



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**Metodología y su aplicación para la localización de puntos de reunión
y rutas para evacuar a la población en caso de huracanes:
Un caso de estudio en México.**

TRABAJO TERMINAL DE GRADO

Presenta

Lic. Irving Pichardo Armas

Tutor Académico

Dr. Javier García Gutiérrez

Tutores Adjuntos

Dr. Oscar Cruz Castro

M. en I. Gaston Vertiz Camaron

Toluca, México. Agosto, 2017

Contenido

Introducción	1
Hipótesis	2
Objetivo general.....	2
Objetivos particulares	3
Alcances.....	3
Capítulo 1. Antecedentes	6
1.1. Análisis Espacial Multicriterio (AEMC) en el análisis de riesgos.....	6
1.2. El Proceso Jerárquico Analítico (PJA) aplicado al análisis espacial	8
1.3. Gestión Integral de Riesgos (GIR)	10
1.4. El análisis espacial de riesgos en México.....	11
Capítulo 2. Marco teórico	14
2.1. La Gestión del Riesgo de Desastres (GRD).....	15
2.2. Evaluación multicriterio (EMC)	17
2.3. Los Sistemas de Información Geográfica (SIGs)	17
2.4. El Análisis Espacial Multicriterio (AECM).....	19
2.4.1. Objetivo	20
2.4.2. Criterios.....	20
2.4.3. Alternativas.....	21
2.4.4. Regla de decisión	21
2.4.5. Evaluación	21
Capítulo 3. Caracterización geográfica de la zona de estudio	23
3.1. Climatología.....	24
3.2. Edafología	24
3.3. Hidrografía	25
3.4. Demografía	26
Capítulo 4. Propuesta metodológica	28
4.1 Recolección de información	29
4.1.1. Capas de información.....	29

4.1.2. Datos estadísticos	31
4.2. Caracterización y diagnóstico de la zona de estudio	32
4.2.1. Determinación de las zonas vulnerables	33
4.3. Obtención de los parámetros físicos de los huracanes	34
4.4. Análisis Espacial Multicriterio (AEMC)	34
4.4.1. Definición de criterios y subcriterios en el PJA.....	34
4.5. Procesamiento SIG	35
4.6. Determinación de zonas aptas para establecer puntos de reunión.....	36
Capítulo 5. Aplicación al caso de estudio	37
5.1. Espacio físico y universo de estudio.....	37
5.2. Recolección de información	38
5.3. Obtención de capas de información	39
5.4. Obtención de los parámetros físicos de un huracán y determinación de zonas vulnerables	45
5.4.1. Probabilidad de ocurrencia de un huracán.....	47
5.5. Análisis Espacial Multicriterio (AEMC)	51
5.5.1. Matriz de comparaciones pareadas	52
5.5.2. Capas definidas para realizar el PJA	53
5.5.3. Procesamiento SIG	56
5.5. Identificación de puntos de evacuación	65
Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro	68
Conclusiones.....	68
Recomendaciones.....	69
Trabajo futuro.....	70
Referencias	71
Anexo A. Proceso de Jerarquía Analítica (PJA)	74
Anexo B. Categorías de los Huracanes.....	78

Listado de figuras

Figura 1. Flujo para el establecimiento de una predicción o alerte ante un desastre natural.....	11
Figura 2. Etapas en la gestión del riesgo de los desastres.....	16
Figura 3. Mapa de ubicación del Municipio de Navolato, Sinaloa.....	23
Figura 4. Mapa de climas predominantes Sinaloa, México.....	24
Figura 5. Mapa de tipos de suelo Navolato, Sinaloa.....	26
Figura 6. Distribución de la población en el Municipio de Navolato.....	27
Figura 7. Propuesta metodológica	28
Figura 8. Representación de las capas de información en un SIG.....	30
Figura 9. Integración de información poblacional (INEGI) en un SIG.....	32
Figura 10. Ubicación geográfica del área de estudio	37
Figura 11. Representación de información demográfica en un SIG	38
Figura 12. Representación de niveles de vegetación en un SIG	40
Figura 13. Representación de tipos de suelo en un SIG	41
Figura 14. Modelo de pendientes en un SIG	42
Figura 15. Vías de acceso representadas en un SIG	43
Figura 16. Distribución de los servicios de salud en el Municipio de Navolato	44
Figura 17. Distribución de las escuelas en el Municipio de Navolato.....	44
Figura 18. Representación de la velocidad del flujo de agua	45
Figura 19. Representación de los niveles máximo y mínimo del tirante de agua.....	46
Figura 20. Representación de posibles afectaciones por el huracán en el municipio de Navolato ..	47
Figura 21. Probabilidad de ocurrencia de huracanes Categoría 1 en la región de estudio	48
Figura 22. Probabilidad de ocurrencia de huracanes Categoría 2 en la región de estudio	49
Figura 23. Probabilidad de ocurrencia de huracanes Categoría 3 en la región de estudio	49
Figura 24. Probabilidad de ocurrencia de huracanes Categoría 4 en el estado de Sinaloa	50
Figura 25. Probabilidad de ocurrencia de huracanes Categoría 5 en el estado de Sinaloa	50
Figura 26. Estructura del PJA para el problema de estudio. Objetivo, criterios y subcriterios	52
Figura 27. Escala gráfica y verbal para comparaciones pareadas en el PJA	54
Figura 28. Capas de información consideradas en el análisis en ambiente QGIS	56
Figura 29. Proceso de definición de información de nivel de inundación	58
Figura 30. Proceso de definición de información de nivel de inundación. Continuación.....	58
Figura 31. Escala de valoración en el ambiente QGIS.....	59

Figura 32. Proceso de rasterización en el ambiente QGIS.....	59
Figura 33. Comparación del formato vectorial y el formato ráster	60
Figura 34. Realización del álgebra de mapas	60
Figura 35. Mapa resultante del álgebra de mapas	61
Figura 36. Álgebra de mapas con las ponderaciones obtenidas con el método PJA	62
Figura 37. Mapa resultante del álgebra de mapas y aplicación del método PJA	63
Figura 38. Conversión de formato ráster a vectorial	64
Figura 39. Mapa final en formato vectorial.....	64
Figura 40. Identificación de puntos de reunión	66
Figura 41. Ubicación de los puntos de reunión en formato vectorial.....	67

Resumen

El incremento en la ocurrencia de desastres naturales en nuestro país en los últimos años ha hecho necesario la mejora de los actuales planes de protección civil, mediante la ayuda de herramientas de planeación que proporcionen una visión integral del riesgo, para poder mejorar la precisión y rapidez de los sistemas de prevención al momento de una contingencia. Del mismo modo, la importancia de planificar se hace notable al momento de definir estrategias para salvaguardar a la población de los efectos de algún fenómeno natural. En el presente trabajo se adopta un proceso metodológico cuyo propósito es identificar las mejores alternativas, para la población en condiciones de vulnerabilidad, de ubicación de puntos de reunión ante los efectos generados por la ocurrencia de un huracán, y de este modo contar con elementos de soporte que ayude a decidir y planear su posterior canalización a albergues. La principal herramienta utilizada en el presente trabajo, es el Análisis Espacial Multicriterio (AEMC), el cual está aquí representado por la metodología de decisión multicriterio conocida como Proceso de Jerarquía Analítica (PJA), así como por la ayuda de un Sistema de Información Geográfica (SIG), éste último, para el almacenamiento y procesamiento de datos e información, así como para la generación de mapas de soporte a la toma de decisiones.

Abstract

The increase in the occurrence of natural disasters in our country in recent years has made it necessary the improvement of the current civil protection plans, through the help of planning tools that provide an integral view of the risk, in order to improve the accuracy and speed of the prevention systems when happening a contingency. Likewise, the importance of planning becomes remarkable when defining strategies to safeguard the population from the effects of some natural phenomenon. In the present work, it is adopted a methodological process whose purpose is to identify the best alternatives, for the population in conditions of vulnerability, to locate assembly points in the presence of the effects of a hurricane occurrence, and thus to have at hand with support elements that help to decide and plan their later conducting to shelters. The main tool used in the present work is the Multicriteria Spatial Analysis (MCSA), which is here represented by the multi-criteria decision methodology known as the Analytical Hierarchy Process (AHP), as well as the help of a Geographic Information System (GIS), this latter, used for storage and data and information processing, as well as for maps generation to support decision making.

