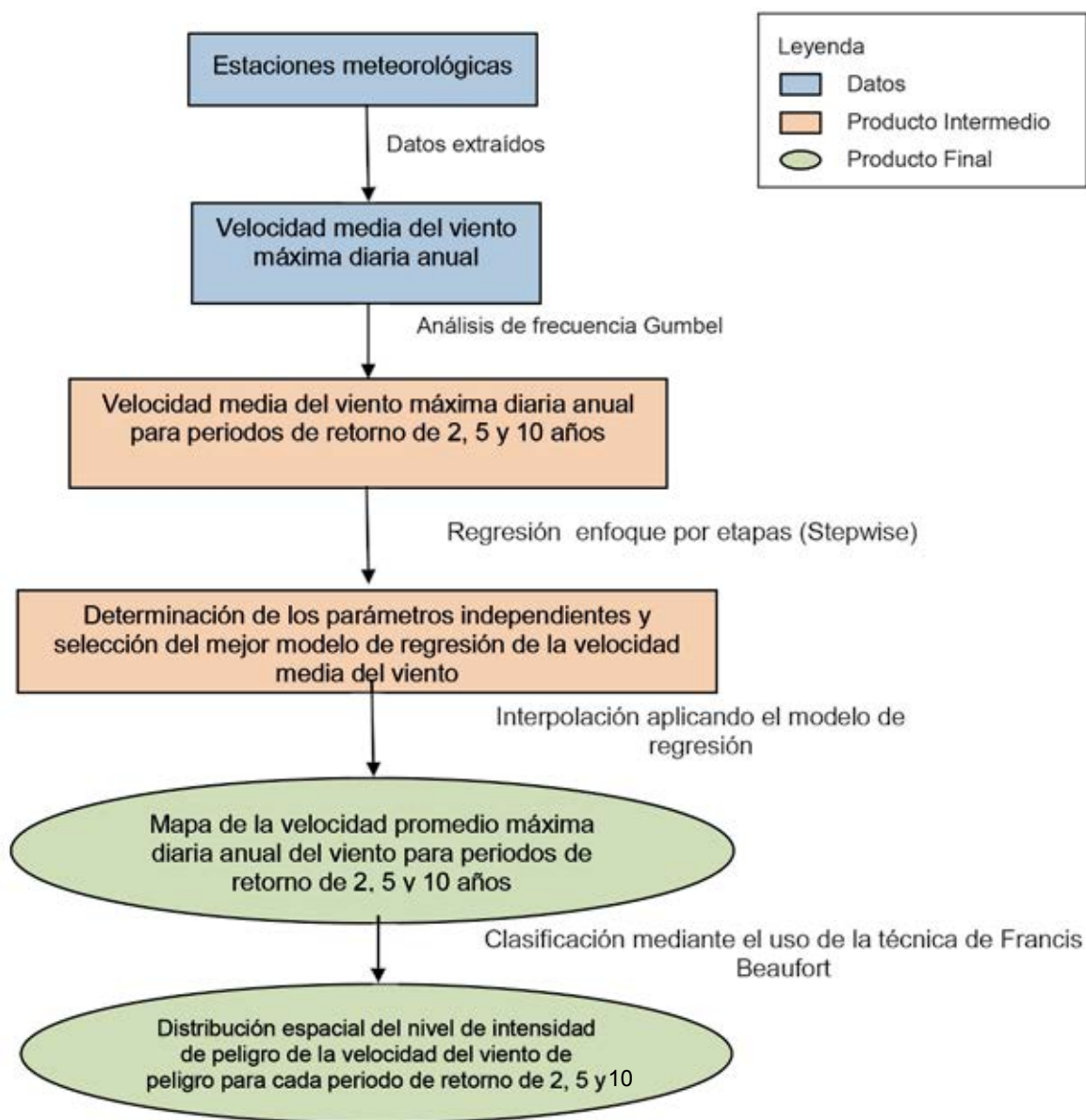


Figura 49. Metodología empleada para obtener la distribución espacial del nivel de intensidad de la velocidad del viento en la República Mexicana

Los datos históricos están generalmente disponibles de 1929 hasta el presente, aunque el periodo más completo se presenta de 1973 al presente. En este análisis, sólo las estaciones climatológicas que

tuvieron registros correspondientes a catorce años y que no se encontraron en las islas, se emplearon para predecir la velocidad promedio máxima diaria anual del viento para periodos de retorno de dos, cinco, ocho y 10 años.

5.2.2 Cálculo de la velocidad promedio máxima diaria anual del viento para distintos periodos de retorno

Considerando que los datos de carácter meteorológico varían en el espacio y tiempo, es necesario analizar datos procedentes de periodos anteriores, así como de diversas ubicaciones, a fin de poder interpretar plenamente las tendencias del pasado. La identificación de los patrones históricos permite estimar las futuras tendencias meteorológicas. La estimación de estas últimas se fundamentan en el uso de una función de distribución de probabilidad, como lo indican diversos autores [Fuller, 1914; Foster, 1935; Gumbel, 1941; Gumbel, 1942; Kite, 1977; Stolte y Dumontier, 1977; Gerard y Karpuk, 1979; Condic y Lee, 1982; Moin y Shaw, 1985; Stedinger et al., 1992; USACE, 1993; y Jones et al., 2005]. Una función de distribución de probabilidad produce condiciones meteorológicas esperadas para varios periodos en el futuro (periodos de retorno).

Este enfoque no requiere de una amplia comprensión de la meteorología, o bien de los fenómenos meteorológicos, sino que analiza la relación que existe entre la magnitud y la frecuencia de ocurrencia del fenómeno en el pasado, a fin de identificar cierta regularidad estadística entre ambas. En realidad, el pasado se extrapola al futuro. Las funciones de distribución de probabilidad utilizadas más frecuentemente, incluyen la Gumbel, la log-normal, Pearson tipo 3, la log Pearson tipo 3 y la distribución gama. A pesar de la vasta literatura sobre el tema, no hay ninguna función de distribución preferente para el análisis de frecuencia de los datos meteorológicos, debido a que cada función tiene su propio conjunto de ventajas y desventajas únicas. El problema se complica debido a la necesidad de evaluar datos meteorológicos para periodos de retorno que exceden la duración del registro en observación.

En nuestro contexto, la función de distribución de valores extremos de Gumbel [Gumbel, 1941; Gumbel, 1954; Gumbel, 1960; Landwehr et al., 1979; Vogel, 1986; Sarma, 1999; El Morjani, 2003; Koutsoyiannis, 2004, He et al., 2006] resulta ser la función más adecuada debido a que busca identificar la distribución temporal de valores extremos en diferentes periodos de retorno. De manera adicional, esta función de distribución de probabilidad (ecuación 5.1) es una de las más ampliamente empleadas en la predicción de valores extremos al analizar datos hidrológicos y meteorológicos (Meyland y Musy, 1998).

Ecuación 5.1

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-a}{b}}}$$

Donde:

$F(x)$ = la función de distribución acumulativa. a y b = parámetros de ajuste; a es un parámetro de ubicación y b es un parámetro de escala.

Al reemplazar $\frac{x-a}{b}$ por la u variable reducida, la función de distribución acumulativa se convierte en,

Ecuación 5.2

$$F(x) = e^{-e^{-u}} \rightarrow u = -\ln[-\ln F(x)] = -\ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right]$$

donde $F(x)=1-\frac{1}{T}$ con T = periodo de retorno.

Si se toma como ejemplo la estación de General Juan N. Alva (Guerrero), las series de valores anuales extremos de la velocidad del viento se ajustan a una distribución Gumbel, llevando a cabo los siguientes pasos:

El valor máximo anual de las series de velocidad promedio diaria del viento se ubica en orden ascendente (**Tabla 25**).

La frecuencia empírica es medida para cada valor, empleando la fórmula Hazen.

Ecuación 5.3

$$F = \frac{r - 0.5}{n}$$

(Meylan y Musy, 1998), donde r = rango de cada valor y n = cantidad de años incluidos en el registro. (**Tabla 25**). La u variable reducida Gumbel se calcula aplicando la ecuación 5.2 (**Tabla 25**). A continuación se calcula el promedio de la variable meteorológica y de la variable reducida Gumbel.

Tabla 25. Distribución por rangos de la velocidad promedio máxima diaria anual del viento, la frecuencia empírica, la variable reducida de Gumbel y los parámetros estadísticos asociados de la estación General Juan N. Alva (Guerrero).

Año	Max Viento (V)	Rango	Frecuencia empírica (F) $F(x)=(r-0.5)/n$	Gumbel reducción (u) $u=-Ln(-LnF(x))$
2004	10.22	1	0.04	-1.18
2005	11.12	2	0.12	-0.77
2007	11.32	3	0.19	-0.50
1995	11.62	4	0.27	-0.27
2006	11.82	5	0.35	-0.06
2003	12.12	6	0.42	0.15
1997	12.62	7	0.50	0.37
2000	12.72	8	0.58	0.60
1999	12.82	9	0.65	0.86
1998	13.62	10.5	0.77	1.34
2002	13.62	10.5	0.77	1.34
2001	15	12	0.88	2.10
1996	16.82	13	0.96	3.24
Media (M)	12.73			0.55
Desviación (D)	1.75			1.23
a= Mtemp-B*Mu	11.93			
b=DT/Du	1.43			

El ajuste de la distribución Gumbel se puede apreciar visualmente mediante la elaboración de una gráfica de la velocidad máxima diaria anual del viento y la u variable reducida de Gumbel (**Figura 50**). Esta gráfica también permite identificar los valores atípicos, que pueden eliminarse del conjunto de datos. En el caso de la estación meteorológica de General Juan N. Alva (Guerrero), la gráfica muestra un ajuste adecuado a la distribución Gumbel, así como la ausencia de todo valor atípico.

Los parámetros de ajuste estadísticos de la distribución (a y b) se derivan empleando los métodos de cuadrados negativos (**Tabla 25**).

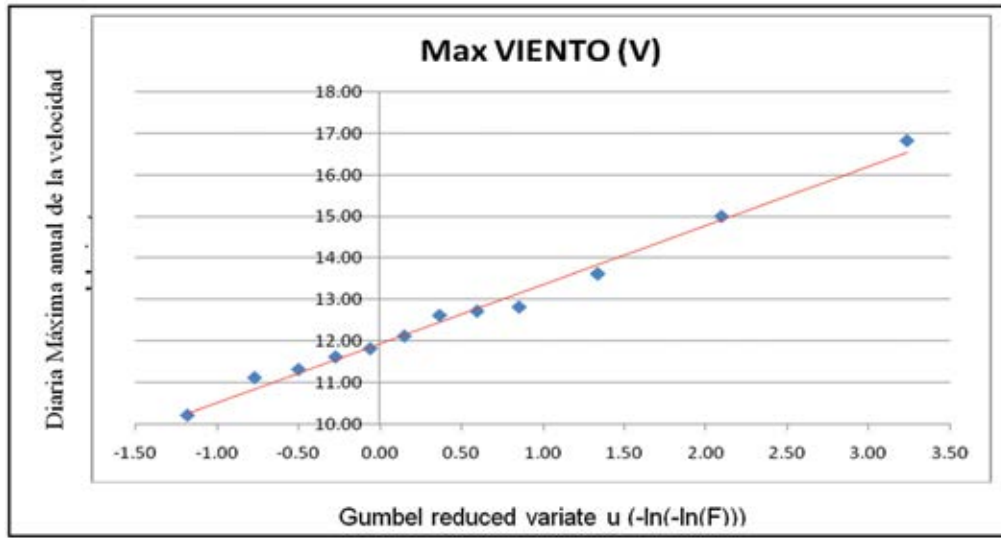


Figura 50. Velocidad promedio máxima diaria anual del viento y la distribución de la variable reducida de Gumbel en la estación de General Juan N. Alva (Guerrero)

Ecuación 5.4

$$b = \frac{S_x}{S_u}$$

Ecuación 5.5

$$a = \bar{x} - b\bar{u}$$

Donde S_x = la desviación estándar de la variable meteorológica.

S_u = la desviación estándar reducida de Gumbel.

\bar{x} = el promedio de la variable meteorológica.

\bar{u} = el promedio reducido Gumbel.

La velocidad promedio diaria anual del viento se calcula para el periodo de retorno deseado T (dos, cinco, ocho y diez años), empleando el siguiente modelo estadístico (Tabla 26):

Ecuación 5.6

$$X_T = a + bu = a + b \left[-\ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right]$$

Donde X_T es el valor de la variable con un periodo de retorno T .

El proceso de cálculo consiste de los siguientes tres pasos, empleando un periodo de retorno de cinco años, por ejemplo:

- a) Cálculo de las posibilidades de no excederse $F(x) = 1 - \frac{1}{T}$ para $T = 5$ años, $F(x) = 0.8$.
- b) Cálculo del variado reducido de Gumbel mediante la ecuación 5.5, $u = 1.5$.
- c) Cálculo de la velocidad de viento máxima diaria anual empleando la relación lineal indicada en la ecuación 5.6 (a y b se determinan a través de la ecuación 5.3 y la ecuación 5.4: $a = 5.72$ y $b = 1.89 \rightarrow X_5 = 5.72 + (1.89 \times 1.5) = 8.56$).

Tabla 26. Velocidad promedio máxima diaria anual del viento con intervalos de confianza de 80% y 95% en la estación de General Juan N. Alva (Guerrero) para periodos de retorno de dos, cinco, ocho y diez años.

Periodo de retorno (años)	Parámetros de ajuste		Velocidad promedio máxima diaria anual del viento (m/s)
	<i>a</i>	<i>b</i>	
2	6.26	0.81	6.56
5	6.26	0.81	7.48
10	6.26	0.81	8.08

El proceso descrito anteriormente se ha implementado en la aplicación E-atlas ClimMod 1.0 para generar la velocidad promedio máxima diaria anual del viento para cada estación meteorológica y para cada periodo de retorno (dos, cinco, ocho y diez años), utilizando la aplicación “Modelo de Gumbel”. Esta aplicación ha sido desarrollada en el software Matlab, que esta basada en el lenguaje C++.

5.2.3 Identificación de los parámetros y selección del modelo de regresión

La interpolación espacial se utiliza ampliamente para convertir datos meteorológicos dispersos e irregulares (recopilación de datos en lugares diferentes, p.e. en extremos] en superficies de datos continuos (*rasters*).

La selección del método de interpolación es particularmente importante en la República Mexicana, donde los datos meteorológicos son escasos y presentan grandes cambios de valores en distancias cortas. Además, la densidad espacial, la distribución y la variabilidad espacial de las estaciones que conforman la muestra, ejercen influencia sobre la selección de la técnica de interpolación (MacEarchren y Davidson, 1987).

Al disponer de un conjunto de datos meteorológicos, los investigadores se enfrentan a una variedad de métodos determinísticos y estocásticos de interpolación espacial, para calcular los valores de los datos meteorológicos procedentes de lugares no muestreados:

- Los métodos de estimación *determinística* incluyendo la *ponderación de la distancia inversa* [Legates y Willmon, 1009; Eischeid et al., 1995; Lennon y Turner, 1995; Willmott y Matsuura, 1995; Collins y Bolstad, 1996; Ashraf et al., 1997; Dodson y Marks, 1997) y los métodos *spline* (Ecjsteubm 1989; Hutchinson y Gessler, 1994; Hulme et al., 1995; Lennon y Turner, 1995; Collins y Bolstad, 1996].
- *Técnicas estocásticas* que incluyen técnicas de krigado y cokrigado [Matheron, 1963; Hudson y Wackernagel, 1994; Collins y Bolstad, 1996; Hammond y Yarie, 1996; Holdaway, 1996; Ashraf et al., 1997; El Morjani, 2003) y regresión *polinomial* (Myers, 1990; Collins y Bolstad, 1996; Benzi et al., 1997; Chessa y Delitala, 1997; Argüí, 1997; Vogt et al., 1997; Agnew y Palutikof, 2000; El Morjani, 2003; Li et al., 2006].

Puede consultarse un resumen descriptivo de estos métodos en Collins y Bolstad [1996] y El Morjani [2003)].

Las características de los datos encontrados para la República Mexicana (datos de baja densidad espacial, notable variabilidad espacial y ausencia de datos meteorológicos), condujeron a resultados no plausibles al aplicar los métodos de ponderación de la distancia inversa y de interpolación *krigeada*, de la manera como a continuación se especifica.

La aplicación del método de ponderación de la distancia inversa sobre un área de prueba generó *specking* o efectos “de ojos de pájaro” alrededor de la ubicación de las estaciones, lo cual no es creíble dado que la variación espacial para el índice de velocidad de viento máximo diario no seguía una tendencia regular.