Listado de acrónimos

AEMC	Análisis Espacial Multicriterio
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad
EMC	Evaluación Multicriterio
EEMC	Evaluación Espacial Multicriterio
ITER	Sistema de Integración Territorial
GIR	Gestión Integral del Riesgo
GRD	Gestión de Riesgos de Desastres
OMS	Organización Mundial de la Salud
PJA	Proceso de Jerarquía Analítica
SIG	Sistema de Información Geográfica
SINAPROC	Sistema Nacional de Protección Civil

Introducción

En el desarrollo de investigaciones relacionadas con la gestión de riesgos, el crecimiento de la población toma un lugar preponderante por el efecto que tiene en la estimación de la magnitud del riesgo. En algunos lugares dichos efectos pueden intensificarse de tal forma que un riesgo puede convertirse en un desastre. La importancia del estudio de estos temas son los impactos asociados a los riesgos que se desprenden de sucesos tales como los huracanes. La variación en la intensidad con la que, en los últimos años, estos fenómenos han impactado a la humanidad, hace necesario desarrollar metodologías que ayuden a mitigar los efectos que dichos procesos pueden generar en la población.

Este trabajo se presenta un proceso metodológico donde se busca que su esquema de trabajo pueda ser eventualmente aplicado a otras situaciones en las que exista un riesgo asociado a un huracán. Esto con la finalidad de ubicar sitios de reunión, así como proporcionar elementos que permitan ayudar a identificar rutas para desalojar a la población en condiciones de vulnerabilidad. En este trabajo se tiene como herramienta principal al Análisis Espacial Multicriterio (AEMC), donde se desarrolló un proceso de información necesaria proveniente de fuentes gubernamentales para la generación de mapas, y así contar con elementos visuales que ayuden a facilitar la elección de dichos puntos de reunión.

La zona de estudio sobre el cual se desarrolla el presente trabajo comprende el espacio físico del municipio de Navolato, Sinaloa. Se plantea la aplicación de un proceso que tome en cuenta diversas variables territoriales, a través de un análisis integral en sentido espacial de componentes físico-geográficos (tales como geomorfología, geología, hidrología, clima, vegetación y uso de suelo), así como las variaciones de la magnitud del riesgos ante la presencia de huracanes, y los cuales, con la adición a través de datos sociodemográficos, permiten identificar las ubicaciones con mejor aptitud para el establecimiento de lugares de reunión para evacuar a la población. Posterior a la culminación del presente trabajo, se podrán continuar propuestas de procesos de generación de rutas para evacuar a la población utilizando como restricciones los factores físico-geográficos, así como de intensidad y probabilidad del riesgo asociado al tipo de fenómeno en cuestión, esto último, producto del trabajo aquí presentado.

Se plantearon las siguientes preguntas que permitieron guiar el desarrollo de esta investigación:

- a) ¿Cómo ubicar los mejores puntos para reunir a la población en caso de un huracán?

- b) ¿Cómo identificar los elementos que permitan construir rutas desde un albergue hacia los puntos de reunión y de regreso, con base a las condiciones físico-geográficas existentes para evacuar a la población en condiciones de vulnerabilidad?
- c) ¿Pueden ser descritos los posibles escenarios de análisis mediante la ayuda de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG)?

Hipótesis

Como respuesta a los planteamientos anteriores, y a manera de hipótesis en el presente trabajo, se enuncia como sigue:

Los principios teóricos de la gestión y análisis de riesgo, el AEMC, la aplicación de un método geográfico, en complemento con el uso de herramientas SIG, permiten desarrollar un proceso metodológico para identificar los puntos de reunión adecuados para evacuar a la población en caso de un huracán, así como generar los insumos para eventualmente construir una serie de rutas que permitan, en función de las restricciones físico-geográficas (que son: niveles de vegetación, tipo de suelo, velocidad de los vientos, modelo de pendientes, velocidad del flujo de agua, nivel de inundación) identificar aquellos elementos de la traza urbana que permitan el traslado de las personas a los albergues minimizando la exposición de la población al fenómeno en cuestión.

Objetivo general

Se planteó como objetivo general el siguiente:

Proponer y aplicar un proceso metodológico el cual permitirá integrar el AEMC y la gestión integral de riesgos en complemento con los SIGs, que permitan minimizar el nivel de exposición de la gente al riesgo implícito. De los hallazgos de este trabajo se pretende sentar las bases que eventualmente permitan encontrar estrategias generalizables que puedan ser aplicables a cualquier lugar vulnerable al riesgo por la ocurrencia de huracanes.

Objetivos particulares

De acuerdo a lo establecido anteriormente se plantearon los siguientes objetivos particulares para apoyar cada una de las etapas del trabajo:

1. Revisar el estado del arte en cuanto a metodologías de localización y evacuación de la población, aplicado a riesgos asociados a la ocurrencia de huracanes. Así como la utilización de técnicas de evaluación espacial multicriterio para la elección de los lugares con mejor aptitud, esto para analizar el tipo de soluciones planteadas para el problema.
2. Caracterizar y diagnosticar la zona de estudio para establecer las condiciones sociodemográficas y condiciones físico-geográficas de la misma.
3. Analizar la distribución espacial de las zonas vulnerables para poder establecer los criterios necesarios que nos permitirán ubicar los puntos de reunión.
4. Aplicar una metodología espacial multicriterio, procesando la información en un SIG en la selección de los lugares más adecuados para localizar puntos de reunión para evacuar a la población, tomando como base los parámetros principales que influyen dentro de un huracán como lo son el nivel de inundación, velocidad de los vientos, velocidad del flujo de agua, así como definir condiciones de aptitud en combinación con algunas variables físico-geográficas dentro de la zona de estudio, tales como los niveles de vegetación, el tipo de suelo, el modelo de pendientes, la distribución de las viviendas y las vías de acceso.

Alcances

Los alcances del presente trabajo son los siguientes:

- La aplicación de la propuesta consistiría en un proceso de planeación para el Municipio de Navolato, Sinaloa, y para su réplica en otro caso de estudio, se requiere de la información socio-demográfica y espacial, así como la participación de tomadores de decisiones con un alto nivel de conocimiento de la nueva zona de estudio para el proceso de planeación y preparación ante desastres. De esta forma, el presente trabajo tiene como principal

limitación que el conocimiento y las conclusiones que de aquí se desprenden no pueden ser extrapolables a otros casos de estudio.

- Se presentará información de puntos de reunión en relación con el nivel de riesgo con el que el entorno muestra. De este trabajo se desprenden elementos que permitirán en un proceso posterior, también en el ámbito de la planeación ante desastres, la construcción de rutas de evacuación. El presente trabajo no considera la utilización de un modelo de determinación de rutas para la evacuación a partir de estos puntos de reunión.

Partiendo de los objetivos particulares, se generó el siguiente capitulado del trabajo consistente en cuatro secciones principales más la sección de conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro. Este capitulado se describe a continuación.

En el Capítulo 1, denominado a se engloban los fundamentos teóricos, metodológicos y conceptuales sobre los cuales se desarrolla el Trabajo Terminal de Grado. Del mismo modo se presenta la revisión de la literatura del tema de evaluación multicriterio asociada a riesgos, haciendo especial énfasis en los riesgos por ocurrencia de huracanes. También se resumen algunos casos de estudio de la planeación ante desastres con la utilización de SIGs con la intención de mostrar los enfoques adoptados en distintas investigaciones ante temas afines al presente.

En el Capítulo 2 se presenta el marco teórico que da sustento al proceso metodológico abordado en los capítulos posteriores. Se define la Gestión de Riesgos de Desastres, se presentan las ideas básicas de Evaluación Multicriterio (EMC) y de los SIGs, así como se mencionan los conceptos básicos alrededor del AEMC.

En el Capítulo 3 se presenta la caracterización geográfica de la zona de estudio. Se muestran las condiciones dentro de la zona de interés: las condiciones físico-geográficas, demográficas y de accesibilidad, predominantes en el espacio geográfico objeto de estudio. En este apartado también se presentan algunos parámetros físicos que acompañan el comportamiento espacial implícito en un huracán dentro de la zona de estudio.

En el Capítulo 4 se desglosa el planteamiento metodológico propuesto dentro del trabajo terminal de grado. Se presentan las diferentes etapas las cuales son necesarias para aplicar el AEMC con ayuda de la metodología multicriterio conocida como Proceso de Jerarquía Analítica (PJA), esto, directamente sobre un SIG.

En el Capítulo 5 se muestra la aplicación del proceso metodológico propuesto al caso de estudio, el cual consiste en la utilización del PJA dentro de un SIG, y a

través del AEMC, se genera un escenario base que sirve como referencia para la ubicación de puntos de reunión, así como identificar elementos para la eventual construcción de rutas para desalojar a la población.

Finalmente se presentan las conclusiones, las recomendaciones y el trabajo futuro que se desprenden del presente Trabajo Terminal de Grado.