La aplicación de la técnica *krigeado* sobre la misma área de prueba reveló resultados inconsistentes con los datos originales. Sin importar el modelo utilizado (esférico, exponencial o Gausiano), la validación estadística cruzada no pudo ajustarse a el semi-variograma espacial teórico. Lo anterior pudo deberse a que la densidad de las estaciones climatológicas es demasiado baja y el área de estudio muy amplia para soportar el uso del método de interpolación *krigeada*. Por lo tanto, ha sido necesario encontrar otro modelo que arroje resultados de buena calidad.

Las mismas variables que fueron consideradas para la espacialización del índice de calor (véase el documento relativo a la metodología y proceso de implementación para modelar la distribución espacial del peligro por calor, que se encuentra en el primer volumen del *Atlas*) se han empleado para la velocidad del viento, en particular:

- Los parámetros topográficos, incluyendo la elevación (Z); la elevación promedio dentro de una celda de 3x3 pixeles (Z9); el aspecto (ASP), clasificación del aspecto (Asp_w, Asp_nw, etc. y pendiente (SLP).
- Los factores geográficos, incluyendo la longitud (X), la latitud (Y); y la distancia a la costa más próxima (d_Coast), distancia a la costa del Pacífico, y Golfo de México.
- Frecuencia de huracanes (HF)

Una vez identificadas las variables, a las cuales se agregaron sus cuadrados y cubos, se empleó la técnica de regresión lineal por pasos (hacia adelante y hacia atrás) para identificar su significancia estadística, en caso de tenerla, y su contribución relativa a la determinación de la variable dependiente (la velocidad promedio máxima diaria anual del viento), eliminado de esta manera toda variable no significativa.

Se llevó a cabo un análisis de regresión lineal por pasos empleando el *software* S-Plus 6.0. La validación de cada regresión se realizó empleando el análisis de varianza R^2 , así como un análisis de probabilidad y residual detallado, con la finalidad de identificar las variables significativas y, por consiguiente, seleccionar el mejor modelo de regresión. A manera de ejemplo, el análisis de regresión paso a paso de un periodo de retorno de dos años, aplicado a las 164 estaciones meteorológicas, arroja los siguientes resultados (**Tabla 27**):

Ocho de las 17 variables independientes contribuyeron a explicar la mayor parte de la variación de la velocidad del viento en un periodo de retorno de dos años; las ocho variables (Pendiente (Slp_p_mex_e), Aspecto (Asp_mex_new_e), Aspecto noroeste(Asp_nw), Longitud (Dist_x_mexkme), latitud ([Dist_y_mexkme), distancia de la costa norte (Dist_North), distancia a la costa sur (Dist_South) y distancia a la costa (Dist_coast_e), se emplearon para derivar la siguiente ecuación de regresión:

$$\begin{aligned}
 & -([Slp_p_mex_e] * [Slp_p_mex_e] * 0.794263553991) +([Slp_p_mex_e] * [Slp_p_mex_e] * \\
 & [Slp_p_mex_e] * 0.224666203398) -([Asp_mex_new_e] * [Asp_mex_new_e] * \\
 & 0.000013123812)+([Asp_nw] * 1.742458298039) +([Dist_x_mexkme] * 0.022342162053)- \\
 & ([Dist_x_mexkme] * [Dist_x_mexkme] * 0.000011455099)+([Dist_x_mexkme] * [Dist_x_mexkme] * \\
 & [Dist_x_mexkme] * 0.000000001782)+([Dist_y_mexkme] * 0.006825031091)-([Dist_north_ke] * \\
 & 0.018694218537)+([Dist_north_ke] * [Dist_north_ke] * 0.000006650765)-([Dist_south_ke] * \\
 & 0.023591056902)+([Dist_south_ke] * [Dist_south_ke] * 0.000011747902)+([Dist_coast_e] * \\
 & [Dist_coast_e] * 0.000039516216) -([Dist_coast_e] * [Dist_coast_e] * [Dist_coast_e] * \\
 & 0.000000036599)
 \end{aligned}$$

Las variables que aparecen en la ecuación explican significativamente la variación de la velocidad del viento promedio máxima diaria anual. Noventa y cuatro por ciento de la varianza en la velocidad extrema del viento se explica por las 8 variables conservadas en la ecuación de regresión ($R^2=0.94$). Se considera válido y confiable el modelo debido a la alta correlación ($R=0.94$) y al elevado grado de confianza que existe con las variables seleccionadas (ilustrada por una muy pequeña probabilidad [estadístico F]).

5.2.4 Espacialización de la velocidad promedio máxima diaria anual del viento en la República Mexicana

Una vez encontrado el modelo de regresión y el período de retorno, el siguiente paso consiste en la clasificación de los mapas de distribución.

5.2.5 Clasificación de los mapas de distribución de la velocidad promedio máxima diaria anual del viento en los mapas de peligro finales

El último paso de la metodología consistió en derivar la distribución espacial del nivel de intensidad del peligro por la velocidad del viento para cada periodo de retorno a partir de los mapas de distribución de la velocidad promedio máxima diaria anual del viento. Lo anterior se llevó a cabo reclasificando los mapas de acuerdo a cinco niveles de intensidad seleccionados para este proyecto (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto).

La reclasificación se realizó empleando la clasificación de Beaufort modificada para la velocidad del viento, utilizada por el Servicio Nacional de Meteorología de EU (<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/climatedata/html>), indicada en el **Tabla 28**.

Tabla 27. Modelo de regresión para el índice de la velocidad del viento máximo diario anual (periodo de retorno de dos años)

VARIABLES:

	Valor	Error estándar	Valor de t	Probabilidad (> t)
I(SLP ²)	-0.794263553991	0.174611641431	-4.548743414144	0.000010651908
I(SLP ³)	0.224666203398	0.040045999481	5.610203423762	0.000000087671
I(Aspect ²)	-0.000013123812	0.000005397053	-2.431662824748	0.016140381174
Asp.NW	1.742458298039	0.660333502062	2.638754951244	0.009148764869
D.X.km	0.022342162053	0.006600497216	3.384921063036	0.000896903318
I(D.X.km ²)	-0.000011455099	0.000004087359	-2.802567578332	0.005700649988
I(D.X.km ³)	0.000000001782	0.000000000666	2.677248331879	0.008201825169
D.Y.km	0.006825031091	0.001921413140	3.552089318448	0.000503180402
D.COAST.N.km	-0.018694218537	0.004886212881	-3.825911599384	0.000186852995
I(D.COAST.N.km ²)	0.000006650765	0.000001911648	3.479073916437	0.000649326151
D.COAST.S.km	-0.023591056902	0.005440558720	-4.336145994820	0.000025649778
I(D.COAST.S.km ²)	0.000011747902	0.000003499973	3.356569856402	0.000987253605
I(D.COAST.km ²)	0.000039516216	0.000013566891	2.912694964434	0.000010651908
I(D.COAST.km ³)	-0.000000036599	0.000000015180	-2.410960693369	0.000000087671

Residual standard error: 2.14317608759 on 159 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.941896458012
F-statistic: 184.106721627 on 14 and 159 degrees of freedom, the p-value is 0
Residual standard error: 2.14317608759 on 159 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.941896458012

Tabla 28. Correspondencia entre los rangos de velocidad promedio máxima diaria anual del viento y los niveles de intensidad

Rango de velocidad del viento (m/s)	Nivel de intensidad
<3.3	Muy bajo
3.3 - 10.7	Bajo
10.7 - 17.1	Medio
17.1 - 24.4	Alto
> 24.4	Muy alto

5.3 Implementación de la metodología

En esta sección se describe cómo la metodología presentada en la sección 5.2 se implementó empleando el software indicado en la sección 5.3.1. Los nombres de los archivos se indican en negritas en el texto. Cuando aparece un “*” después del nombre del archivo, eso indica datos de insumo que están descritos en el documento *Metodología y proceso de implementación para generar el conjunto de datos*, mismo que se encuentra en el primer volumen del *Atlas*.

5.3.1 Requerimientos de software

Para la implementación de los procesos y métodos descritos en este documento, se requiere el siguiente *software*:

- ArcView 3.x con la extensión Spatial Analyst 1.1, ambos creados por Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc. para operaciones geoespaciales.

Los siguientes Scripts, también fueron utilizados, estos pueden ser encontrados de manera gratuita en la pagina <http://arcscripsts.esri.com/>, o desde la sección de herramientas del primer volumen del e-atlas.

- Grid Analyst (GridAnalyst.avx)
- Compiled_Table_Tools.avx
- XTools (XTOOLSMH.avx)
- Grid and theme projector v.2 (grid_theme_prj.avx).

Estos scripts, deben de ser cargados a Arcview en C:\ESRI\AV_GIS30\ARCVIEW\EXT32 antes de iniciar el proceso que se presenta en las siguientes secciones.

- Matlab desarrollado por MathWorks, este programa fue utilizado para la creación de una aplicación con una interfaz grafica interactiva donde se pudiera programar la distribución de probabilidad Gumbel para periodos de retorno futuros, esta aplicación se denomina “Gumbel Modeling”. Este programa ha sido utilizado por las siguientes razones:
 - En este método tratamos con archivos de gran tamaño (aproximadamente 160,000 líneas), algunos software están limitados para el manejo de esta cantidad de líneas.
 - En esta aplicación, los cálculos se realizan en ciclos constantes, condiciones de prueba, y las stop test, por otra parte, los procedimientos requieren la ejecución de varias funciones

relacionadas entre si, de ahí la necesidad de un software que tenga una plataforma para programar.

- Matlab considera a cualquier variable como una matriz, por lo que los archivos procesados son almacenados como matrices, lo que hace que el tratamiento de dichos archivos más rápido.

Esta aplicación ha sido desarrollada para calcular y estimar las distintas variables climáticas, como el máximo diario anual de la velocidad media del viento durante diferentes periodos de retorno, Los códigos de esta aplicación están disponibles en un archivo Zip llamado EatlasClimMod.zip que se encuentra en la sección de herramientas en el DVD anexo. Este archivo Zip contiene las siguientes funciones:

calcul_HeatIndex()	fct_CalculHeatIndexPerDay()	index_return()
calcul_HeatWave()	WaveModelling ()	save_liste_STNs()
delete_errorLine()	fct_MainProgram()	save_one_STN()
delete_null_line()	fct_Preprocessing()	check_succession()
fix_threshold()	Gumbel()	
fct_rank()	GUI_HWI_Gumbel ()	

Todas estas funciones son accesibles por el usuario a través de una interfaz gráfica que se ha desarrollado en Matlab 6.0. Esta interfaz así como las diferentes funciones se presentan en las siguientes secciones.

- Word-pad o bloc de notas: para mostrar la tabla de resultados.
- Microsoft Excel
- S-Plus 6.0, creado por Insightful Corporation, para explorar e identificar los parámetros estadísticamente significativos y su relativa contribución a la espacialización del índice de velocidad del viento mediante una regresión múltiple paso por paso.

Los requisitos de hardware mínimos y recomendados para ejecutar Matlab “Gumbel Modeling” son los siguientes:

- Procesador: Intel Pentium 3 o superior.
- 256 MB de memoria RAM (se recomienda 512 MB o mayor).
- 600 MB de espacio en disco duro (se recomienda 1 GB).
- Tarjeta grafica (se recomienda SVGA).

No obstante, todas las pruebas relativas a la aplicación del “Gumbel Modeling” fueron ejecutadas usando un ordenador con las siguientes características:

- Procesador Inter Pentium IV (1.4 Gzh).
- 512 MB en RAM.
- 2 GB de Disco Duro.

5.3.2 Preparación de los datos meteorológicos

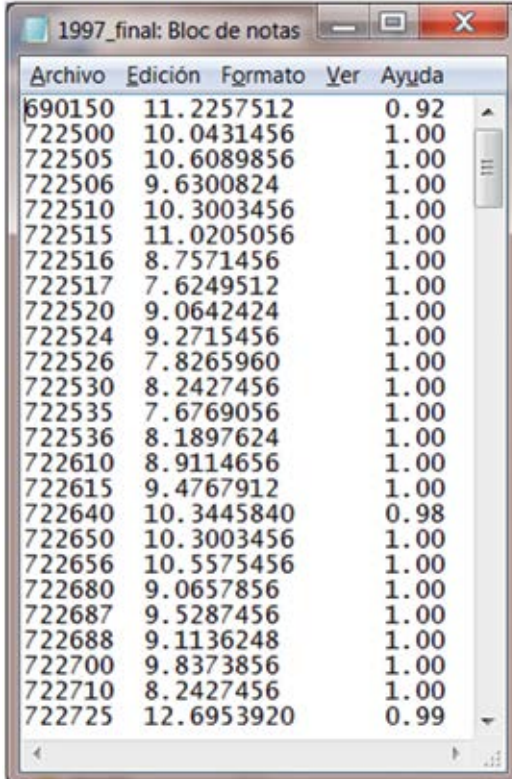
La fuente de los datos meteorológicos empleados en este protocolo es el Resumen de los Datos Diarios de la Superficie Global, elaborado por el Centro Nacional de Datos Climáticos (NCDC). Los atributos de esta serie de datos incluyen los siguientes elementos de datos cotidianos:

- Temperatura promedio;
- Punto de condensación promedio;
- Presión promedio al nivel del mar;
- Presión promedio en la estación;
- Visibilidad promedio;

- Velocidad del viento máxima sostenida;
- Ráfaga de viento máxima;
- Temperatura máxima;
- Temperatura mínima;
- Cantidad de precipitación;
- Profundidad de la nieve;
- Indicador de ocurrencia de: - niebla, - lluvia o llovizna, - nieve o bolas de hielo, - granizo - trueno y - tornado/nube en forma de embudo

De todas estas variables, se utilizó la velocidad promedio diaria del viento, entre 1997 y 2011. El procedimiento empleado para calcular la velocidad del viento promedio máxima diaria anual incluyó los siguientes pasos:

1. Descargar y guardar los 12 archivos con extensión .op.gz comprimidos que contienen los datos anuales (todos los 1997 hasta todos los 2011), los cuales están disponibles en la siguiente dirección electrónica: <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/g sod/>.
2. Renombrar los archivos a extensión .txt en su propia carpeta. Y unir los archivos de tal manera que todas las estaciones queden en un solo archivo para los años de 1997 al 2011. Los nombres de los campos y su descripción pueden consultarse en el **Anexo 31**.
3. Abra los archivos en Microsoft Excel 2010 y elimine los campos no requeridos quedándonos solo con los archivos 1: STN, 3: YEARMODA and 9: WDSP.
4. Establecer los datos con valores “999.9” a valores Null, abra el archivo en Microsoft Excel 2010 y filtre la columna WDSP seleccionando solo las filas con “999.9” de ahí proceda a eliminar estos archivos y posteriormente guardar el archivo, como BASE97W.
5. El siguiente paso consiste en convertir la velocidad del viento de nudos a m/s, para hacer esto seguiremos los siguientes pasos: abrir el archivo con los datos del año por ejemplo BASE97W., agregar una columna a un costado de la de WDSP con el nombre mnsdpd_m y colocar la siguiente formula (Celda con el valor de WDSP*0.5144).
6. Repita los pasos del 1 al 5 para los demás años de observación.
7. Agregue otro campo con el nombre “stn_year”, este campo tendrá el contenido de la estación y el año, para esto agregue la siguiente formula (=Concatenar(A2,Extrae(B2,1,4)).
A2= Celda donde se encuentra el valor de la estación (STN).
B2= Celda donde se encuentra el valor de la fecha de la estación (YEARMODA).
 Guardar el archivo como base1998.txt.
8. Abrir el archivo en arcview 3.x, seleccionar el encabezado “stn_year” y dar un clic en la opción **Field>Summarize** y poner las siguientes instrucciones en el cuadro de texto:
 - Sobre Save As, cambiar el nombre del archive de salida por Año_max_mnsp.dbf.
 - Sobre Field, buscar en la lista y dar un clic a “mnsdpd_m” y dar un clic a Add.
 - Sobre Summarize seleccionar “maximum” y dar un clic en OK.
9. Se crea automáticamente una tabla “max_mnsdpd_m” y los campos Snt_Year, Count y Max_Mnsdpd_m, el siguiente paso es crear el campo “freq”, damos un clic a Table>Start Editing y luego a Edit>Add Field, en el cuadro seleccionamos, Nombre: Freq, Number y 2 Decimal Places.
10. Damos un clic sobre el campo “Freq” y un clic a Calculate, donde dividiremos [Count]/365 y un clic a OK, nos vamos a Table>Stop Editing y damos un clic a Yes.
11. Al final abrir el archivo **año_max_mnsp.dbf** extraer los datos de STN del campo STN_YEAR (reemplazar el valor de año por “”), el campo de MAX_MNSPD_M, y FREQ y borrar los encabezados (Figura 51).
12. Guardar el archivo con el nombre de Final_año.TXT (1997.final.txt), estos archivos son necesarios para la aplicación del método Gumbel (Sección 5.3.3.).
13. Repetir para los demás años de exploración.




Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
690150	11.2257512			0.92
722500	10.0431456			1.00
722505	10.6089856			1.00
722506	9.6300824			1.00
722510	10.3003456			1.00
722515	11.0205056			1.00
722516	8.7571456			1.00
722517	7.6249512			1.00
722520	9.0642424			1.00
722524	9.2715456			1.00
722526	7.8265960			1.00
722530	8.2427456			1.00
722535	7.6769056			1.00
722536	8.1897624			1.00
722610	8.9114656			1.00
722615	9.4767912			1.00
722640	10.3445840			0.98
722650	10.3003456			1.00
722656	10.5575456			1.00
722680	9.0657856			1.00
722687	9.5287456			1.00
722688	9.1136248			1.00
722700	9.8373856			1.00
722710	8.2427456			1.00
722725	12.6953920			0.99

Figura 51. Ejemplo de la media diaria anual de la velocidad de viento correspondiente al año 1997 (final_1997) (Columna 1: Estación, Columna 2: Velocidad media del viento, Columna 3: Frecuencia anual)

5.3.3 Cálculo de la velocidad promedio máxima diaria anual del viento para distintos periodos de retorno

La aplicación del método de frecuencias Gumbel para estimar la media máxima diaria anual de la velocidad del viento para diferentes periodos de retorno, se lleva a cabo mediante la aplicación EatlasClimMod 1.0 en Matlab 6.0 (o superior). Los siguientes pasos se deben seguir para iniciar la aplicación EatlasClimMod 1.0:

1. Ejecute el software MATLAB, le aparecerá la siguiente ventana, como muestra la **Figura 52**.
2. Antes de continuar, especifique la ruta del directorio actual de la aplicación “Gumbel Modeling”, utilizando el botón Examinar .
3. Inicie la aplicación, haciendo clic en el menú File>Open y seleccione el archivo “GUI_Gumbel” como se muestra en la **Figura 53**. El programa principal se abrirá en el software MATLAB como se muestra en la **Figura 54**.
4. Presione F5 o haga clic en el botón Run para correr la aplicación “Gumbel Modeling”. La interfaz grafica de usuario aparecerá como se muestra en la **Figura 54**.

Ahora estamos listos para utilizar la aplicación “Gumbel Modeling” que calcula la máxima media diaria de la velocidad de viento para predicciones futuras. Este menú contiene dos controles “Operation” y “About”, al hacer clic en “About”, tenemos acceso al archivo de ayuda o a la ventana de derechos de autor (**Figura 55 y 56**).

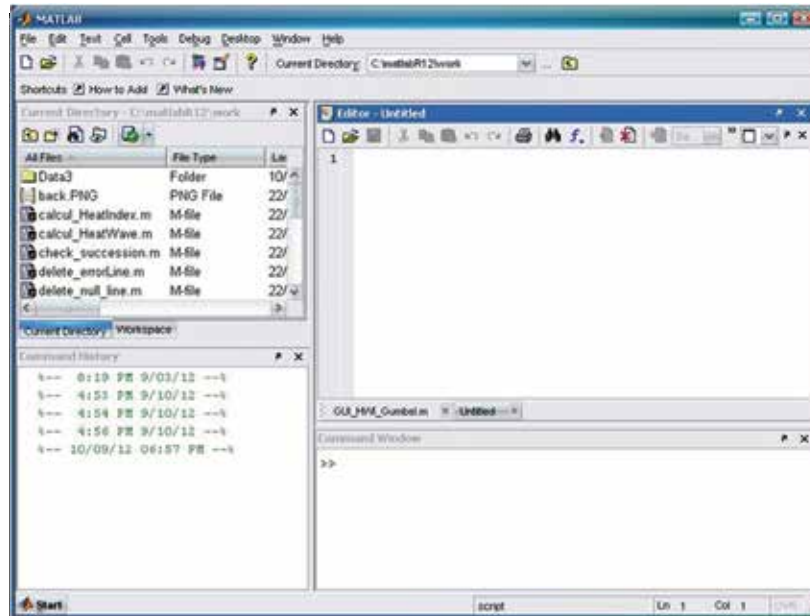


Figura 52. Interface software MATLAB

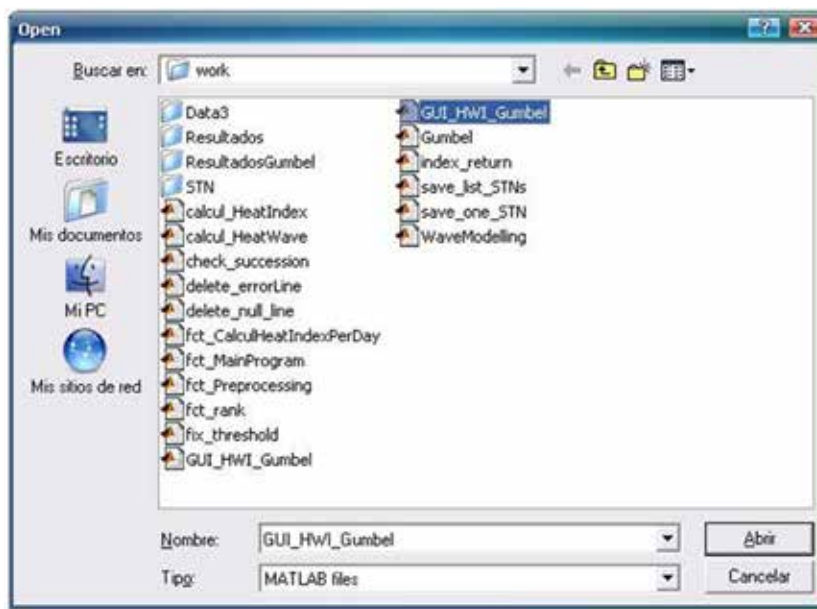


Figura 53. Seleccionar la aplicación "Gumbel Modeling"

El control "Operation" contiene 3 opciones:

- **Saving STN** permite guardar los datos de cada estación en un archivo.
- **Gumbel method** para predecir la velocidad del viento para diferentes periodos de retorno, que contienen dos submenús:
 - **All stations** Permite aplicar el método Gumbel en todas las estaciones.
 - **One station** Permite aplicar el método Gumbel a una estación.
- **Exit** cerrar la aplicación

En las siguientes secciones se describen las diferentes ventanas y los pasos a seguir para poder llevar a cabo el modelo.

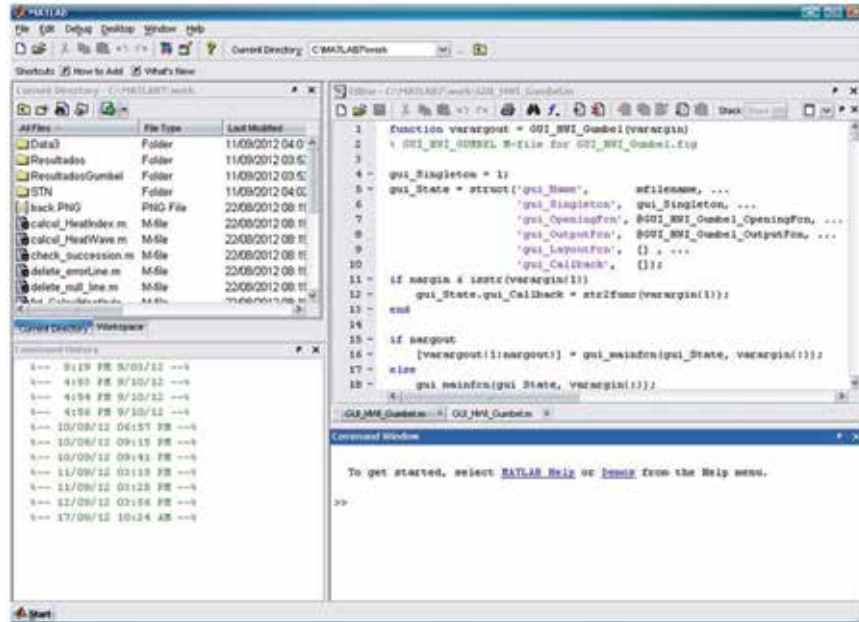


Figura 54. Abrir el programa principal de la aplicación “Gumbel Modeling”

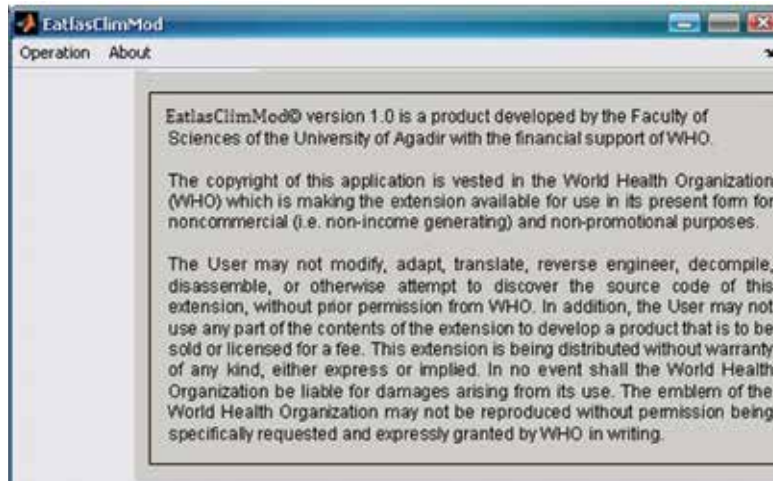


Figura 55. Pantalla de inicio de la aplicación “Gumbel Modeling”

5.3.3.1 Creación del archivo para cada estación

Para la aplicación del método de frecuencia Gumbel se requiere la creación de archivos que contengan el máximo diario anual de la velocidad media del viento para las estaciones meteorológicas determinadas, esto se obtiene a través del proceso presentado en la sección 5.3.2.

Esta operación se lleva a cabo en la aplicación EatlasClimMod 1.0 mediante los pasos siguientes:

1. Haga clic en Operation>Unique stations files. Esto conduce a la ventana presentada en la **Figura 57**.

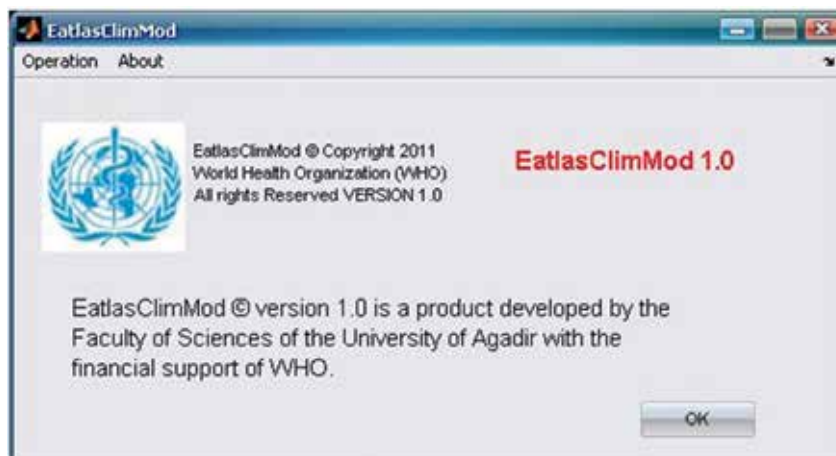


Figura 56. GumbelMod© Pantalla “Acerca de”

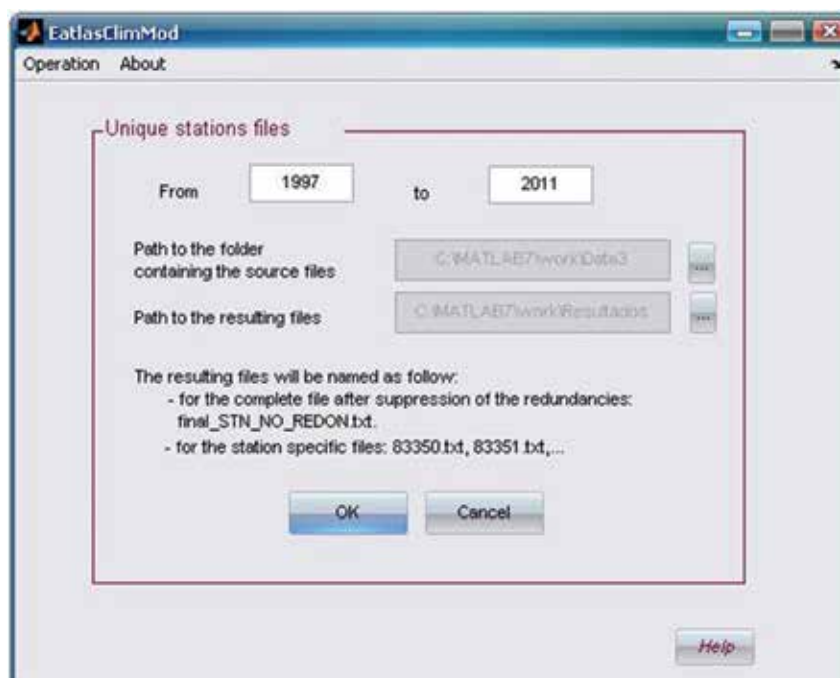



Figura 57. Ventana para la creación de los archivos para cada estación

En este cuadro de dialogo, el usuario debe de especificar:

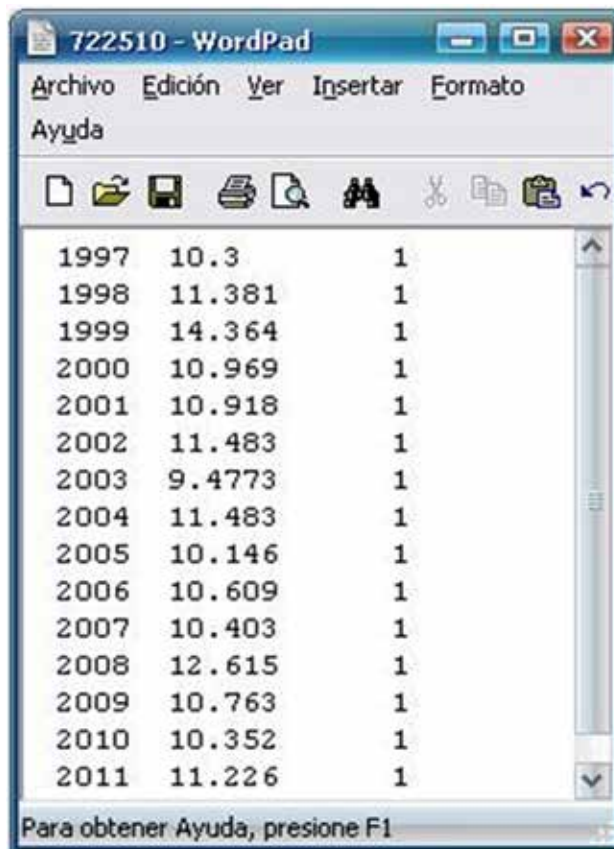
- a) El periodo de los años consecutivos,
- b) La ubicación de los archivos resultantes (5.3.2. Preparación de los datos meteorológicos”, contenidos en la carpeta “data”) y
- c) Indica la ruta de la carpeta en la que desea que los resultados se guardan.

Para b. y c. la ruta se puede cambiar haciendo clic en el botón Examinar 

2. Una vez introducidos los parámetros en esta ventana, haga clic en **Ok** para iniciar el proceso. Esto ejecutará de forma automática las funciones: `save_list_STNs ()` y `save_one_STN ()`.

Los archivos resultantes serán nombrados de la siguiente manera:

- **final_STN_NO_REDON.txt** archivo que contiene todos los datos de origen según la estación meteorológica, el año y todos los datos redundantes eliminados.
- **station_number.txt** (por ejemplo, 722510.txt) para cada archivo de una estación meteorológica específica (véase la **Figura 58** para un ejemplo de archivo de este tipo).



Año	Velocidad máxima anual del viento	Frecuencia anual
1997	10.3	1
1998	11.381	1
1999	14.364	1
2000	10.969	1
2001	10.918	1
2002	11.483	1
2003	9.4773	1
2004	11.483	1
2005	10.146	1
2006	10.609	1
2007	10.403	1
2008	12.615	1
2009	10.763	1
2010	10.352	1
2011	11.226	1

Figura 58. Creación del archivo para cada estación (766620.txt) (En la Columna 1: Periodo estudiado, Columna 2: Velocidad máxima anual del viento, Columna 3: Frecuencia anual)

5.3.3.2 Aplicación del análisis de frecuencias Gumbel

La técnica de análisis de frecuencia Gumbel esta ha sido programada en una aplicación que se incluye en la EatlasClimMod 1.0 con el fin de predecir la máxima media diaria de la velocidad del viento para cualquier estación meteorológica y período de retorno.