Capítulo 1. Antecedentes

El uso de diferentes metodologías propias del campo de la toma de decisiones, se ha adaptado y aplicado en muchos de los campos del quehacer humano, debido al crecimiento de herramientas tecnológicas cada vez más sofisticadas. La simulación de escenarios asociados a fenómenos como huracanes que se presentan sobre la superficie terrestre, permiten valorar de una forma eficiente los posibles efectos que estos tendrían sobre un lugar determinado. En este sentido, es importante el desarrollo de nuevas metodologías que puedan ser de utilidad para contar con un soporte al momento de tomar decisiones y que éstas sean traducidas en acciones para garantizar la integridad de la población en caso de que se encuentre en algún tipo de exposición a fenómenos naturales como lo es la ocurrencia de un huracán y sus efectos.

Las ideas que motivaron el interés en el presente Trabajo Terminal de Grado, se sustentan en los principios teóricos conceptuales de la gestión y análisis de riesgos de Blodgett y Keller (2007), la obtención de mapas de riesgo a partir de trayectorias históricas de ciclones tropicales empleando evaluación espacial multicriterio (Cano, 1996; Preciado, 1997; CENAPRED, 2001; Pusineri, 2006; Blodgett y Keller, 2007; Hernández, 2010; Acosta, 2011, Bode y Codling, 2013; Buzai, 2013), y el uso de la herramienta PJA en el análisis espacial (Martínez et al., 2010; Hernández, 2013; Abu, 2013; Ospina 2015). El conjunto de estos elementos teóricos contribuyó a asentar las ideas para la construcción de un procedimiento, el cual, permitiera explicar y generar un proceso multicriterio para la identificación de las ubicaciones adecuadas que permitan reunir y posteriormente evacuar a la población de forma previa a la ocurrencia de un huracán.

1.1. Análisis Espacial Multicriterio (AEMC) en el análisis de riesgos

Se tienen documentados estudios que han brindado una aportación sustantiva dentro de la gestión integral del riesgo asociado a huracanes utilizando el Análisis Espacial Multicriterio (AEMC) como metodología de estudio.

De acuerdo a Cano (1996) la evaluación multicriterio en el entorno de los Sistemas de Información Geográfica (SIGs), se enfoca en realizar la búsqueda de la *"elección de la alternativa óptima dentro de un conjunto, basándose en un criterio único"*. Este criterio se establece mediante una metodología lógica, la cual plantea un conjunto de posibles soluciones, asociado a un nivel de preferencias en función de la búsqueda del objetivo. Esto se logra mediante una serie de comparaciones las cuales determinan las soluciones más favorables, eligiendo al final la más

adecuada. La descripción anterior se adaptó al presente Trabajo Terminal de Grado con el objetivo de encontrar las zonas con mejor capacidad para funcionar como puntos de reunión.

En el trabajo de Preciado (1997) se menciona que la aplicación del paradigma de decisión multicriterio en el campo de la planificación física del territorio ha abierto una importante vía metodológica hacia la ordenación territorial. La complejidad del medio natural, así como los fenómenos que se presentan dentro de un lugar determinado, establece la intervención de diversas variables, las cuales al presentar una reacción a la acción humana encuentra en la metodología multicriterio un modelo teórico de gran utilidad.

Posteriormente, Pusineri (2006) describe la aplicación, potencia e importancia de los SIGs, que por un lado permiten trabajar la planificación territorial en la implementación de niveles de prevención frente a las amenazas a las que está expuesto un territorio, y por otro da respuestas eficientes frente a la ocurrencia de una emergencia o catástrofe.

Los riesgos naturales son parte de un proceso natural en donde las poblaciones en condiciones de vulnerabilidad son las más afectadas al momento de enfrentar estas amenazas. De acuerdo a Blodgett y Keller (2007), un riesgo natural, es cualquier proceso natural que representa una amenaza para la vida humana o la propiedad. El suceso en si no es un riesgo; más bien un proceso natural se convierte en un riesgo cuando amenaza los intereses humanos. De acuerdo a los autores el primer paso para realizar un plan de contingencias en caso de recibir un huracán, consiste en conocer las condiciones actuales sobre las cuales se encuentra la zona de estudio, para ello es necesario obtener datos de diversas fuentes oficiales para conocer con precisión el alcance que tiene el fenómeno en cuestión. Esto nos sirve para estimar con base en la información cartográfica de cómo pueden influir los daños de un huracán sobre un determinado lugar.

Para conocer cómo puede afectar el efecto de un huracán, en Hernández (2010), se presentan diferentes alternativas de mapas de riesgo obtenidos a partir de las trayectorias históricas y áreas de incidencia estimadas de los ciclones tropicales, los cuales presentan un grado de afectación espacio-temporal las cuales se adaptaron junto con diferentes variables de vulnerabilidad, como: densidad de población, densidad de instalaciones socioeconómicas, superficie agrícola y superficie forestal. La aplicación de un AEMC dio como resultado la obtención de mapas de riesgo para todos los meses de la temporada de ciclones en Cuba. Los mapas obtenidos se utilizaron como estimadores de niveles de desastre previo al paso de un ciclón, sirvieron como complemento a los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgo que se estudian en la actualidad en Cuba.

En el trabajo de Acosta (2011) se muestra la potencialidad que presentan los SIG y de la evaluación multicriterio (EMC), para determinar la cartografía de las zonas que son susceptibles a sufrir inundaciones en cuencas fluviales. Los resultados obtenidos constituyen valiosas herramientas de gestión, los cuales ayudan a la toma de decisiones en los territorios e incrementan el nivel de conocimiento para analizar los riesgos ante la ocurrencia de desastres naturales. El AEMC junto con el uso de herramientas geotecnológicas se pueden integrar, para generar la predicción de escenarios con una mejor precisión. En dicho trabajo quedó de manifiesto la potencialidad que presentan los SIG y la EMC para determinar con precisión, la cartografía de las zonas favorables al desarrollo de inundaciones recurrentes en cuencas fluviales. La capacidad de análisis y manejo de la información espacial que poseen los SIG en la actualidad, conjuntamente con el procesamiento estadístico apoyados en el uso de la EMC, permiten cuantificar factores del medio natural y establecer grados de adecuación, reduciendo la subjetividad durante el procesamiento analítico.

Por otro lado, Bode y Codling (2013), estudian el comportamiento de las poblaciones humanas ante un riesgo, esto con el fin de optimizar los tiempos de desalojo y así conocer los factores que pueden influir en la planeación, prevención y mitigación de los riesgos

En el trabajo de Buzai (2013), se propone la aplicación de técnicas de EMC en apoyo a la toma de decisiones en cuestiones de localización. Se menciona la importancia de la localización espacial de servicios públicos en los cuales la guía está dada para lograr en ellos una orientación hacia las poblaciones vulnerables, intentando maximizar la equidad espacial en cuanto a la accesibilidad. Dicho trabajo desarrolla una síntesis conceptual sobre la geografía de los servicios aplicados en geografía de la salud y orientados a la aplicación metodológica para su resolución a través del uso de tecnología SIG. El objetivo es recorrer un camino teórico-metodológico que lleve a la identificación de sitios de aptitud para la localización de nuevos centros de servicios, considerando que los resultados obtenidos brindarán elementos para el apoyo a la toma de decisiones que apunten a lograr una mejora en la calidad de vida de la población del área de estudio.

1.2. El Proceso Jerárquico Analítico (PJA) aplicado al análisis espacial

La aplicación del Proceso Jerárquico Analítico (PJA) se ha documentado en varios trabajos. Por ejemplo, en Martínez et al. (2010) se utilizó para definir el lugar más adecuado para la construcción de edificios universitarios. Esto se pudo realizar definiendo diferentes criterios basados en distintos atributos. La aplicación de este

tipo de herramientas de decisión buscaba demostrar una mayor equidad y eficiencia espacial en el resultado final de la decisión de ubicación de nuevos espacios universitarios, al tiempo que se minimizarían los posibles efectos negativos sobre el entorno en una zona protegida.

Por otra parte, al conjuntar todas las partes involucradas en el proceso de la gestión de riesgo, utilizando la tecnología, se han realizado algunos trabajos los cuales tienen como fundamento principal el AEMC. Un ejemplo es el trabajo realizado por Hernández (2013), en donde se presentan diferentes alternativas de mapas de riesgo obtenidos a partir de las trayectorias históricas y áreas de incidencia estimadas de los ciclones tropicales que han afectado al territorio nacional desde el año 1851 hasta el 2012, junto a diferentes variables de vulnerabilidad, como: densidad de población, densidad de instalaciones socioeconómicas, superficie agrícola y superficie forestal. Los mapas que se presentan en dicho trabajo se obtuvieron aplicando una metodología relativamente reciente del AEMC, en el cual se incluye la técnica conocida como PJA con el diseño de redes geospaciales, y que considera dos enfoques diferentes de dichas variables: enfoque socioeconómico y enfoque agroforestal. Este método tiene como punto de partida datos de peligro y vulnerabilidad, y contempla las trayectorias históricas de los ciclones tropicales, datos geospaciales del mapa topográfico a escala 1:100 000 como cantidad de viviendas para el cálculo de su densidad por unidades de superficie, datos de otros estudios geográficos como instalaciones socioeconómicas del territorio, así como datos de uso del suelo agrícola y forestal. Los mapas obtenidos del proceso de análisis del autor pueden utilizarse como estimadores de niveles de desastre previo al paso de un ciclón, y servir como complemento a los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgo que se desarrollan actualmente en Cuba, que fue el lugar de estudio, y que parten de la idea de mitigar los posibles efectos que causan los huracanes en lugares costeros, los cuales a su vez causan grandes daños sobre el patrimonio y ponen en riesgo el bienestar de la población.

Otra metodología propuesta para la gestión integral del riesgo auxiliada con la metodología PJA, está descrita en el trabajo de Abu (2013). En dicha investigación se propuso utilizar imágenes de satélite por medio de los cuales se pudo integrar el PJA, para estudiar la utilización de estos dos enfoques para evaluar el área de vulnerabilidad y la zona de inundación debido al peligro de tsunami en la zona de Rikuzentakata, Japón. En este trabajo se utilizaron parámetros de elevación, pendiente, distancia de la costa y densidad de la vegetación. Cinco clases de vulnerabilidad fueron definidas y ponderadas. Los resultados de esa evaluación describieron que 14.35 km² del área de estudio estaban bajo la zona de la vulnerabilidad del tsunami. Las áreas de inundación fueron aquellas de alta y ligeramente alta vulnerabilidad. La zona más alejada alcanzada por un tsunami fue

de unos 7,50 km de la costa y muestra que los ríos actúan como tiras de inundación en un tsunami. Este estudio se puede utilizar para la determinación de una prioridad para la planificación del uso de la tierra y para la gestión de riesgo por tsunami.

Por último, Ospina (2015), partiendo de métodos de análisis multicriterio y herramientas SIG, presentó la aplicación del PJA en conjunto con un análisis espacial para localizar zonas notablemente aptas en la construcción de colegios distritales en la localidad de Suba. El autor para darle un soporte estructurado a los criterios usados en el análisis, incluyó el planeamiento y diseño de instalaciones y ambientes escolares. La información geográfica utilizada como base para el desarrollo del estudio, fue descargada de fuentes oficiales de información, y fue manejado en formato vectorial, para posteriormente ser transformado en coberturas ráster que definen cada una de las variables. Con esta información se efectuó un álgebra de mapas considerando los pesos resultantes del PJA, para obtener finalmente una cobertura ráster, que indica las diferentes zonas aptas y no aptas para la construcción de las instalaciones educativas en la localidad de Suba. Lo anterior sirvió como fundamento para realizar operaciones con capas de información ráster, lo que es conocido como álgebra de mapas, que consiste en la realización de operaciones mediante un SIG, para determinar qué píxeles o celdas dentro de una capa ráster son óptimas para cumplir con el objetivo que se plantea en la resolución de la problemática presentada.

1.3. Gestión Integral de Riesgos (GIR)

De manera general la Gestión Integral de Riesgos (GIR), definido por Blodgett y Keller (2007) como el proceso y las acciones de planeación antes, durante y después de un fenómeno natural, sigue un patrón, el cual va directamente relacionado con el riesgo al que está expuesta la población en un desastre, ya que como se observa en la Figura 1 el análisis de los datos obtenidos de un determinado fenómeno, va a impactar directamente en la instrumentación de planes de evacuación, los cuales tendrán como objetivo tratar de mitigar los efectos y minimizar los impactos que un fenómeno natural pueda generar sobre un lugar determinado para proteger de mejor forma a la población afectada.



Figura 1. Flujo para el establecimiento de una predicción o alerta ante un desastre natural

Fuente: Blodgett y Keller (2007).

1.4. El análisis espacial de riesgos en México

Partiendo del conocimiento geográfico de la zona de estudio y revisando la gran diversidad que posee México debido a la variedad de regiones y condiciones climáticas, el país ha estado expuesto a fenómenos naturales de diferente índole y de diversas magnitudes. En particular, nuestro país cuenta con una extensa área de litorales a lo largo de toda la república, por lo que es bastante frecuente estar expuestos a riesgos asociados a fenómenos hidrometeorológicos, y en concreto a los huracanes.

La ubicación del país en una región intertropical, lo hace sujeto a los embates de huracanes que se generan tanto en el Océano Pacífico como en el Atlántico. Los efectos de estos fenómenos, en términos de marejadas y vientos, se resienten principalmente en las zonas costeras del Pacífico, del Golfo y del Caribe; las lluvias intensas que estos fenómenos originan causan inundaciones y/o deslaves, no sólo en las costas, sino también en el interior del territorio. De los 25 ciclones que en promedio llegan cada año, según datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) a los mares cercanos al país, cuatro o cinco suelen penetrar en el territorio y causar daños severos. También se presentan lluvias intensas, con las consecuentes inundaciones y deslaves importantes, y con mucha

frecuencia de manera independiente de la actividad ciclónica, debido a las tormentas que se generan en la temporada de lluvias (CENAPRED, 2001).

Por lo anterior se ha vuelto cada vez más necesario crear instancias, las cuales gestionen de manera integral los planes y evaluaciones de Protección Civil. Por lo anterior, se creó un organismo público llamado Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC), el cual ha ido evolucionando a partir de los sismos ocurridos en 1985, su estructura y funcionamiento han ido creciendo involucrándose en todos los niveles de gobierno, así como integrando también diversos sectores (público y privado, ayudando a la generación de nuevas estrategias que permita la gestión integral de los riesgos. Por otra parte, conocer las condiciones y las características de los diferentes eventos que pueden generar desastres, es la base para tener que generar estrategias cada vez más adecuadas para mitigar los efectos, ya sea de carácter natural o antropogénico (diagnóstico del riesgo).

Desde el punto de vista del diagnóstico de riesgo, los agentes perturbadores representan una amenaza, de la cual hay que determinar el nivel de riesgo, o peligro de que llegue a generar desastres cuando incide sobre ciertos sistemas afectables. Con relación a estos últimos, el nivel de riesgo de desastre depende del tamaño del sistema expuesto al desastre (en términos de la cantidad de población o costo de la infraestructura o cualquier otro índice de valor de las posibles pérdidas). A esta cantidad se le llama grado de exposición. El potencial de desastre también depende de la vulnerabilidad de los sistemas expuestos, o sea de su predisposición a ser afectados por el agente perturbador CENAPRED (2001).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define a los desastres como *“eventos que ocurren cuando un número significativo de personas son expuestos a eventos extremos a los cuales son vulnerables, con el resultado de daños y pérdidas de vidas, frecuentemente combinadas con daños a propiedades y vecindarios”* (Wisner y Adams, 2002).

Existen diversas clasificaciones de los riesgos de desastres. Por ejemplo, en México, el SINAPROC utiliza una clasificación que considera el tipo de agente perturbador asociado. De este modo se tienen riesgos de origen: geológico, hidrometeorológico, químico, sanitario y socio-organizativo (CENAPRED, 2001).

En el documento *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México* del mismo CENAPRED (2001) se muestra una forma cuantitativa de medir el riesgo a la cual ésta se expone en un determinado lugar; y está dado por la siguiente expresión.

$$R = P * V * E$$

Donde:

R: Riesgo. Se expresa para fines de este trabajo como una probabilidad. Alternativamente se puede expresar en términos monetarios.

P: Peligro. Se expresa como una probabilidad.

V: Vulnerabilidad. Se expresa como una probabilidad.

E: Grado de exposición. Se expresa como una probabilidad.

Se denomina riesgo *R*, a la probabilidad de que un determinado fenómeno pueda llegar afectar a un determinado lugar o población lo cual puede llegar a dañar su integridad, bienes o incluso la vida. Se le llama peligro *P*, a la probabilidad de que se presente un evento de cierta intensidad, tal que pueda ocasionar daños en un sitio dado. Se define como grado de exposición *E*, a la proporción dada por la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio considerado y que es factible sean dañados por el evento. Finalmente, se llama vulnerabilidad *V*, a la propensión de estos sistemas a ser afectados por el evento; la vulnerabilidad se expresa como una probabilidad de daño,

La vulnerabilidad de un lugar se asocia al crecimiento de la población que habita zonas con alto nivel de riesgo, así como a los cambios ambientales dentro de los ecosistemas costeros como lo son el blanqueamiento de corales y la pérdida de manglares, esto aumenta la posibilidad de inundaciones.