El uso de esta aplicación requiere la introducción de dos umbrales que se utilizan como filtros para eliminar del cálculo a cualquier estación meteorológica con datos erróneos:

Si bien el usuario puede especificar los umbrales manualmente en el EatlasClimMod 1.0, en el contexto de la e-atlas se ha fijado de la siguiente manera, es decir, una estación meteorológica no se tendría en cuenta si:

- El conjunto de datos para esa estación dada no contiene una observación diaria durante por lo menos 70% de los días en el año (255 días),
- El número de años de observación para dicha estación, después de aplicar el filtro primero, es inferior a 8 años.

El umbral de ocho años le dará una buena predicción de la cantidad máxima anual media diaria de la velocidad del viento para periodos de retorno que no superan los ocho años. En este trabajo, sin

embargo, se ha calculado también el máximo anual diario de la velocidad media del viento para un periodo de retorno de 10 años, aunque este resultado debe ser tomado con precaución.

En EatlasClimMod 1.0, el análisis de frecuencias Gumbel se aplica siguiendo los siguientes pasos:

- Aplicación del análisis de frecuencias Gumbel en todas las estaciones.
- Corrección y / o el ajuste de la base de datos original para las observaciones inusuales (errores de escritura, valores atípicos, ...).

Los pasos a seguir se describen en las siguientes secciones.

5.3.3.2.1 Aplicación del análisis de frecuencias Gumbel en todas las estaciones meteorológicas

Seguir los siguientes pasos para aplicar el análisis de frecuencias Gumbel en todas las estaciones meteorológicas al mismo tiempo:

1. En EatlasClimMod 1.0, haga clic en Modo de **Operation>Gumbel analysis**;
2. Seleccione la opción **All stations** Esto abrirá la ventana presentada en la **Figura 59**.

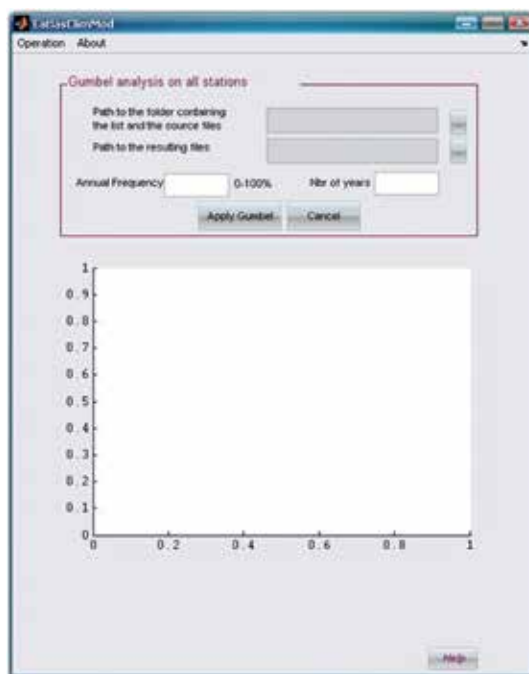




Figura 59. Ventana de interfaz de la aplicación del método de Gumbel a todas las estaciones

En este cuadro de diálogo, el usuario debe especificar:

- a) La ruta de la carpeta que contiene los archivos de la estación meteorológica específicas (véase la sección 5.3.3.1),
- b) La ruta de la carpeta donde los archivos resultantes se guardarán.
- c) Los dos umbrales descritos en la sección 5.3.3.2 (frecuencia anual y el número mínimo de años de observaciones).

Para el inciso a. y b. se podrá cambiar la ruta de la carpeta haciendo clic en el botón Examinar 

3. Una vez que han sido introducidos todos los parámetros, haga clic en el botón  para iniciar el proceso, este ejecutará automáticamente la aplicación `Apply_Gumbel_allSTN ()` que a su vez llama las siguientes cuatro funciones:

- a) **fix_threshold ()**: se utiliza para eliminar las líneas en el conjunto de datos para que la frecuencia anual sea menor que el umbral fijo;
- b) **Gumbel ()**: produce las tablas que contienen los valores de los parámetros que intervienen en el método de frecuencia de Gumbel (variable de frecuencia Gumbel reducida, frecuencia empírica, media y desviación estándar).
- c) **fet_rank ()**: se utiliza para clasificar al máximo anual diario la velocidad media del viento (el rango será el mismo en el caso de valores similares para los distintos años).
- d) **Index_return ()**: calcula el máximo anual diario de la velocidad media del viento para periodos de retorno de dos, cinco, ocho y diez.

En la ventana, la gráfica para cada estación aparece una tras otra una vez que se ha completado el análisis. El paso de la gráfica de una estación a otra se realiza automáticamente. La **Figura 60** muestra un ejemplo de ventana tal. Al final del procedimiento, la aplicación EatlasClimMod 1.0 habrá producido una gráfica, trazando la media diaria máxima velocidad del viento de la variable aleatoria Gumbel reducida, para cada uno de una de las estaciones y esta grafica se almacenara como un archivo de imagen, llamada numSTN.jpg (con numSTN = el número de estación, por ejemplo 722519.jpg, 722620.jpg, 722730.jpg), en la carpeta seleccionada previamente. La **Figura 61** presenta un ejemplo de dichas graficas.

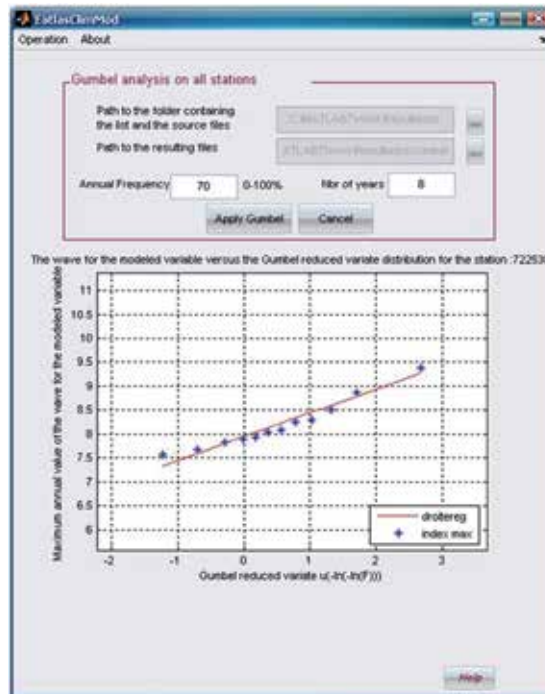


Figura 60. Ejemplo de la ventana que aparece cada que se completa el análisis Gumbel de cada estación meteorológica

Además de estos gráficos, la aplicación también genera un archivo de resumen **WaveModelledVariable_allSTN_return_2-5-8-10_Fq-0.7_NbrY-8.txt** para cada zona de estudio y lo coloca en la misma carpeta. Este archivo contiene, para cada estación, el máximo anual diario de la velocidad media del viento durante periodos de dos, cinco, ocho y diez años de retorno, así como el valor de la correlación entre el máximo anual diario velocidad media del viento y la variable de Gumbel reducida (ver **Figura 61**). La **Figura 62** se presenta un ejemplo de un archivo generado.

Sobre el archivo resumen y las graficas resultantes, el usuario puede identificar los posibles errores el conjunto de datos originales, valores atípicos potenciales (puntos lejos de la línea de regresión en el

gráfico) y/o por ejemplo el valor de correlación inferior a 0.80. En estos casos, el usuario selecciona el número de las estaciones en cuestión y sigue los pasos presentados en la sección 5.3.3.2.2.

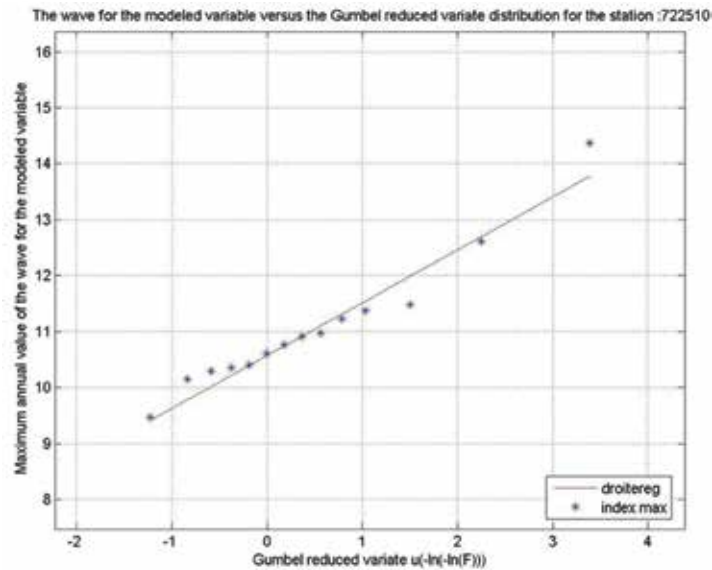


Figura 61. El máximo anual diario velocidad media del viento de variable de la distribución Gumbel reducida para la estación meteorológica 722510 con el umbral de frecuencia anual de 70% y el período de 8 años de retorno

690150	11.418	12.889	13.555	13.863	0.9564
722500	10.511	11.429	11.845	12.037	0.98306
722510	10.919	11.991	12.476	12.7	0.96944
722520	9.5951	10.7	11.2	11.431	0.92582
722530	8.1258	8.6851	8.9385	9.0554	0.98087
722610	8.7412	9.5395	9.9011	10.068	0.97583
722640	10.073	10.944	11.338	11.52	0.95292
722650	10.466	11.45	11.895	12.101	0.96554
722680	9.5689	10.257	10.568	10.712	0.96499
722700	11.11	12.301	12.84	13.089	0.93862
722710	9.7018	10.779	11.267	11.492	0.9891
722730	10.685	11.768	12.259	12.485	0.9306
722740	8.4899	9.4105	9.8276	10.02	0.91574
722780	6.9611	7.6694	7.9903	8.1384	0.94602
722860	7.1681	8.2471	8.7359	8.9615	0.90668
722880	7.3883	8.4349	8.909	9.1278	0.98164
722900	6.7736	7.2281	7.4341	7.5291	0.95243
722910	14.816	15.598	15.952	16.115	0.90847
722950	7.9513	8.6342	8.9437	9.0864	0.93578
722970	6.4066	7.466	7.9459	8.1674	0.99428
723700	10.281	10.969	11.281	11.425	0.92753
723810	10.563	11.759	12.3	12.55	0.97147
723820	10.672	11.612	12.037	12.234	0.92457
723910	9.8125	10.595	10.949	11.113	0.9609
747240	8.0947	8.686	8.9538	9.0775	0.98394
747320	9.2653	10.052	10.408	10.572	0.93121

Figura 62. Ejemplo de archivo del resumen resultante de la aplicación del análisis de Gumbel para todas las estaciones

5.3.3.2.2 Corrección y / o ajuste de la base de datos original para las observaciones inusuales

La aplicación del análisis de frecuencias Gumbel en todas las estaciones meteorológicas podría revelar algunos errores de entrada de datos y / o valores extremos (véase la sección 5.3.3.2.2). Cuando se identifican tales casos hay que corregir los datos originales, con el fin de mejorar la correlación en el análisis y por lo tanto reducir el error en los valores finales para el máximo anual diario la velocidad media del viento de dichas estaciones.

El siguiente caso ilustra cómo modificar un error en la base de datos original y ejecutar de nuevo el análisis de Gumbel en esa estación meteorológica. El gráfico generado por el análisis de la estación meteorológica no. 764120 (**Figura 63**) muestra un punto aislado (círculo rojo en el gráfico). Vamos a considerar por ejemplo que esta medida particular, corresponden a un año (2001), donde los instrumentos de medida en la estación meteorológica ha sido cambiados y que este resultado en la medición de alguna de las variables climáticas es erróneo.

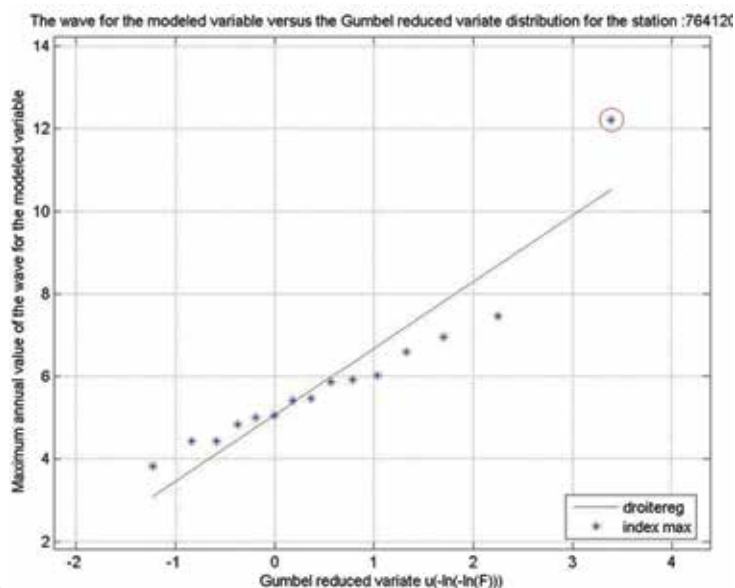





Figura 63. Gráfica resultante del análisis de frecuencias Gumbel para la estación meteorológica 764120 con el punto aislado indicado por el círculo rojo

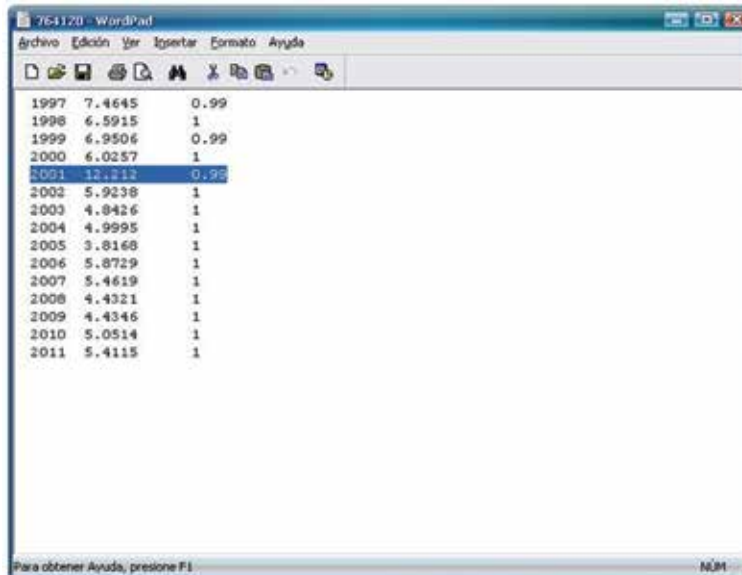
Por consiguiente sería adecuado eliminar este punto del análisis. Para ello:

1. Haga una copia del archivo para dicha estación (764120.txt), ubicado en la carpeta de "Archivos de estación", indicada en el procedimiento 5.3.3.1.
2. En WordPad, abra la versión del archivo de texto (764120.txt), en la carpeta de "Archivos de estación" (**Figura 64**).
3. Eliminar el registro (Toda la línea) correspondiente al año 2004 (12.212 m/s)
4. Guarde el archivo en la misma ubicación (no se mueva), siempre es preferible hacer una copia antes de modificar un archivo.

Una vez que el registro ha sido eliminado, es posible ejecutar de nuevo el análisis de frecuencias Gumbel pero ahora sólo para una estación meteorológica. De la siguiente manera:

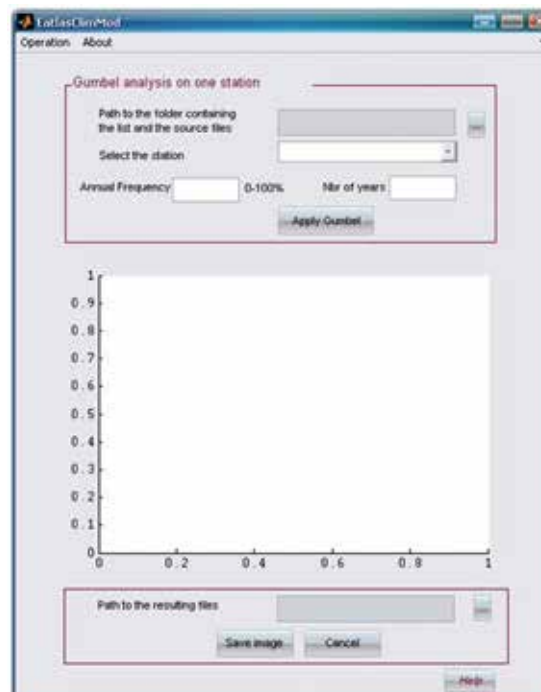
1. En EatlasClimMod 1.0, ir a **Operation>Gumbel analysis>One station** (**Figura 65**). En esta ventana, el usuario debe especificar:
 - a) La ruta de la carpeta que contiene los archivos específicos de las estaciones meteorológicas (véase la sección 5.3.3.1),
 - b) El número de la estación que debe corregirse en este caso (764120).
 - c) Los dos umbrales descritos en la sección 5.3.3.2 (frecuencia anual y el número mínimo de años de observaciones).