Con base en los antecedentes arriba descritos, fue posible identificar elementos clave para sustentar el procedimiento metodológico empleado en el presente Trabajo Terminal de Grado, al considerar la integración de diversos factores físico-geográficos, y por tanto, la adopción de la metodología PJA en combinación con herramientas SIG, con la finalidad de proponer una metodología que busca establecer los lugares más adecuados para proponer puntos de encuentro para desalojar a la población durante la ocurrencia de un huracán. Dentro de esta propuesta se toman en cuenta tres factores los cuales son: los parámetros físicos de un huracán, los factores físico-geográficos de la zona de estudio y por último las principales vías de acceso.

Capítulo 2. Marco teórico

La base fundamental de los fenómenos es el conocimiento científico de los mismos, de esto parten los principios básicos de las ciencias geológicas y atmosféricas que estudian los mecanismos de generación de los diferentes fenómenos que pueden generar desastres en la población.

De este modo, generar un diagnóstico del riesgo nos permite conocer las condiciones actuales sobre las cuales se encuentra una determinada región o zona de estudio, generando así posibles escenarios sobre los cuales se puede comportar un fenómeno, así como también la probabilidad que se puede asociar a la ocurrencia de estos dentro de un lugar determinado.

Debido a la importancia de la generación de escenarios de análisis, estos deben tomar en cuenta las variaciones que existen en un contexto espacial (demografía, accesibilidad, zonas vulnerables), ya que el aumento de estas variaciones puede incrementar de manera importante la exposición a un riesgo asociado a un fenómeno natural o antropogénico.

Para lograr representar un fenómeno natural se vuelve sumamente importante la generación de cartografía a la escala adecuada. Esto ayuda a representar correctamente la intensidad de los eventos y los tipos que pueden ocurrir. La generación de un atlas de riesgos, que es una colección de mapas los cuales abordan diferentes temáticas que se obtienen de datos reales, permiten modelar y detectar el comportamiento espacial a los riesgos asociados en un lugar determinado.

La importancia de los SIGs se observa principalmente en la ayuda que le brindan a los planificadores y a los tomadores de decisiones para identificar, proponer e implementar medidas de prevención basadas en regulaciones del uso del suelo, sistemas de prevención y alerta, con la finalidad de facilitar la implementación de los preparativos de emergencia y actividades de respuesta (hospitales, estaciones de policía y bomberos, albergues, y otros elementos de los servicios vitales), permitiéndoles visualizar gráficamente las áreas de impacto de peligros y relacionarlas con personas y propiedades en riesgo. Son adecuados para procesos de evaluación y rehabilitación post-desastre y trabajos de reconstrucción, por su capacidad para manejar y combinar mapas con bases de datos geospaciales y alfanuméricas con la información descriptiva correspondiente.

Con base en lo anterior se puede realizar la conjunción de los SIGs con técnicas de EMC, para obtener resultados de un problema de decisión espacial dando origen a lo que se conoce como AEMC. En el proceso metodológico aquí presentado, se

hace énfasis en la utilización de técnicas multicriterio utilizadas dentro del campo de la toma de decisiones, integrándolas en los SIGs.

2.1. La Gestión del Riesgo de Desastres (GRD)

Como se menciona en Baas (2009) el objetivo de la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) es reducir los factores subyacentes de riesgo y prepararse e iniciar una respuesta inmediata en cuanto el desastre golpea. Las acciones de la GRD en la fase pre-desastre apuntan a fortalecer las capacidades y la resiliencia de los hogares y comunidades para proteger sus vidas y sus medios de vida, a través de medidas para evitar (prevención) o limitar (mitigación) los efectos adversos de las amenazas y para proporcionar sistemas de alerta temprana de amenazas que sean oportunos y confiables. En la fase de respuesta, las comunidades y agencias de socorro se centran en salvar vidas y propiedades y en proporcionar alivio. En la fase post-desastre, el foco está en la recuperación y rehabilitación. En realidad, el cambio entre estas fases es fluido, en particular, entre las etapas en donde las comunidades van desde la rehabilitación al desarrollo, integrando aspectos de mitigación de amenazas en sus actividades para el desarrollo.

Durante la planeación y preparación de la GIR se presentan varias etapas, las cuales van encaminadas a realizar las acciones necesarias durante el fenómeno que está afectando al lugar, por ellos es necesario conocer las acciones a tomar.

Dentro del campo de la gestión de riesgo, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), propone un cuadro en el cual se describen las diferentes etapas en el proceso de la gestión del riesgo, esta metodología es de gran utilidad al momento de estructurar planes de desarrollo adecuados los cuales van encaminados a planificar y a tener un ciclo de gestión (ver Figura 2), que servirá para reducir y mitigar los posibles efectos que un riesgo tenga sobre la población.

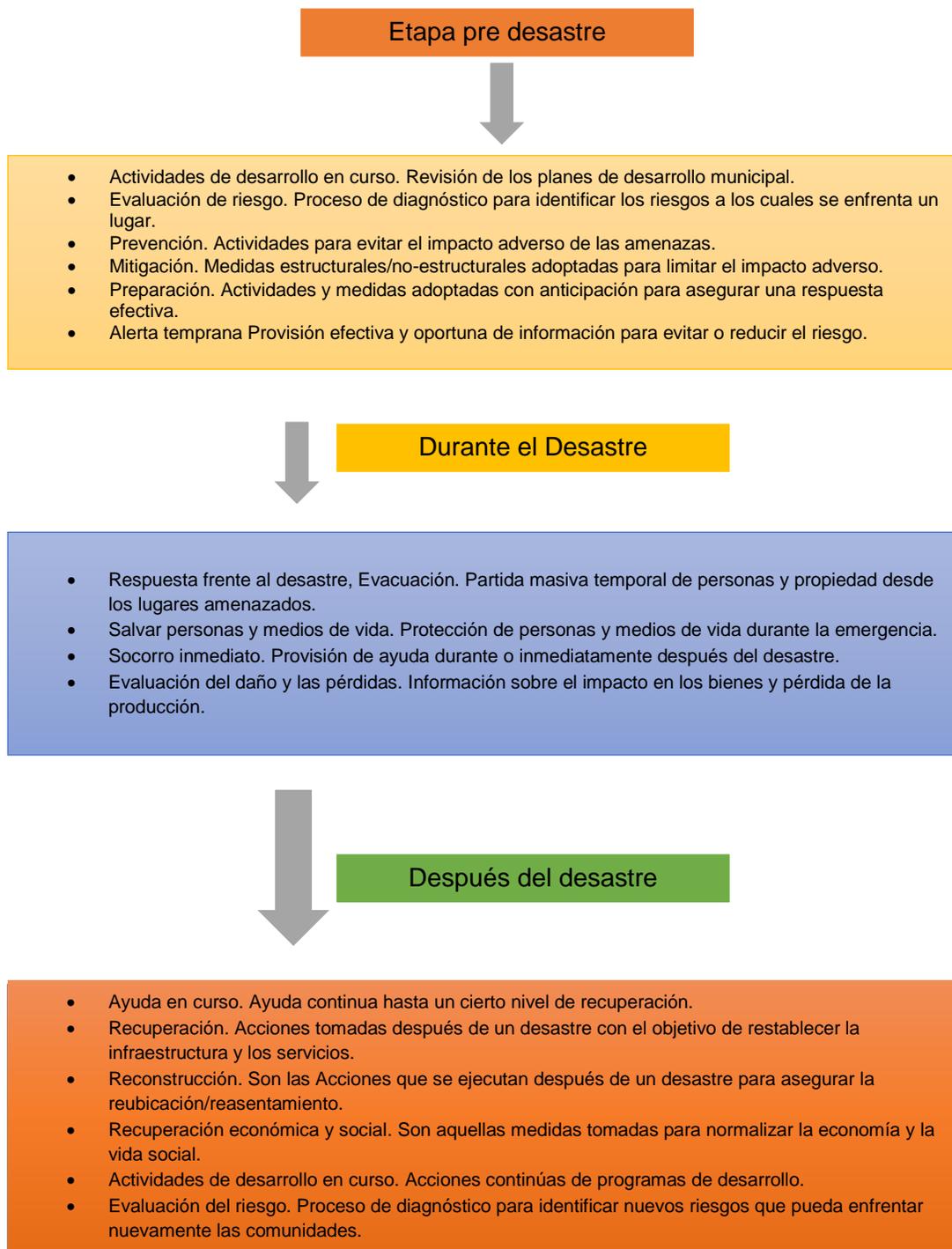


Figura 2. Etapas en la gestión del riesgo de los desastres

Fuente: FAO, Organización de las Naciones Unidas (Baas, 2009).

2.2. Evaluación multicriterio (EMC)

La toma de decisiones multicriterio debe ser entendida como un mundo de conceptos, aproximaciones, modelos y métodos, para jerarquizar seleccionar o rechazar objetos, con base en una evaluación (expresada por puntuaciones, valores e intensidades de preferencia) de acuerdo a varios criterios (Bruyn, 1989).

De acuerdo a Rinner (1997), las técnicas multicriterio se basan en el establecimiento valores asociados a cada alternativa de acuerdo a los objetivos y preferencias de los decisores. Los criterios pueden ser de naturaleza cuantitativa o cualitativa, y con frecuencia exhiben variabilidad espacial. Las técnicas convencionales de EMC, no tienen la capacidad de abocarse a la irregular distribución espacial de los valores de los criterios en la evaluación de alternativas.

De acuerdo a Voogd (1983), la EMC puede definirse como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de tomas de decisiones. El fin básico de las técnicas de la EMC es investigar un número de alternativas bajo la luz de múltiples criterios y objetivos en conflicto. Según esto, se pueden generar soluciones compromisos y jerarquizaciones de las alternativas de acuerdo a su grado de atracción. La toma de decisiones multicriterio se puede entender como un mundo de conceptos, aproximaciones modelos y métodos para auxiliar a los centros de decisores a describir, evaluar, ordenar y jerarquizar, seleccionar o rechazar objetos, con base en una evaluación, expresada por puntuación, valores o intensidades de preferencia, de acuerdo a varios criterios. Estos criterios pueden representar diferentes aspectos de la realidad.

2.3. Los Sistemas de Información Geográfica (SIGs)

Desde hace varios años las tecnologías geográficas han sufrido un aumento en el uso en diversas actividades de la vida diaria, su alta aplicabilidad, así como la obtención de resultados han propiciado que estas herramientas sean muy difundidas.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIGs), son herramientas informáticas diseñadas para el manejo, gestión, análisis, representación y modelado de los fenómenos territoriales. Es decir, cualquier tema que se pueda situar en un conjunto de lugares del espacio geográfico puede, en principio, ser manejada con estos instrumentos (Sendra, 2004). Un SIG es un sistema para la gestión de datos geográficos especializados, que pueden tomar datos de diversas fuentes

geográficas, visualizar la información desde la base de las coordenadas, y analizar y recuperar información espacial (Na y Banerjee, 2015).

La potencialidad de los SIG ha hecho posible conjuntar de diferentes maneras procesos cada vez más complejos que se presentan sobre la superficie terrestre, por ello la importancia de generar nuevas metodologías las cuales permitan realizar geoprocursos, los cuales son operaciones espaciales para generar análisis visuales del territorio. Esto facilita a los investigadores encontrar patrones espaciales que pueden aplicarse al momento de gestionar un riesgo.

En los riesgos naturales los SIG son una herramienta muy útil para identificar las zonas más vulnerables dentro de un área geográfica, esto por la visualización de elementos del relieve que permiten delimitar con mayor precisión estas zonas.

Un SIG es una herramienta capaz de combinar información gráfica (mapas) y alfanumérica (estadísticas) para obtener una información derivada sobre el espacio (Sendra, 2004). En contexto, los SIGs, cuyos antecedentes datan de varias décadas atrás, se han posicionado como una tecnología básica, imprescindible y poderosa, para capturar, almacenar, manipular, analizar, modelar y presentar datos espacialmente referenciados. Se trata, por tanto, de una categoría dentro de los sistemas de información que se especializan en manejar datos espaciales, con las particularidades y requerimientos que conlleva este carácter (Moreno, 2006).

La automatización digital permite ver al SIG de cuatro formas diferentes, según Buzai (2013), siendo:

- Orientación hacia su entorno de trabajo, como un sistema que se basa en el uso de computadoras para el tratamiento de datos espaciales
- Orientación hacia su funcionalidad, como un sistema que permite la obtención, el almacenamiento, el tratamiento y el reporte de datos espaciales.
- Orientación hacia su contenido, como bases de datos que contienen información referenciada espacialmente.
- Orientación hacia su propósito, como sistema que sirve de apoyo al proceso de toma de decisiones en materia de gestión y planificación territorial.

La aplicación de los SIGs permite operar aislada y conjuntamente con las más diversas variables, espacialmente consideradas. Esta forma de manejo de la información geográfica, permite también el análisis multicriterio dada la posibilidad de combinar y valorar simultáneamente los criterios (las bases para la toma de decisiones) con sus factores (los aspectos que los fortalecen o debilitan) a través

del manejo de sus atributos (las variables) dentro de unas determinadas reglas de decisión y valoración (Cano, 1996).

2.4. El Análisis Espacial Multicriterio (AECM)

El Análisis Espacial Multicriterio (AEMC) es un proceso que combina y transforma los datos geográficos (la entrada) en una decisión (la salida). Este proceso consiste en procedimientos que involucran la utilización de los datos geográficos, la toma de decisiones, la manipulación de los datos y preferencias según las reglas de decisión especificadas. La diferencia con la evaluación multicriterio convencional es el número grande de factores necesarios a identificar y considerar, así como la magnitud de las relaciones mutuas entre estos factores, los cuales hacen el AEMC mucho más complejo y útil (Malczewski, 1999).

El AEMC permite realizar las siguientes operaciones mediante herramientas SIG:

1. Evaluar diferentes alternativas para plantear solución de un problema de decisión espacial.
2. Evaluar impactos ambientales provocados por el accionar humano, a partir de la consideración de las variables naturales y antrópicas.
3. Generar escenarios que permitan disminuir la incertidumbre en relación a la toma de decisiones.
4. Evaluar alternativas.

El AEMC requiere datos en una localización geográfica de alternativas y/o datos geográficos en valores de criterios. La obtención de información en el proceso de la toma de decisiones usando el análisis multicriterio se procesan con tecnologías SIG.

La aplicación de ambos términos de acuerdo a Sharifi (2006) son herramientas que pueden apoyar a los tomadores de decisiones logrando mayor efectividad y eficacia en el proceso de toma de decisión espacial. Según el autor, la combinación de los métodos de EMC combinados con el análisis espacial, es lo que da lugar al AEMC, y esta metodología permite generar información pertinente sobre los problemas de decisión espaciales a tomadores de decisiones.

Existen varios componentes dentro de la AEMC los cuales son de suma importancia para realizar el proceso en un entorno de un sistema de información geográfica, de acuerdo a Cano (1996), los componentes más importantes son los objetivos, criterios, estos a su vez se subdividen en factores y restricciones. Las reglas de decisión, funciones y por último la evaluación. A continuación, se definen conceptos utilizados en el AEMC.

2.4.1. Objetivo

De acuerdo al objeto de este estudio, un objetivo se puede entender como una función a desarrollar, estos pueden ser múltiples en determinados problemas de planificación, decisión o localización / asignación de actividades, con lo cual nos podemos plantear una evaluación multiobjetivo.

Los objetivos son el fundamento para desarrollar un proyecto de AEMC y su determinación depende del problema en cuestión. De forma general, se plantea una evaluación con múltiples objetivos, generalmente complementarios o conflictivos (Eastman, 1995).

2.4.2. Criterios

Son aquellos que dan la base para la toma de una decisión, estos pueden ser medidos y evaluados, es la evidencia sobre la cual se basa una decisión (Eastman, 1995). El autor Voogd (1983) lo define como: “*un aspecto medible de juicio, por el cual una dimensión de las alternativas bajo consideraciones puede ser caracterizada*”. Estos pueden ser de dos tipos: *factores* y *limitantes*.

Los *factores* son criterios que realzan o detractan la capacidad de asentamiento de una alternativa específica para la actividad en consideración, éste por lo tanto debe ser medido en una escala continua. Por ejemplo, en la evaluación de riesgos en caso de un huracán se podría establecer el criterio de que las zonas con menor pendiente tengan un valor más alto que las zonas más inclinadas. Por lo tanto, las mejores áreas según el criterio de la pendiente para evacuar a la población, en caso de un huracán son las de menor pendiente.