2. Después de completar todas las casillas, haga clic en el botón 
3. La nueva gráfica se muestra a continuación (Figura 66). Si el resultado es satisfactorio, guarde el archivo de texto y la gráfica asociada seleccionando la ruta de los archivos resultantes con el botón  y una vez validado el cambio hacer clic en el botón .



Año	Valor	Frecuencia
1997	7.4645	0.99
1998	6.5915	1
1999	6.9506	0.99
2000	6.0257	1
2001	12.212	0.99
2002	5.9238	1
2003	4.8426	1
2004	4.9995	1
2005	3.8168	1
2006	5.8729	1
2007	5.4619	1
2008	4.4321	1
2009	4.4346	1
2010	5.0514	1
2011	5.4115	1

Figura 64. Estación meteorológica No. 764120 en este archivo se destaca el registro en azul correspondiente al año 2001



EnLiasCarreMod
Operation About

Gumbel analysis on one station

Path to the folder containing the list and the source files:

Select the station:

Annual Frequency: 0-100% Nr of years:

Apply Gumbel

Path to the resulting files:

Save image Cancel Help

Figura 65. Ventana de la interfaz de la aplicación del método de Gumbel para una sola estación

Esta operación tendrá como resultado la modificación de la versión anterior del archivo de resumen (**Figura 62**), este archivo es necesario para el resto del proceso.

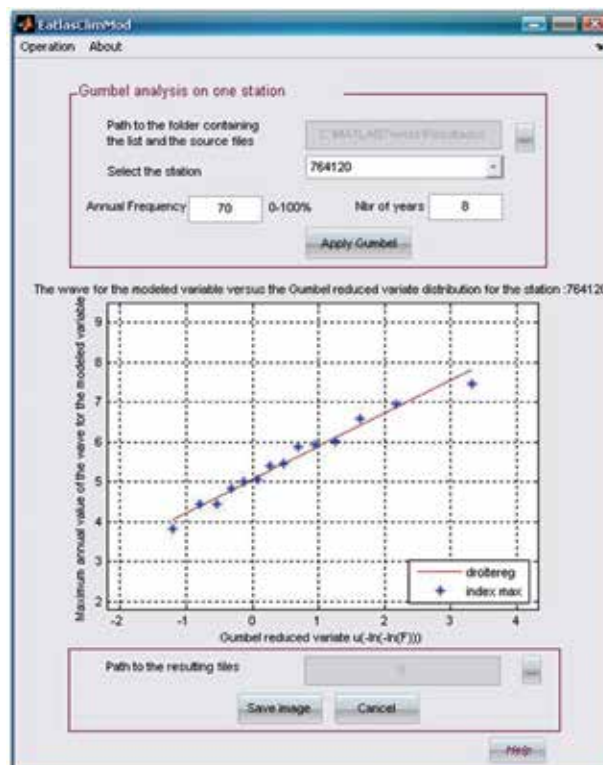


Figura 66. Interfaz resultante de la aplicación Gumbel después de realizar la corrección

5.3.4 Selección de los parámetros e identificación del modelo de regresión

Como se describió en la sección 5.2.3, el análisis de regresión por pasos se aplicó para identificar las variables que explican las variaciones de la velocidad promedio máxima diaria anual de cada periodo de retorno en la República Mexicana y, por consiguiente, para obtener el modelo de regresión que se utilizaría para la especialización.

Este proceso se ha llevado a cabo en tres pasos, que se explican en las siguientes secciones:

- Preparación de las cuadrículas de distribución de los factores causales, que no formaban parte de los datos fuente;
- Preparación del análisis de regresión por pasos;
- Aplicación del análisis de regresión por pasos.

5.3.4.1 Preparación de las cuadrículas de distribución de los factores causales

Como se menciona en la sección 5.2.3., los factores causales utilizados para explicar la variabilidad espacial de la media de velocidad de viento máxima diaria son:



- Elevación (Z)
- Pendiente porcentajes (Slp)
- Distancia a la costa mas cercana (d.Coast)
- Distancia a la costa Sur (d.Coast.S) y norte (d.Coast.N)
- Distancia a la longitud relativa (d.x.km) y latitud (d.y.km)
- Elevación media alrededor de una celda de 3 x 3 (Z9)
- Aspecto (Asp)

La distribución espacial de los 2 primeros factores causales pueden ser directa y fácilmente se deriva del conjunto de datos generados por la aplicación de los diferentes modelos (ver el documento E-Atlas para los riesgos de desastres, aplicación a México, Preparación de los Datos base). Cuando se trata de los últimos 4 factores, se aplico un proceso específico con el fin de obtener la capa de SIG adecuada para este análisis.

Antes de aplicar los pasos detallados en las siguientes secciones, cada una de las capas utilizadas en este proceso tuvo que ser proyectado en un sistema de proyección métrico. Esto se ha hecho utilizando el proceso presentado en el **Anexo 32**. Cada una de las capas usadas en el análisis de regresión, tuvo que ser cortado de acuerdo con la extensión de la zona respectiva más un buffer de 300 km con el fin de garantizar una buena interpolación. Este proceso se describe en el **Anexo 33**.

5.3.4.1.1 Trazo de distancias a partir de la línea de costa y determinación de la latitud y longitud relativas para cada zona climática

La distancia de la línea de costa para se calculó de la siguiente manera:

1. Verificar que la extensión XTools esté cargada en ArcView;
2. Abrir el archivo **shape borde_mex_e.shp** en la vista;
3. Utilizar la función Xtools>Convert polygon to polyline, y seleccionar **shape borde_mex_e.shp** como el tema que habrá de convertirse en polilíneas;
4. Guardar la capa resultante como **mx_int_bord_line.shp**;
5. Editar el archivo shape **mx_int_bord_line.shp** e identificar la ubicación donde la frontera internacional cambia de una línea de costa a una frontera tierra adentro;
6. Desplegar las “ArcView’s drawing tools” (representadas por el ícono ) y seleccionar la herramienta “draw line to split feature ”;
7. Con esa herramienta, dibujar una línea donde desea dividir la frontera internacional entre la línea de costa y los límites tierra adentro. Enseguida hacer clic en el segmento de línea no considerada como línea costera, así como en la línea divisoria, y elimínelos;
8. Repetir esta operación hasta que sólo tenga segmentos de línea costera en el archivo shape;
9. Guardar el resultado como **dx_coast.shp**;
10. Navegar hasta Analysis>Find Distance para crear una cuadrícula de distancias hasta las costas en kilómetros;

En el siguiente menú, seleccionar Output Grid Specification;

- Disponer Output Grid Extent como Same As **mx_int_bord_line.shp**;
- Disponer Output Grid Cell Size como **As Specified Below**;
- Disponer Cell Size= 1 km;
- Utilizar el número de filas y columnas predeterminado;
- Guardar el resultado como **d_coast**.

Para la distancia de la costa sur y norte,

- Abrir el archivo coast.shp;
- Activar el archivo coast.shp e ir al menú theme y hacer clic en convert to shapefile para guardar el archivo como dist_coast_s;
- Ir al menú Theme y hacer clic en Start Editing y seleccionar la línea del Golfo de México, una vez seleccionada borrarla con suprimir;
- Ir al menú Theme y hacer clic en la opción Stop Editing y hacer clic en guardar los cambios;
- Repetir el mismo procedimiento para la costa norte, en este caso borrar la línea del Pacífico y guardar el archivo como d.Coast.n;
- Usar el proceso descrito en el paso 10 para generar la distancia a la costa sur y norte, después almacenar los archivos como d.Coast.N y d.Coast.S.

5.3.4.1.2 Preparación de la capa de distancia relativa a la Latitud/Longitud

Las dos capas que deben crearse se relacionan con la latitud y longitud. En el caso particular de la latitud relativa, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

1. Crear un archivo shape de línea que corresponderá a la latitud más baja observada en la primera zona climática reportada en el archivo shape **borde_mex_e.shp**, de la siguiente manera:
 - a) Agregar el archivo **borde_mex_e.shp** a la vista;
 - b) Crear un nuevo tema de línea utilizando View>New Theme;
 - c) Trazar manualmente una línea recta horizontal, pasando por la extensión sur de la primera zona climática;
 - d) Guardar el trabajo de edición como **d.Y.shp**.
2. Seguir el proceso descrito en el paso 10 (sección 5.3.4.1.1.) para generar la distancia de la línea costera, a fin de crear un GRID que contenga la distancia desde la línea almacenada en el archivo **shape d.Y.shp** y guardar la capa resultante como **d.Y.km**.

El proceso empleado para crear una capa que contenga la longitud relativa (distancias del límite occidental) es idéntico al proceso descrito para el trazo de la latitud relativa, en esta ocasión una línea vertical en el límite occidental de cada zona. El resultado se guarda como **d.X.km**

5.3.4.1.3 Creación de la capa de distribución de la elevación promedio

El GRID de distribución de la elevación promedio se derivó del MDE, siguiendo los pasos que a continuación se enuncian:

1. Verificar que la extensión Grid Analyst esté cargada en ArcView.
2. Agregar el GRID **dem_mx_new_e *** en la vista y activarla.
3. Utilizar la función Analysis >Neighborhood Statistics, especificando lo siguiente en la ventana que aparece:
 - a) Bajo “Mean”, elija “statistic”.
 - b) Bajo “neighborhood”, elija “Rectangle” como el tipo de alrededores para el análisis.
 - c) Seleccione el indicador de “cell” y establezca “Width” y “Height” en las tres células.
 - d) Guardar la cuadrícula resultante como **emro_Z9**.

5.3.4.1.4 Preparación de las capas de Aspecto

La capa de aspecto, o dirección de la pendiente, se ha incluido en el análisis de regresión bajo la forma de una variable ficticia. Esto se hace para no tener en cuenta orientaciones generales (N, NE, E, SE, etc.) y no tener variaciones pequeñas en la dirección de la pendiente.

Para el uso de la capa de distribución de aspecto como una variable ficticia en el análisis de regresión, se han creado ocho GRIDs llamados Asp.X (donde X es N, NE, E, SE, S, SW, W y NW) se han obtenido de acuerdo con la siguiente clasificación:

0-22.5° y 337.5-360°	Norte
22.5-67.5°	Norte Este
67.5-112.5°	Oriente
112.5-157.5°	Sur Este
157.5-202.5°	Sur
202.5-247.5°	Sur Oeste
247.5-292.5°	Oeste
292.5-337.5°	Norte Oeste

Por ejemplo, en los pixeles de Asp.N que están dirigidas hacia el Norte se les da un valor de 1, mientras que los otros pixeles se les da el valor 0. El procedimiento utilizado para crear estos GRIDs se describe e los pasos siguientes.

1. Abrir el archivo asp_mx_new en arcview 3.x.
2. Seleccione el archivo asp_mx_new y de un clic en el menú *Analysis\Reclassify...*
3. De un clic en el botón *Classify...* y seleccione 3 en la opción *Number of Classes* y de un clic en OK.
4. Seleccione el rango a ser eliminado en las clasificaciones 1 y 3 y la clasificación que deseamos crear en 2.

Ejemplo:

Aspecto Norte	
Valores anteriores	Nuevos valores
-1 a 0	1
0 a 22.5	2
22.5 a 360	3

5. Sustituya los valores 1 y 3 por No data y la opción 2 por uno, para convertir todos los valores de esa clasificación en 1 y de un clic en OK.

Ejemplo:

Aspecto Norte	
Valores anteriores	Nuevos valores
-1 a 0	NoData
0 a 22.5	1
22.5 a 360	NoData

6. Verifique que la extensión Grid Utilities V. 1.1. este activa.
7. Seleccione el nuevo raster reclasificado y de un clic en la opción *Set Null Data As...* del menú *GRID*, clic en OK, Cambie el nombre a Asp_x y OK.
8. Por ultimo seleccione el raster Asp_x y seleccione la opción *Convert to grid...* del menú *Theme* y guarde el archivo como asp_x.
9. Repita los pasos para cada una de las clasificaciones del Aspecto.

Los GRIDs resultantes fueron proyectado mediante los pasos presentados en el **Anexo 32** y posteriormente cortado agregándole un buffer de 300 kms siguiendo el proceso que se reporta en el **Anexo 33**.

5.3.4.2 Preparación del análisis de regresión por pasos

Antes de llevar a cabo el análisis de regresión, fue necesario preparar una tabla que incluyó la velocidad promedio máxima diaria anual del viento para cada estación y periodo de retorno, así como las variables obtenidas en cada cuadrícula preparada en la sección 3.4.1. El procedimiento empleado para crear esta tabla se define en los siguientes pasos:

1. Verificar que la extensión Grid Analyst esté cargada en ArcView;
2. En una vista, agregar los siete GRIDs de distribución de factores causales (**mx-dem, mx-Z9, mx_slope, mx_aspect, mx_aspn_km, mx_asps_km, mx_aspsw_km, mx_aspe_km, aspw_km, mx_aspse_km, mx_aspne_km, mx_aspnw_km, mx_hf_km, dist_coast, dist_north_e, dist_soth_e, dist_X, dist_Y**), así como el archivo shape que contiene la distribución de las estaciones meteorológicas a las cuales se han asociado las velocidades del viento promedio máximas diarias anuales para los tres periodos de retorno, en la primera zona (**mx_wdsp.shp**);

3. Convertir al archivo shape **mx_wdsp.shp** en el tema activo y utilizar los valores Grid Analyst>Extract Y y Z como tema puntual para la función del GRID y seleccionar los primeros GRIDs incluidos en el paso 2 de la lista desplegada. La función agregará tres nuevos campos en la tabla de atributos del archivo **mx_wdsp.shp** (Xval, Yval y Zval), el último almacenará el valor que se extrajo de la capa del GRID.
4. Abrir la tabla de atributos del archivo shape **mx_wdsp.shp** y hacer clic en el encabezado de la columna “Zval”.
5. Volver a nombrar este campo a fin de que corresponda con el nombre de la capa raster (p.e. **Z** para elevación, **Z9** para la elevación promedio, **SLP** para pendiente, **ASP** para aspecto, **asp_n**, **asp_s**, **asp_w**, **asp_se**, **asp_ne**, **asp_nw** para las diferentes clasificación de aspecto, **d_Coast** para la distancia de la línea costera, **d_Coast_S** para la distancia de la línea costera sur (Pacífico), **d-Coast_N** para la distancia de la línea costera norte (Golfo de México), **d_X** para la distancia de la longitud relativa, **d_Y** para la distancia de la latitud relativa), HF para la frecuencia de huracanes, empleando la función C-Tables Tools>rename/resize/Copy Field(s).
6. Repetir los pasos 3 a 5 en los otros GRIDs de distribución de factores causales, hasta que el Zval de cada una de ellas quede integrado en la tabla de atributos del archivo shape **mx_wdsp.shp**;
7. Guardar la tabla resultante como **mx_wdsp_regresión.dbf**.

5.3.4.3 Aplicación del análisis de regresión por pasos

Una vez que está lista la tabla de regresión por pasos, es posible llevar a cabo el análisis de regresión por pasos en cada zona climática y periodo de retorno. Este procedimiento se llevó a cabo utilizando el *software* S-Plus 6.0, como sigue:

1. Abrir el *software* S-Plus.
2. Seleccionar la función File>Import Data>From File, para importar la tabla de regresión por pasos creada anteriormente para la primera zona climática (**mx_wdsp_regresión.dbf**).
3. Seleccionar la función Statistics>Regression>Stepwise;
4. En la ventana de diálogo “Stepwise linear Regression” que aparece:
 - a) En Data set, desplegar la lista y hacer clic en mx_wdsp_regresión.dbf;
 - b) Hacer clic en el recuadro Create formula e insertar la siguiente fórmula:

$$\text{VIENTO2} \sim Z + Z^2 + Z^3 + Z9 + Z9^2 + Z9^3 + \text{SLP} + \text{SLP}^2 + \text{SLP}^3 + \text{Aspect} + \text{Aspect}^2 + \text{Aspect}^3 + \text{asp.n} + \text{asp.ne} + \text{asp.e} + \text{asp.se} + \text{asp.s} + \text{asp.sw} + \text{asp.w} + \text{asp.nw} + \text{D.X.KM} + \text{D.X.KM}^2 + \text{D.X.KM}^3 + \text{D.Y.KM} + \text{D.Y.KM}^2 + \text{D.Y.KM}^3 + \text{D.COAST.N} + \text{D.COAST.N}^2 + \text{D.COAST.N}^3 + \text{D.COAST.S} + \text{D.COAST.S}^2 + \text{D.COAST.S}^3 + \text{D.COAST} + \text{D.COAST}^2 + \text{D.COAST}^3 - 1$$

donde:

- a. VMAX2M= velocidad del viento promedio máxima diaria anual para un periodo de
- b. retorno de dos años.
- c. Z= elevación
- d. Z9= elevación promedio
- e. SLP= pendiente
- f. Aspect= Aspecto
- g. ASP_N
- h. ASP_S
- i. ASP_W
- j. ASP_E
- k. ASP_SE
- l. ASP_SW
- m. ASP_NE
- n. ASP_NW
- o. d.Coast= distancia de la línea costera

- p. d.Coast.S= distancia de la línea costera sur (Pacífico)
 q. d.Coast.N= distancia de la línea costera sur (Golfo de México)
 r. d.X.km= distancia de la longitud relativa
 s. d.Y.km= distancia de la latitud relativa

c) Hacer clic en OK.

Se crea un informe que muestra el resultado de este procedimiento de selección con el coeficiente de las variables seleccionadas y su significancia, el error estándar residual, la *R*-cuadrada múltiple y la probabilidad (estadístico *F*). En la **Tabla 29** se muestra, como ejemplo, el informe resultante para un periodo de retorno de dos años. La ecuación de regresión que explica la velocidad del viento máxima para este periodo de retorno en particular (dos años), puede leerse como sigue:

$$\begin{aligned} \text{VIENTOS5} \sim & - ((\text{"Z"} * \text{"Z"}) * 0.000070888543) + ((\text{"Z"} * \text{"Z"} * \text{"Z"}) * 0.000000029956) + ((\text{"Z9"} \\ & * \text{"Z9"} * 0.000069238209) - ((\text{"Z9"} * \text{"Z9"} * \text{"Z9"}) * 0.000000029060) - ((\text{"SLP"} * \text{"SLP"}) * \\ & 0.759283964518) + ((\text{"SLP"} * \text{"SLP"} * \text{"SLP"}) * 0.204897304988) - (\text{"Aspect"} * \\ & 0.004370864967) + (\text{"asp.se"} * 2.250874393741) - (\text{"asp.w"} * 2.391203290492) + (\text{"D.X.KM"} * \\ & 0.007645109712) - ((\text{"D.X.KM"} * \text{"D.X.KM"}) * 0.000001206405) - (\text{"D.COAST.N"} * \\ & 0.010600619415) + ((\text{"D.COAST.N"} * \text{"D.COAST.N"}) * 0.000014025125) - ((\text{"D.COAST.N"} * \\ & \text{"D.COAST.N"} * \text{"D.COAST.N"}) * 0.000000003307) - ((\text{"D.COAST.S"} * \text{"D.COAST.S"}) * \\ & 0.000020572696) + (\text{"D.COAST.S"} * \text{"D.COAST.S"} * \text{"D.COAST.S"}) * 0.000000019160) + \\ & ((\text{"D.COAST"} * \text{"D.COAST"}) * 0.000048888082) - ((\text{"D.COAST"} * \text{"D.COAST"} * \\ & \text{"D.COAST"}) * 0.000000049889) \end{aligned}$$

5. Repetir los pasos 3 y 4 para los otros periodos de retorno.

5.3.5. Espacialización de la velocidad del viento promedio máxima diaria anual

El mapa de distribución de la velocidad del viento promedio máxima diaria anual para cada periodo de retorno y zona, se crea aplicando las regresiones que se encontraron en la sección 5.3.4 en los GRIDS correspondientes, como sigue:

1. Verificar que las siete capas de distribución de los factores causales estén cargados en la vista;

Tabla 29. Resultados del análisis de regresión para la velocidad del viento máxima diaria, para un periodo de retorno de cinco años.

Variables:

	Valor	Error estándar	Valor de t	Probabilidad (> t)
I(Z ²)	-0.000070888543000	0.000034638884000	-2.046501943159000	0.044633594063000
I(Z ³)	0.000000029956000	0.000000011729000	2.553917129276000	0.012932633798000
I(Z9 ²)	0.000069238209000	0.000034351235000	2.015595917838000	0.047855894000000
I(Z9 ³)	-0.000000029060000	0.000000011487000	-2.529779567178000	0.013771467009000
I(SLP ²)	-0.759283964518000	0.276534290036000	-2.745713612657000	0.007745000728000
I(SLP ³)	0.204897304988000	0.062405626097000	3.283314627288000	0.001632626025000
Aspect	-0.004370864967000	0.002510854141000	-1.740788083322000	0.086311355147000
asp.se	2.250874393741000	0.778796380039000	2.890196271364000	0.005183837391000
asp.w	-2.391203290492000	1.136785785992000	-2.103477471268000	0.039181894171000
D.X.KM	0.007645109712000	0.001538374620000	4.969602080729000	0.000004909812000

I(D.X.KM^2)	-0.000001206405000	0.000000437114000	-2.759934819524000	0.007449167666000
D.COAST.N	-0.010600619415000	0.004240216458000	-2.500018459199000	0.014873192579000
I(D.COAST.N^2)	0.000014025125000	0.000004039806000	3.471732349167000	0.000910033191000
I(D.COAST.N^3)	-0.000000003307000	0.000000001023000	-3.231500102234000	0.001910817743000
I(D.COAST.S^2)	-0.000020572696000	0.000006984936000	-2.945294881588000	0.004432977373000
I(D.COAST.S^3)	0.000000019160000	0.000000006120000	3.130541132237000	0.002585145495000
I(D.COAST^2)	0.000048888082000	0.000015746377000	3.104719403952000	0.002790315366000
I(D.COAST^3)	-0.000000049889000	0.000000018016000	-2.769201945846000	0.007262004758000
Residual standard error: 2.26603305761 on 67 degrees of freedom				
Multiple R-Squared: 0.957709216247				
F-statistic: 84.2927515365 on 18 and 67 degrees of freedom, the p-value is 0				

2. Seleccionar la función Analysis>Map Calculador e ingresar la siguiente fórmula en la ventana de la calculadora:

$$\begin{aligned}
 & - (("Z" * "Z") * 0.000070888543) + (("Z" * "Z" * "Z") * 0.000000029956) + (("Z9" * "Z9" * \\
 & 0.000069238209) - (("Z9" * "Z9" * "Z9") * 0.000000029060) - (("SLP" * "SLP") * \\
 & 0.759283964518) + (("SLP" * "SLP" * "SLP") * 0.204897304988) - ("Aspect" * \\
 & 0.004370864967) + ("asp_se" * 2.250874393741) - ("asp_w" * 2.391203290492) + \\
 & ("D_X_KM" * 0.007645109712) - (("D_X_KM" * "D_X_KM") * 0.000001206405) - \\
 & ("D_COAST_N" * 0.010600619415) + (("D_COAST_N" * "D_COAST_N") * \\
 & 0.000014025125) - (("D_COAST_N" * "D_COAST_N" * "D_COAST_N") * \\
 & 0.000000003307) - (("D_COAST_S" * "D_COAST_S") * 0.000020572696) + \\
 & ("D_COAST_S" * "D_COAST_S" * "D_COAST_S") * 0.000000019160) + (("D_COAST" \\
 & * "D_COAST") * 0.000048888082) - (("D_COAST" * "D_COAST" * "D_COAST") * \\
 & 0.000000049889)
 \end{aligned}$$


3. Guardar la cuadrícula resultante como **mx.wdsp.5**. Esto corresponde a la distribución espacial de la velocidad del viento máxima diaria anual y para un periodo de retorno de dos años;
4. Repetir los pasos 2 y 3 para los demás periodos de retorno, utilizando las regresiones correspondientes. los metadatos asociados pueden consultarse en el **Anexo 34**.

5.3.6 Creación de los mapas de distribución del nivel de intensidad del peligro por la velocidad del viento

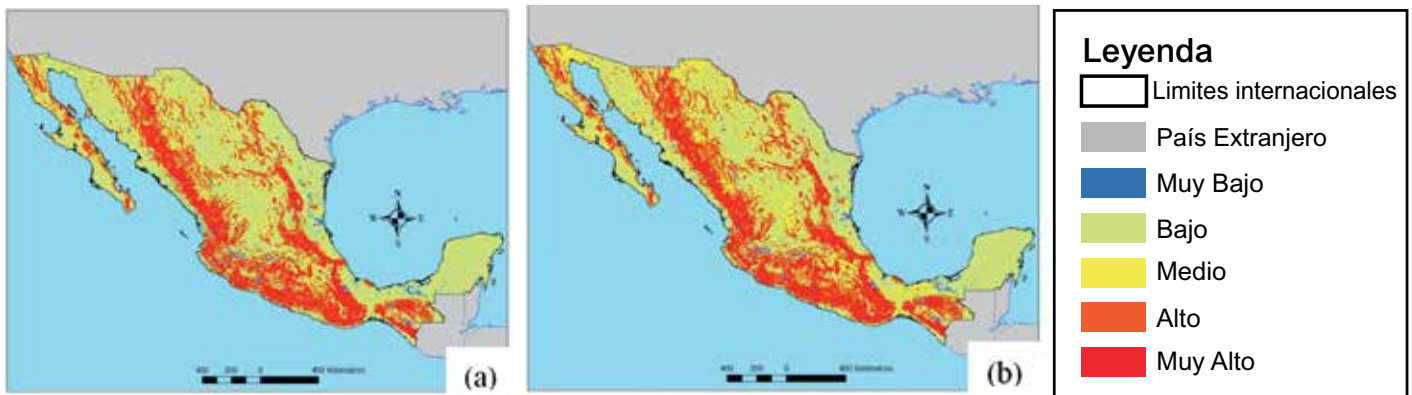
El último paso del método consiste en reclasificar los mapas de distribución de la velocidad del viento promedio máxima diaria anual, para que correspondan a los cinco niveles de intensidad seleccionados para este proyecto, mediante el siguiente proceso:

1. Cargar las cuadrículas de distribución de la velocidad del viento promedio máxima diaria anual en la vista;
2. Convertir **mx.wdsp.5** en el tema activo;
3. Utilizar la función Analysis>Reclassify para reclasificar la cuadrícula de acuerdo con la siguiente clasificación:

Rango de la velocidad del viento (m/s)	Nivel de intensidad
<3	1
3.3-10.7	2
10.7-17.1	3
17.1-24.4	4
>24.4	5

4. Guardar la cuadrícula resultante como **mx.wdsp.2.cl**;
5. Seleccionar Theme>Edit Legend; en la ventana Legend Editor y cambiar la leyenda a:
 - a) Muy bajo;
 - b) Bajo;
 - c) Mediano;
 - d) Alto;
 - e) Muy alto.
6. Proyectar la cuadrícula **mx.wdsp.5.cl** de la cilíndrica a la geográfica, siguiendo el proceso que a continuación se describe:
 - a) Hacer clic en el botón  o seleccionar la función Grid Projector>Grid y Theme Projector;
 - b) Seleccionar la cuadrícula **mx.wdsp.5.cl** de la lista para proyectarla;
 - c) En la ventana Grid Projector especificar los parámetros de la proyección actual:
 - Category = Projection of the world;
 - Type = Equal-Area.Cylindrical;
 - Current Projection Units = kilometres;
 - d) Especificar los parámetros de la nueva proyección:
 - Category = Projection of the world;
 - Type = Geographic;
 - New Projection Units = decimal negrees;
 - e) En la siguiente ventana, especificar el nuevo tamaño de la celda como “0.008333”;
 - f) Seleccionar “Bilinear Interpolation” como “Interpolation method” y especificar valor “4” como “Transformation Order”;
 - g) Guardar la cuadrícula resultante como **mx.vientomax5**;
7. Repetir los pasos 1 hasta 5 para el resto de los periodos de retorno y guardar los resultado como **mx.vientomax2**, **mx.vientomax8** y **mx.vientomax10**, respectivamente.

El resultado obtenido a través de la implementación de todos los procesos presentados en este documento, se muestra en la **Figura 67** y los metadatos asociados pueden consultarse en el **Anexo 35**.



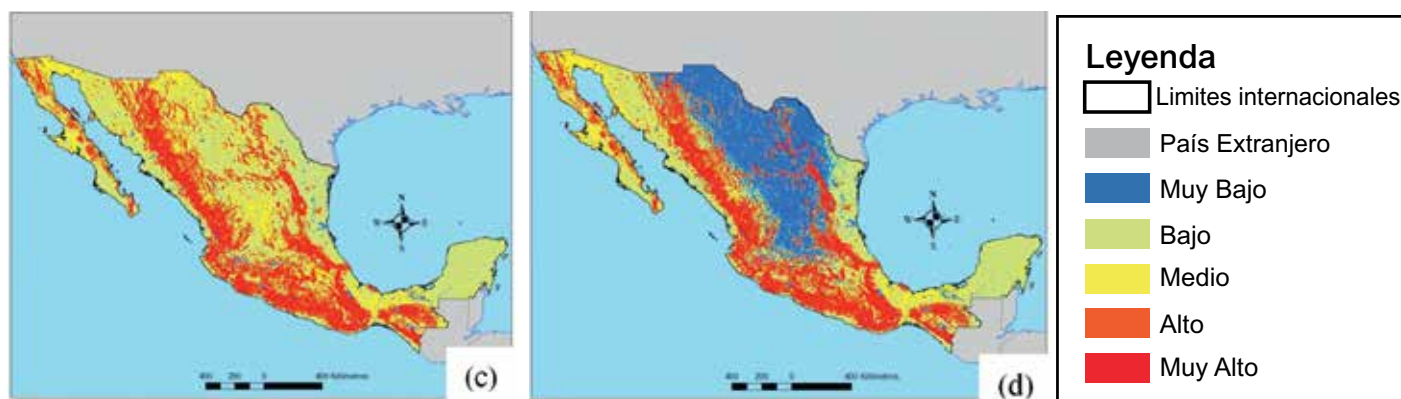


Figura 67. Distribución espacial de los niveles de intensidad del peligro por la velocidad del viento en la República Mexicana para los periodos de retorno de dos (a), cinco (b), ocho (c) y diez años (d)

5.4 Referencias y lecturas adicionales

1. El Morjani Z., Ebener S., J. Boos, Abdel Ghaffar E., Musani A. (2007). "Reducing the health impact of some disasters: modeling the spatial distribution of 5 natural hazards in the context of the WHO/EMRO Atlas of Disaster Risk2", *International Journal of Health Geographics* 2007, 6:8.
2. Agnew MD and Palutikof JP, 2000. GIS-based construction of baseline climatologies for the Mediterranean using terrain variables. *Climate research*, 14:115–127.
3. Ashraf M, Loftis JC and Hubbard KG, 1997. Application of geostatistics to evaluate partial weather station networks. *Agricultural and forest meteorology*, 84(3–4):255–271.
4. Benzi R, Deidda R and Marrocu M, 1997. Characterization of temperatura and precipitation fields over Sardinia with principal component analysis and singular spectrum analysis. *International journal of climatology*, 17(11):1231–1262.
5. Chessa PA and Delitala AM, 1997. Objective analysis of daily extreme temperatures of Sardinia (Italy) using distance from sea as independent variable. *International journal of climatology*, 17(13):1467–1485.
6. Collins FC Jr and Bolstad PV, 1996. A comparison of spatial interpolation techniques in temperatura estimation, *Proceedings of the Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*. January 21–25, 1996, Santa Fe, New Mexico, USA.
7. Condie R and Lee KA, 1982. Flood frequency analysis with historic information. *Journal of hydrology*, 58:47–61.
8. Dodson R and Marks D, 1997. Daily air temperature interpolated at high spatial resolution over a large mountainous region. *Climate research*, 8(1):1–20.
9. Eckstein BA, 1989. Evaluation of spline and weighted average interpolation algorithms. *Computers & geosciences*, 15(1):79–94.
10. Eischeid JK, Baker FB, Karl TR and Diaz HF, 1995. The quality control of long-term climatological data using objective data analysis. *Journal of applied meteorology*, 34(12):2787–2795.
11. El Morjani Z, 2003. Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc). Doctoral thesis, University of Geneva. *Terre et environnement*, vol. 42.
12. Fuller WE, 1914. Flood flows. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*,