Por otra parte, las *limitantes* o *restricciones* de acuerdo a López (2009) son criterios que restringen la disponibilidad de algunas alternativas según la actividad evaluada; con este tipo de criterio se excluyen varias categorías de la capa analizada para la evaluación; es decir, se genera una capa binaria (0/1) en la cual un código representa las alternativas susceptibles de ser elegidas para la actividad, y otro, la no disponibilidad para la actividad. Por ejemplo, a menos de 40 metros de un curso de agua no se permite realizar ningún tipo de actividad (0) y fuera de esa área si se permite realizar actividades (1). Una limitante también puede ser expresada como alguna característica que la solución final debe poseer, por ejemplo, que las zonas consideradas para ubicar a la población no superen una distancia determinada.

2.4.3. Alternativas

Según Acosta (2011), las alternativas están representadas por objetos o unidades espaciales, celdas en un modelo ráster o bien polígonos, líneas o puntos en un modelo vectorial, es decir representan un sitio individual, constituyendo así la capa temática de objetos espaciales. Desde el punto de vista de la planificación del territorio se trata de cada uno de las partes del territorio susceptibles a ser evaluadas y sobre las que se realizará la selección final.

Cabe destacar la enorme cantidad de alternativas que pueden formarse a partir de una capa temática, en el caso de un modelo ráster estaría representado por cada una de las celdas que conforman la capa. Así mismo, se indica que la mayoría de los métodos de EMC han sido desarrollados para evaluar un número pequeño de alternativas sobre la base de un número determinado de criterios, tomados en cuenta para decidirse por algunos de estos métodos.

2.4.4. Regla de decisión

La regla de decisión (Abu, 2013) es un procedimiento a través del cual se obtiene una evaluación particular. Logrando comparar escenarios a través de estas distintas evaluaciones con el fin de variar alguno de sus aspectos en el caso de ser necesario. Esto es posible ya que una regla de decisión está estructurada a partir de una serie de procedimientos (aritmético-estadísticos) que permiten integrar los criterios establecidos en un índice de simple composición; asimismo, puede proporcionar la manera de comparar las alternativas utilizando dicho índice. La regla de decisión puede realizar a priori dos tipos de procedimientos: la función de selección y la selección heurística.

2.4.5. Evaluación

Una vez que la regla de decisión ha sido estructurada, el proceso de aplicarla sobre las capas - criterio se llama evaluación, que producirá finalmente el modelo de decisión (Cano, 1996). La regla de decisión incluye procedimientos para llevar a cabo el AEMC, así como para actuar sobre los resultados de la evaluación.

El objetivo inicial de la evaluación puede desglosarse en varios objetivos específicos que indiquen como van actuar con la regla de decisión, así mismo los criterios son estructurados en buena medida en función de los objetivos propuestos, es decir, cada objetivo puede ser representado por uno o varios criterios, que con cuya optimización se lograrán los objetivos.

El AEMC es un proceso de combinación y transformación de datos geográficos en una decisión, este proceso implica la utilización de datos geográficos, la preferencia de los tomadores de decisiones y la manipulación de datos y preferencias acordes con la regla de decisión (López, 2009).

Capítulo 3. Caracterización geográfica de la zona de estudio

La bahía de Altata pertenece al municipio de Navolato en el estado de Sinaloa, conectada al Océano Pacífico, a 62 km al oeste de Culiacán (la capital del estado) y a 250 km de Mazatlán, el puerto con el que más interacción tiene en la región. Se trata de una localidad altamente pesquera y de actividades recreativas (INEGI, 2010). En la Figura 3 se muestra la ubicación geográfica de la localidad de Altata, Sinaloa.

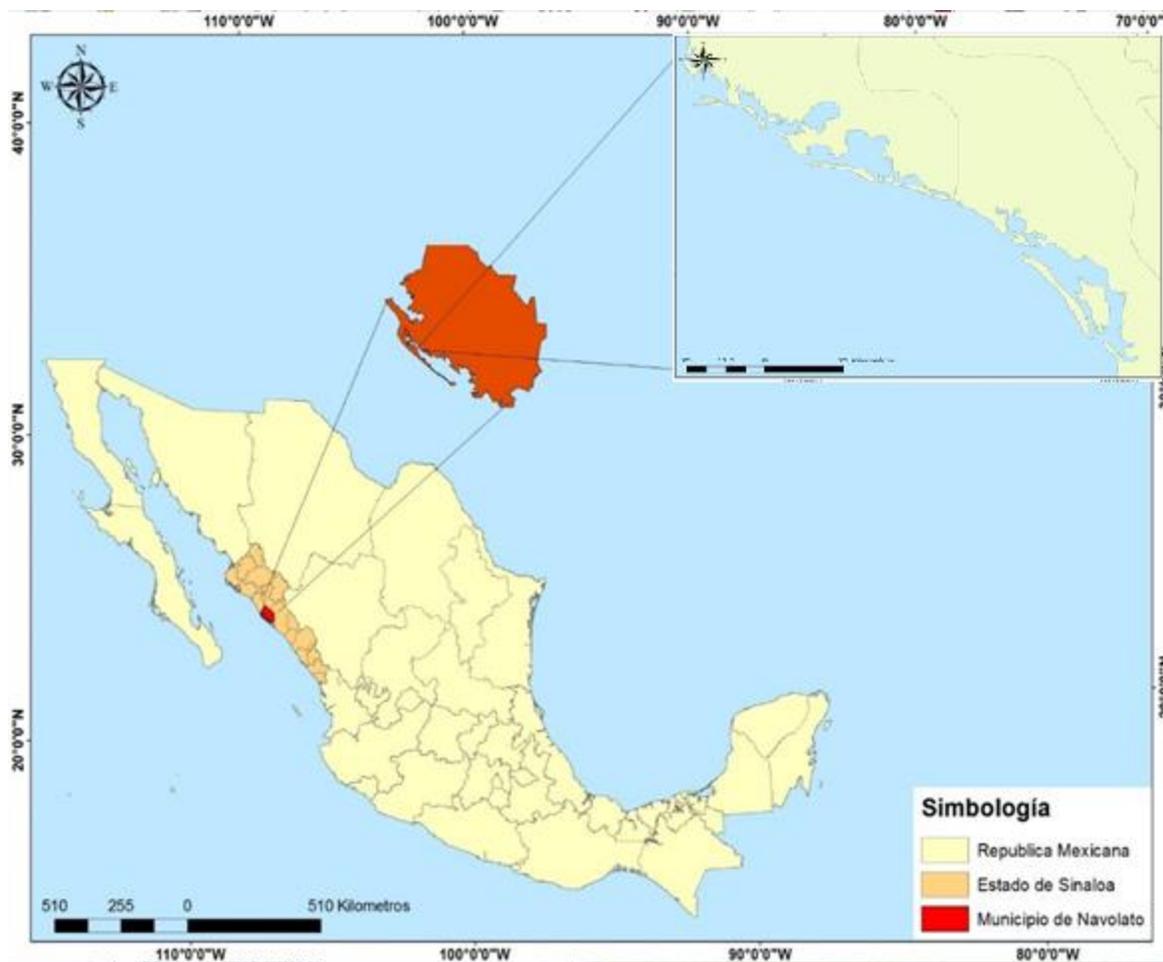


Figura 3. Mapa de ubicación del Municipio de Navolato, Sinaloa

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI.

3.1. Climatología

Tomando como base la clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García (García, 1998), el municipio de Navolato en donde se encuentra la bahía de Altata, cuenta con un clima cálido con lluvias en verano y escasas a lo largo del año. La temperatura media anual es de 24° C, la precipitación total anual oscila entre de los 433.5 a los 511.6 milímetros. Esto se puede apreciar en la Figura 4.