- 77:564–617.
14. Foster HA, 1935. Duration curves. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 99:1213–1235.
 15. Gerard R and Karpuk EW, 1979. Probability analysis of historical flood data. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 105(HY9):1153–1165.
 16. Gumbel EJ, 1941. The return period of flood flows. *American mathematical statistics*, 12(2):163–190.
 17. Gumbel EJ, 1942. Statistical control curves for flood discharges. *Transactions, American Geophysical Union*, 23:489–500.
 18. Gumbel EJ, 1954. The statistical theory of droughts. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 80:1–19.
 19. Gumbel EJ, 1960. Bivariate exponential distribution. *Journal of the American Statistical Association*, 55:698–707.
 20. Hammond T and Yarie J, 1996. Spatial prediction of climatic state factor regions in Alaska. *Ecoscience*, 3(4):490–501.
 21. Hargy VT, 1997. Objectively mapping accumulated temperature for Ireland. *International journal of climatology*, 17(9):909–927.
 22. Holdaway MR, 1996. Spatial modelling and interpolation of monthly temperature using kriging. *Climate research*, 6:215–225.
 23. Hudson G and Wackernagel H, 1994. Mapping temperature using kriging with external drift: theory and an example from Scotland. *International journal of climatology*, 14:77–91.
 24. Hulme M, Conway D, Jones PD, Jiang T, Barrow EM and Turney C, 1995. Construction of a 1961–1990 European climatology for climate change modelling and impact applications. *International journal of climatology*, 15:1333–1363.
 25. Hutchinson MF and Gessler PE 1994. Splines—more than just a smooth interpolator. *Geoderma*, 62:45–67.
 26. Jones T, Middelmann M and Corby N, 2005. Natural hazard risk in Perth, Western Australia. Canberra, Geoscience Australia.
 27. Kite GW, 1977. Frequency and risk analyses in hydrology. Fort Collins, Colorado, Water Resources Publications.
 28. Koutsoyiannis D, 2004. On the appropriateness of the Gumbel distribution for modeling extreme rainfall In: *Hydrological risk: recent advances in peak river flow modelling, prediction and real-time forecasting. Assessment of the impacts of land-use and climate changes*:303–19. Bologna, Italy, Editoriale Bios, Castrolibero.
 29. Landwehr JM, Matalas NC and Wallis JR, 1979. Probability weighted moments compared with some traditional techniques in estimating Gumbel parameters and quantiles. *Water resources research*, 15:1055–1064.
 30. Legates DR and Willmott CJ, 1990. Mean seasonal and spatial variability in global surface air temperature. *Theoretical and applied climatology*, 41:11–21.
 31. Lennon JJ and Turner JRG, 1995. Predicting the spatial distribution of climate: temperature in Great Britain. *Journal of animal ecology*, 64:370–392.
 32. Li J, Huang JF and Wang XZ, 2006. A GIS-based approach for estimating spatial distribution of seasonal temperature in Zhejiang Province, China. *Journal of Zhejiang University science A*, 7(4):647–656.
 33. MacEachren AM and Davidson JV, 1987. Sampling and isometric mapping of continuous geographic surfaces. *American cartographer*, 14(4):299–320.
 34. Matheron G, 1963. Principles of geostatistics. *Economic geology*, 58:1246–1266.
 35. Meylan P and Musy A, 1998. *Hydrologie fréquentielle*. Edition HGA Bucarest, 413p.
 36. Moin SMA and Shaw MA, 1985. Regional flood frequency analysis for Ontario streams: volume 1, single station analysis and index method. Burlington, Ontario, Inland Waters Directorate, Environment Canada.

37. Myers RH, 1990. Classical and modern regression with applications, Boston, Massachusetts, PWS-Kent Publishing.
38. Sarma P, 1999. Flood risk zone mapping of Dikrong sub basin in Assam. In: <http://www.gisdevelopment.net/application/natural.hazards/floods/nhcy0006pf.htm>; Acceso 2 abril 2007.
39. Stedinger JR, Vogel RM and Foufoula-Georgiou E, 1992. Frequency analysis of extreme events. In: Handbook of hydrology, chapter 18, edited by D.A. Maidment, McGraw-Hill, New York.
40. Stolte W and Dumontier S, 1977. Flood frequency analysis for mountain and prairie streams. University of Saskatchewan and Alberta Environment.
41. USACE, 1993. Hydrologic frequency analysis. Engineer Manual 1110-2-1415. Washington DC, US Army Corps of Engineers.
42. Vogel RM, 1986. The probability plot correlation coefficient test for normal, lognormal, and Gumbel distributional hypothesis, Water resources research, 22(4):587–590; corrections, 23(10):2013.
43. Vogt JV, Viau AA and Paquet F, 1997. Mapping regional air temperature fields using satellite-derived surface skin temperatures. International journal of climatology, 17(14):1559–1579.
44. Willmott CJ and Matsuura K, 1995. Smart interpolation of annually averaged air temperature in the United States. Journal of applied meteorology, 34(12):2577–2586.

CAPÍTULO VI

Metodología y procesos de implementación para el peligro de sismos.

6.1 Introducción

La metodología utilizada para la distribución peligros sísmicos empleado en el e-Atlas procede de datos relativos a peligros sísmicos globales en el contexto del Global Seismic Hazard Assessment Project (GSHAP), sobre el cual se han dispuestos otras dos capas:

- La Base de Datos de Terremotos Significativos (the Significant Earthquakes Database (SED))
- El conjunto de datos del World Stress Map (WSM).

La disponibilidad de datos sobre peligros preexistentes requirió de una preparación y manipulación mínima de la información, para obtener la distribución espacial del nivel de intensidad de peligrosidad sísmica y los mapas de la distribución de peligros por sismos para México.

6.2 Requerimientos de software

La puesta en marcha del proceso descrito en este documento requiere del siguiente software, operado en una computadora que tenga los siguientes programas:

- Windows
- ArcGIS 9.x con la extensión Spatial Analyst
- Microsoft Access, o cualquier herramienta con hoja de cálculo que permita realizar las mismas operaciones

6.3 Descripción de los datos

Los tres conjuntos de datos que se han empleado, se describen en este capítulo

6.3.1 El Proyecto de Evaluación de Riesgo Sísmico Global (The Global Seismic Hazard Assessment Project) (GSHAP por sus siglas en inglés)

El Proyecto de Evaluación del Riesgo Sísmico Global (GSHAP) fue lanzado en 1992 por el Programa de la Litósfera Internacional (Lithosphere Program) (ILP) con el apoyo de las Uniones Científicas Internacionales (International Council of Scientific Unions) (ICSU) y respaldado como un programa de demostración dentro del marco del Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales, de las Naciones Unidas (United Nations International Decade for Natural Disaster Reduction (UN/IDNDR)). El Proyecto GSHAP finalizó en 1999. El conjunto de datos resultante de este proyecto puede obtenerse gratuitamente en la página en Internet de GSHAP, en la siguiente dirección electrónica: <http://www.seismo.ethz.ch/static/GSHAP/> (Acceso 17 de septiembre de 2012). Se combinaron cuatro elementos básicos empleando un modelo probabilístico [Giardini et al., 1999].

- Catálogos y bases de datos de terremotos es una compilación de una base de datos uniforme y de un catálogo de sismicidad de los periodos histórico (antes de 1900), temprano instrumental (1900-1964) e instrumental (1964 a la fecha).
- Caracterización de la fuente de terremotos es un modelo de fuente sísmica maestro para describir la distribución espacial-temporal de los terremotos, a partir de la evidencia contenida en los catálogos de terremotos, la sismo tectónica, la paleosismología, geomorfología, el trazado de las fallas activas, las estimaciones geodéticas de deformación crustal, los sensores remotos y los modelos geodinámicos.
- Fuerte movimiento de tierra sísmico que se deriva de la evaluación del sacudimiento del suelo como una función del tamaño y la distancia del terremoto, tomando en cuenta los efectos de

propagación en distintos ámbitos tectónicos y estructurales y empleando medidas directas del daño ocasionado por el terremoto (la intensidad sísmica), así como los valores instrumentales de los movimientos del suelo.

- Cálculo del peligro sísmico se computa a partir de la probabilidad de que ocurra un sacudimiento de suelo en un periodo dado, para producir mapas de peligro sísmico e incertidumbres relacionales en escalas apropiadas.

El mapa resultante contiene la distribución global de la aceleración de la tierra máxima (PGA) en una resolución de 6 minutos (0.1°) y expresada en m/s^2 , con un 10% de posibilidades de excederse (90% de posibilidades de no excederse) de algún parámetro de movimiento del suelo durante un tiempo de exposición de cincuenta años y un periodo de retorno correspondiente de 475 años.

Una ventaja que representa la utilización de estos datos es que el PGA es proporcional a la fuerza horizontal y que constituye el parámetro de movimiento del suelo más comúnmente trazado. Una segunda ventaja que representan los modelos basados en PGA, es que el PGA se emplea como una referencia para la construcción de edificios que deberían poder resistir un terremoto.

Los datos se encuentran en el formato Generic Mapping Tools (GMT).grd. Para poderlos emplear en un ambiente Windows, es necesario abrir en Microsoft Access e importado a ArcGIS, para posteriormente ser interpolado mediante el empleo de una interpolación Inverse Distance Weighted IDW de alto poder.

6.3.2 La Base de Datos de Terremotos Significativos (Significant Earthquakes Database)

La Base de Datos de Terremotos Significativos (Significant Earthquakes Database) (SED) proporciona ubicaciones, magnitudes, intensidades y efectos precisos de los principales terremotos ocurridos desde el año 2150 a.c., hasta el presente. Este conjunto de datos se encuentra en el US National Geophysical Data Center (NGDC) y también está disponible en línea en la siguiente dirección electrónica: <http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=1&d=1> (vínculos verificados el 17 de septiembre de 2012).

6.3.3 El World Stress Map

El conjunto de datos del World Stress Map (WSM) proporciona ubicaciones, magnitudes, intensidades y otros datos precisos relativos a eventos sísmicos. Estos datos no incorporan los efectos de los eventos, aunque sí incorporan más eventos de menor magnitud que pueden ser utilizados para delinear mejor las áreas activas desde el punto de vista sísmico.

Este conjunto de datos es mantenido por la Academia de Ciencias y Humanidades de Heidelberg y se puede acceder al mismo a través de la dirección electrónica <http://www.seismo.ethz.ch/static/GSHAP/global/> (vínculo verificado el 17 de Septiembre de 2012).

6.4 Preparación de los datos

Datos GSHAP

1. Renombre el archivo GSHPUB.DAT a GSHPUB.TXT
2. Abrir GSHPUB.TXT en Microsoft Word y añadir encabezamientos de las columnas (Lat, Lon, PGA), guarde el archivo como GSHAP.txt
3. No intente importar GSHAP.TEXT a ARCGIS. Ya que al importar los 12,960,000 puntos se colgará a la hora de exportar los datos a un shapefile.
4. Crear una base de datos Access e importación GSHAP.txt como una tabla.

5. Ejecutar una consulta a la tabla para seleccionar los puntos en el área de interés (México -121 a – 86 Longitud, 34 a 10 Latitud).
6. Exportar los resultados de la consulta a una ficha de archivo de texto delimitado. (MXTEM3.CVS)
7. En ArcGIS, importar los puntos del archivo de texto mxtem3.cvs, visualizarlos en arcgis con la función Display XY Data y luego exportarlos a un shapefile.
8. Cargar el shapefile y, utilizando la extensión Spatial Analyst del ArcGIS, y ejecutar la siguiente función Spatial Analyst\ interpolate a raster\ inverse-weighted distance interpolation con las siguientes características:

Z Value:	PGA
Cell size set to:	0.1°
Power:	10
fixed search radius:	0.00000001 (para minimizar el efecto de en torno a las celdas en el valor de una celda).

9. El GRID resultantes tendrán valores que se aproximan a los valores de las coordenadas x, y a cinco décimas
10. El GRID resultante tendrá que adaptarse a las características de las otras capas (Resample, 0.008333 °; aproximadamente 1 km de resolución) y lo guardaremos con el nombre de sismicoMX, los metadatos para esta capa se presentan en el **Anexo 36**.
11. Reclassificar la aceleración máxima sobre el terreno (m/s^2) en los cinco niveles de intensidad de peligro presentan en la **Tabla 30**. Los metadatos para esta capa se presentan en el **Anexo 37**.

Tabla 30. Niveles de intensidad de peligro sísmico y sus correspondientes rangos GSHAP PGA

Nivel de intensidad del peligro	Aceleración de la tierra máxima (m/s^2)
Muy bajo	0–0.2
Bajo	0.2–0.8
Medio	0.8–2.4
Alto	2.4–4
Muy alto	> 4

Base de datos de terremotos significativos

1. Acceda a la base de datos en la siguiente dirección electrónica:
<http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/hazards.shtml> (vínculo verificado el 17 de septiembre de 2012).
2. Extraiga la capa de terremotos, volcanes y fallas y guárdela como un archivo shape en su computadora.

World Stress Map (Mapa de estrés mundial)

1. Disponibilidad de datos de la WSM en http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de/pub/stress_data/stress_data_frame.html (vínculo comprobado 17 de septiembre de 2012).
2. Descargue el archivo excel wsm2008.zip de http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de/pub/stress_data/stress_data_frame.html (vínculo comprobado 17 de septiembre de 2012).
3. Extracto de los contenidos.

4. Abrir el archivo en Microsoft Excel.
5. Consulta la tabla para el país o región de interés.
6. Exportar los resultados de una consulta a un archivo. dbf.
7. En ArcMap, para cada archivo .dbf, importar los datos X, Y mediante la latitud y la longitud de los eventos de estrés mundiales.
8. Guardar los datos importados como un shapefile.

6.5 Creación de los mapas

Los mapas que se presentan en el *Atlas* se construyeron sobreponiendo la ubicación de los terremotos, volcanes y fallas resultantes de la Base de Datos de Terremotos Significativos (SED) así como la ubicación de los eventos sísmicos significativos extraídos del conjunto de datos del World Stress Map (WSM) en la parte superior de la capa GSHAP. A manera de ejemplo, en la **Figura 68** se muestra el mapa resultante de la aplicación de este enfoque en la República Mexicana.

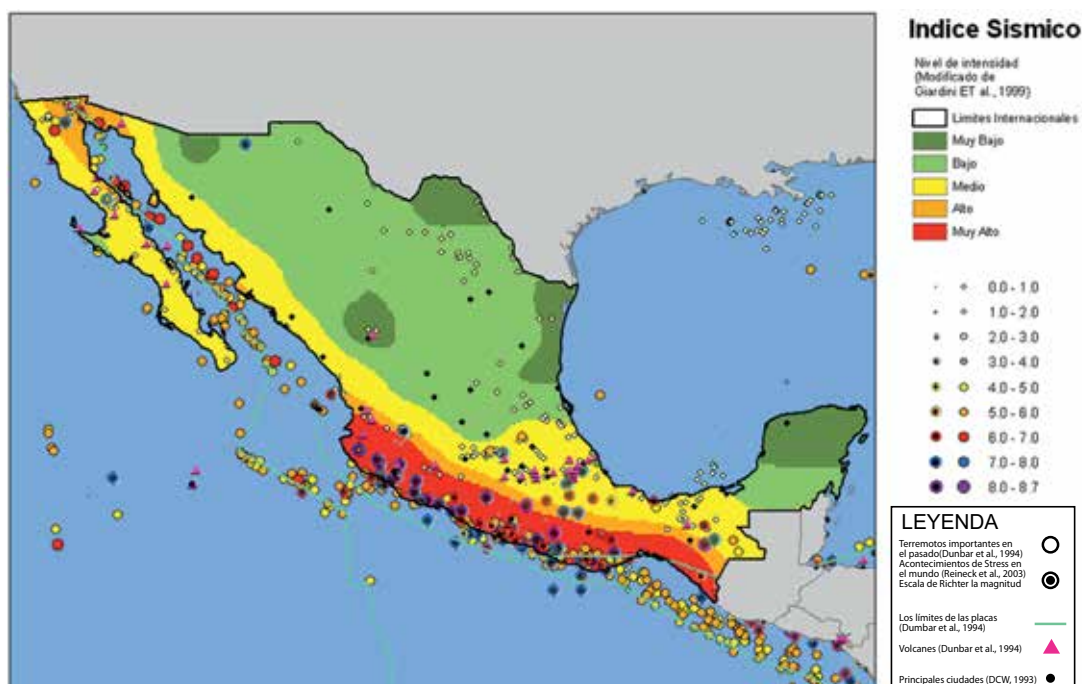


Figura 68. Mapa de distribución del peligro sísmico en la República Mexicana

6.6 Bibliografía y lecturas recomendadas

1. El Morjani Z., Ebener S., J. Boos, Abdel Ghaffar E., Musani A. (2007). "Reducing the health impact of some disasters: modeling the spatial distribution of 5 natural hazards in the context of the WHO/EMRO Atlas of Disaster Risk2", International Journal of Health Geographics 2007, 6:8.
2. Giardini D, Grünthal G, Shedlock KM, Zhang P, 1999. The GSHAP Global Seismic Hazard Map. *Annali di geofisica*, 42:1225–1230.

CAPÍTULO VII

Aplicación del eAtlas para los Peligros Naturales del estado de Oaxaca

Para la identificación de área de riesgo asociada a peligros naturales a nivel de un Estado, se utilizaron las metodologías detalladas en los capítulos anteriores, a nivel de toda la República Mexicana. La metodología está basada en la utilización de las capas de SIG más amplias para establecer la distribución espacial con alto nivel de confianza, para los cuatro peligros (inundaciones, deslizamientos, olas de calor y velocidad del viento) y enseguida a recortar estas proyecciones para la región o estado de atención específica. En el caso del modelado de sismo, se omitió de este capítulo debido a que la escala de resolución utilizada para este modelo, no puede ser re-proyectada para algún estado específico.

Los datos que se usarán en los modelos para el Estado de Oaxaca, están presentados a escala de 1:1,000,000 y 1:250,000 para las capas vectoriales, una resolución de 1 kilómetro y 90 m para las capas de arcview shapefile o raster. Se utilizaron datasets (bases de datos) solo de acceso libre, y los modelos fueron cortados para el territorio del estado de Oaxaca. Es importante mencionar que estos primeros modelos podrán mejorarse cuando se cuenta con datasets de mejor calidad o que sean más apropiadas a un contexto local.

A continuación se describe un resumen metodológico para el estado de Oaxaca, para cada uno de los peligros analizados en este proyecto:

7.1 Peligro de inundaciones

Se utilizó un método estadístico ya resumido en el Capítulo II “Metodologías y proceso de implementación para el peligro de inundaciones”, que usa la frecuencia de inundaciones históricas de los últimos 13 años y la distribución de los factores causales de inundaciones con el fin de predecir las zonas con una probabilidad de inundaciones en el Estado, basado en las sumas ponderadas de los factores causales y de la distribución histórica de inundaciones.

Los métodos estadísticos

- Producen estimaciones realistas sin utilizar un modelo empírico.
- Requieren distribuciones históricas de las inundaciones y datos de los factores causales que son fácilmente accesible en el caso del estado de Oaxaca.
- Se puede aplicar con facilidad con las tecnologías GIS empleadas a través de todo el desarrollo de este Atlas.
- Toman en consideración tanto a la susceptibilidad de cada área a las inundaciones, como a los factores relacionados con la capacidad de respuesta.

Para el factor causal de precipitación se aplica la misma metodología del índice de olas de calor pero con una medida de la peligrosidad, mediante el uso de los resultados del análisis de frecuencias Gumbel. Al igual que en el índice de olas de calor y al no contar con suficientes datos para el modelo solo del estado de Oaxaca, la interpolación correcta de los datos ha requerido usar los datos de las estaciones climáticas de toda la República Mexicana. Debido a que no se cuenta con un registro histórico de un mínimo de 10 años consecutivos para la frecuencia de inundaciones para el estado de Oaxaca, se tuvo que usar los datos históricos de inundaciones de toda la República Mexicana, para de esta manera realizar el cálculo de inundaciones para el estado de Oaxaca.

Los Resultados de la metodología para el estado de Oaxaca con un periodo de retorno de 5 años se presentan en la **Figura 69**.

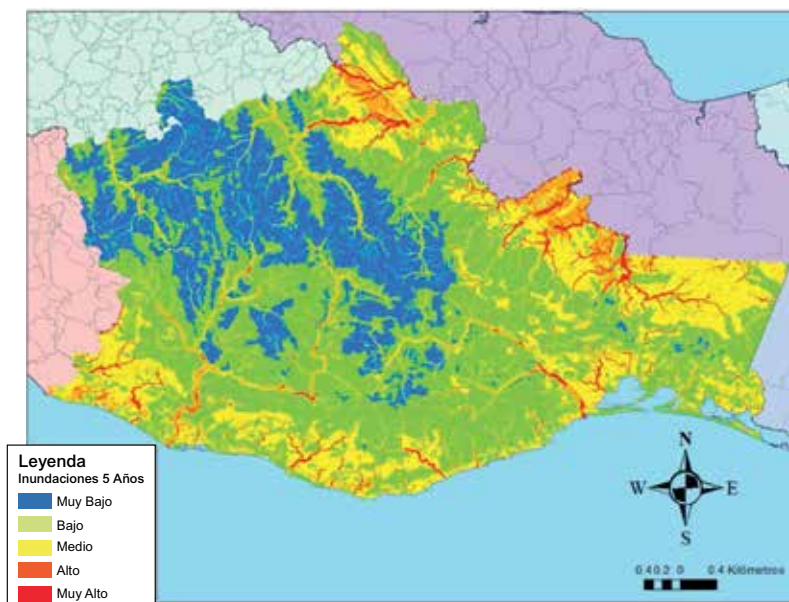


Figura 69. Peligro de inundaciones con un periodo de retorno de 5 años para el estado de Oaxaca

7.2 Peligro de deslizamientos

Debido a la falta (o de la disponibilidad) de un inventario de deslizamientos de tierra en el estado de Oaxaca, se usó un método determinista para modelar la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra en el estado, como una aproximación del peligro de deslizamientos.

El método es compatible con los métodos geoespaciales computarizados y con las técnicas geocomputacionales y permite en un primer marco definir peligros ahorrando los costos y el tiempo de un levantamiento de inventario en terreno. Ya que algunas de los factores causales están disponibles para toda la República, y al no contar con capas de mejor calidad para el estado de Oaxaca, se usaron datos de toda la República para hacer una representación más objetiva de la utilización de los datos.

Para mayores detalles de la metodología del peligro de deslizamientos, consultar el Capítulo III “Metodologías y proceso de implementación para el peligro de deslizamientos”. Los resultados de la metodología de deslizamientos con un periodo de retorno de 5 años se presentan en la **Figura 70**.

7.3 Peligro olas de calor

Se utilizó una técnica de mapeo objetiva que emplea datos empíricos y procedimientos estadísticos para estimar la distribución espacial del índice de olas de calor diario máximo anual en periodos de retorno de dos, cinco, ocho y diez años, como medida del peligro para olas de calor para el estado de Oaxaca. Se ha usado en este trabajo el índice de calor Steadman con el fin de evaluar las olas de calor en el estado de Oaxaca porque este índice es de mayor uso común para medir el calor y porque se tienen en cuenta solo dos parámetros: temperatura y humedad que son espacialmente menos variables y pueden ser utilizados para dar un buen diagnóstico de una región. Otros factores como el viento y la radiación están muy influenciados por el entorno inmediato. Por ejemplo, la velocidad del viento se reduce por la capacidad de protección de cinturones de árboles y la radiación solar se va afectado por fenómenos cortos.

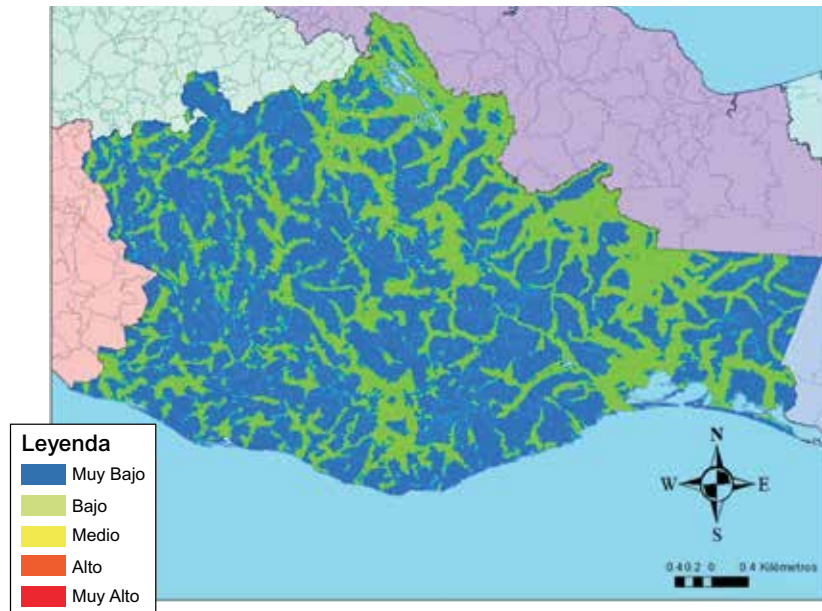


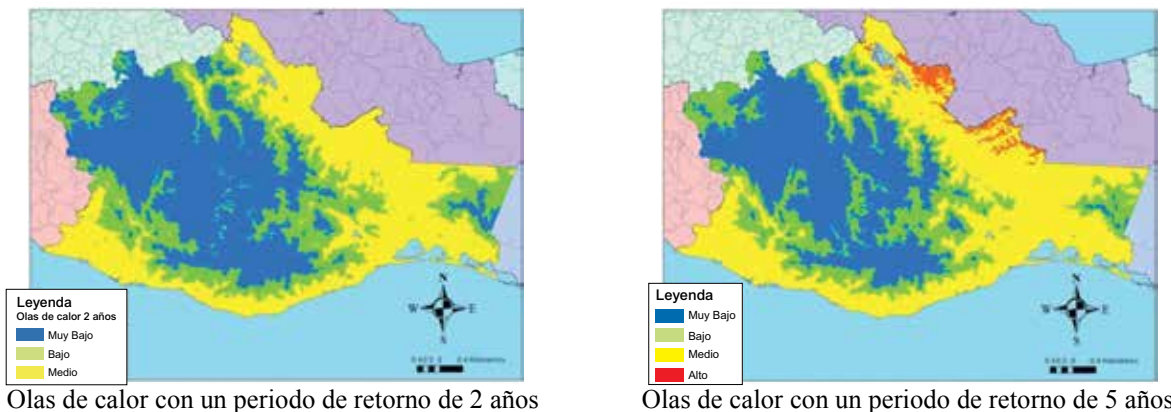
Figura 70. Peligro de deslizamientos con un periodo de retorno de 5 años para el estado de Oaxaca

Debido a que es muy difícil encontrar estaciones meteorológicas con más de 10 años de registros continuos de manera diaria en el estado de Oaxaca, fue necesario tomar las estaciones de toda la Republica Mexicana, ya que no se cuenta con mas de 5 estaciones climáticas con datos continuos de manera diaria para el estado de Oaxaca, para los últimos 10 años.

Si se requiere mayores detalles de la metodología empleada en el peligro de olas de calor para el estado de Oaxaca consultar el Capítulo IV “Metodologías y proceso de implementación para el peligro de olas de calor”. Los resultados de la aplicación de estas metodologías para el estado de Oaxaca para los diferentes periodos de retorno se presentan en la **Figura 71**.

7.4 Peligro velocidad de viento

Al igual que en el caso de olas de calor y precipitación debido a la escasas de datos continuos diarios por más de 10 años en las estaciones meteorológicas, fue necesario tomar en cuenta todas las estaciones existentes en la Republica Mexicana para poder tener una interpolación correcta de los datos; a pesar de esto los resultados no fueron del todo satisfactorios.



Olas de calor con un periodo de retorno de 2 años

Olas de calor con un periodo de retorno de 5 años

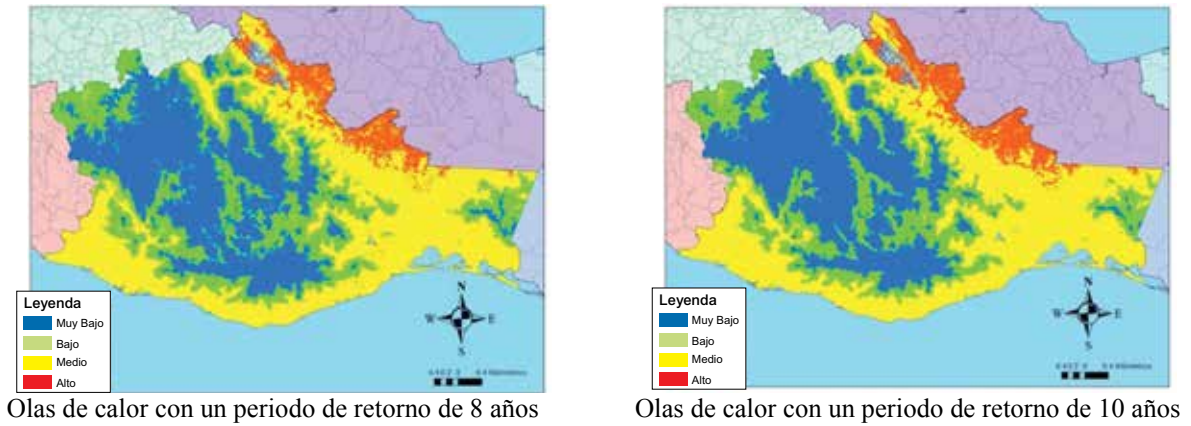


Figura 71. Diferentes periodos de retorno de las olas de calor en el estado de Oaxaca

Para mayores detalles de la metodología del peligro de velocidad del viento, consultar el Capítulo V “Metodologías y proceso de implementación para el peligro de velocidad del viento”. Los resultados del peligro de velocidad de viento con diferentes periodos de retorno se presentan en la **Figura 72**.

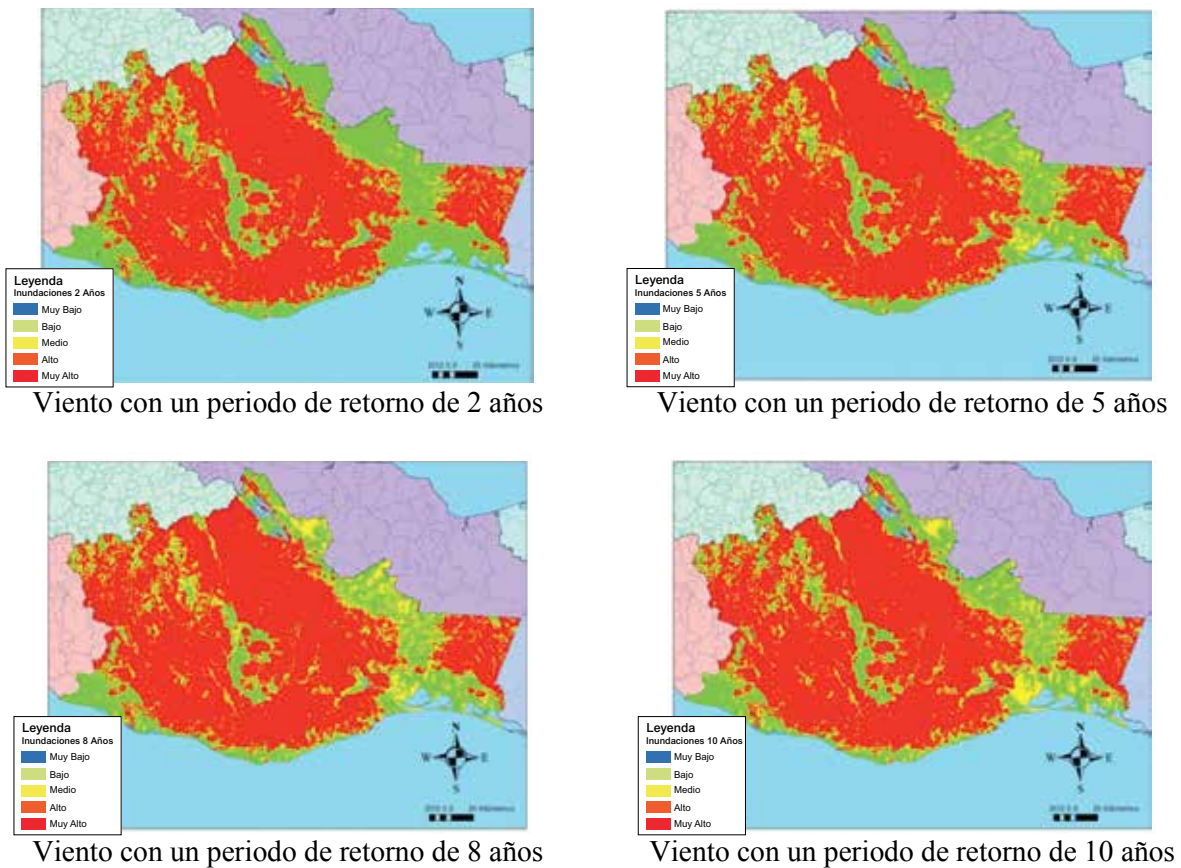


Figura 72. Diferentes periodos de retorno de velocidad del viento en el estado de Oaxaca

7.5 Conclusiones

La ventaja más grande de las metodologías expuestas para el Atlas de Oaxaca que se presenta, es que son procedimientos explícitos de la aplicación de los peligros (olas de calor, inundaciones, deslizamientos y velocidad de viento) lo que significa que puede ser actualizado o mejorado en cualquier momento, siempre que se cuente con bases de datos de mejor calidad o con información actualizada. Por lo anterior, con estas metodologías se cuenta con procedimientos que no necesitan de un nivel técnico muy alto y por lo tanto pueden ser aplicados por instituciones como protección civil, autoridades municipales, autoridad estatal o cualquier otra institución interesada en aplicarlas para la toma de decisión multinivel. Asimismo, los modelos pueden ser aplicados en cualquier nivel geográfico o espacial ya sea un municipio, un estado o un país, siempre que se cuente con los datos a ese nivel de desagregación.