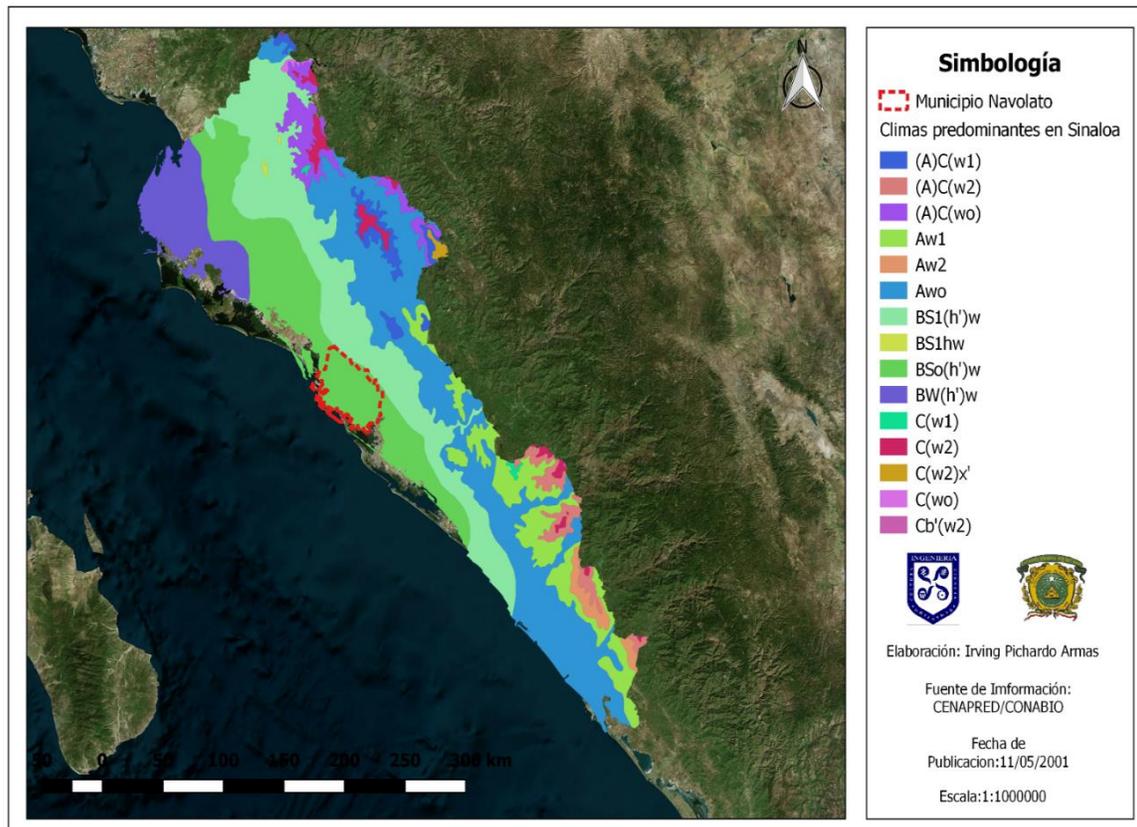


Figura 4. Mapa de climas predominantes Sinaloa, México

Fuente: Elaboración propia con información del CENAPRED.

3.2. Edafología

Según información del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (INEGI, 2009), dentro del municipio de Navolato Sinaloa, pueden encontrarse principalmente cuatro tipos de suelo los cuales son: cambisol, litosol, solonchak y vertisol. Los suelos de tipo cambisol son suelos jóvenes, poco desarrollados y se pueden encontrar en cualquier tipo de vegetación o clima, excepto en los de zonas áridas. Se caracterizan por presentar en el subsuelo una

capa con terrones que presentan vestigios del tipo de roca subyacente y que además puede tener pequeñas acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, fierro o manganeso. Los suelos de tipo litosol se encuentran en todos los climas y con muy diversos tipos de vegetación, en todas las sierras de México, barrancas, lamerías y en algunos terrenos planos. Se caracterizan por su profundidad menor de 10 centímetros, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido. Los tipos de suelo solonchak son literalmente suelos salinos. Se presentan en zonas donde se acumula el salitre, tales como lagunas costeras y lechos de lagos, o en las partes más bajas de los valles y llanos de las regiones secas del país, teniendo alto contenido de sales en todo o alguna parte del suelo. Los suelos de tipo vertisol son suelos de climas templados y cálidos, especialmente de zonas con una marcada estación seca y otra lluviosa.

La vegetación natural va de selvas bajas a pastizales y matorrales. Se caracterizan por su estructura masiva y su alto contenido de arcilla, la cual es expandible en húmedo formando superficies de deslizamiento llamadas facetas que por ser colapsables en seco pueden formar grietas en la superficie o a determinada profundidad. En la Figura 5 se presenta esta información.

3.3. Hidrografía

El Rio Culiacán es originado en la confluencia del Humaya y Tamazula. El Humaya nace en Durango y recoge las aguas de varios arroyos, entre ellos, el de Badiraguato. El Tamazula recoge aguas, nace en Durango y se une al Humaya al llegar a la ciudad de Culiacán. Desde su origen, estas aguas recorren 252 kilómetros y desemboca frente a la península de Lucenilla ubicada en Culiacán. Tiene una cuenca de 14,200 kilómetros cuadrados. La bahía de Altata se localiza en la región marítima denominada (Pacífico Centro).

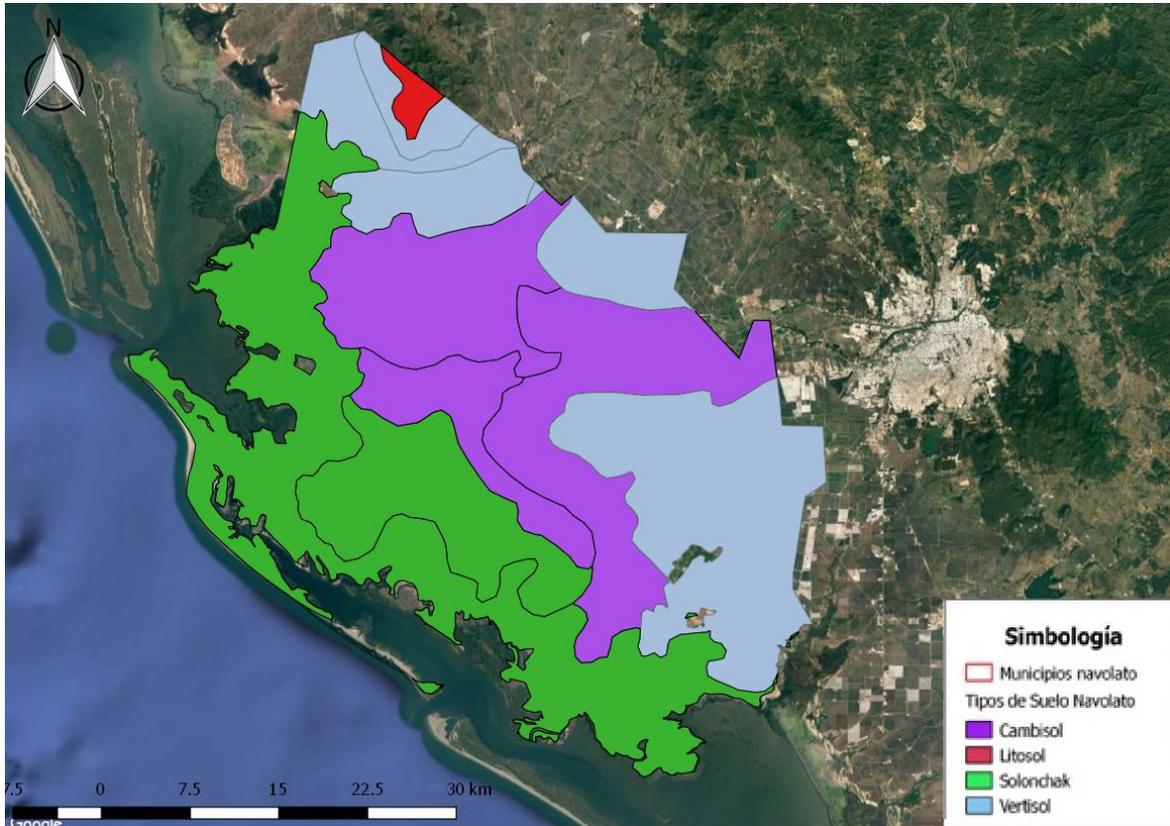


Figura 5. Mapa de tipos de suelo Navolato, Sinaloa

Fuente: Elaboración propia con información del CENAPRED/CONABIO.

3.4. Demografía

De acuerdo a datos consultados en el Sistema de Integración Territorial (ITER) correspondiente a los datos del Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2010), la localidad de Altata ubicada en el municipio de Navolato, cuenta con una población total de 2001 habitantes, de los cuales 1022 son hombres y 979 mujeres. La localidad de Altata cuenta con 972 viviendas de las cuales 42 están deshabitadas. La población económicamente activa de la localidad de Altata es de 776 personas, su actividad principal es la pesca. Hasta el año 2010 se presentaba una población aproximada de 14 personas las cuales presentaban algún tipo de discapacidad. Se cuenta con una población que se encuentra en el rango de los 15 a 64 años, siendo un total de 1298 personas.

Por otra parte, la población más joven que se encuentra en rangos de edades de 0 a 2 años es de 136 personas.

Por último, el porcentaje de la población más longeva que se encontraba en un rango de edad de más de 60 años es de 152 personas. Esta información se resume en la Figura 6.

Clave del municipio	Municipio	Habitantes (año 2015)
001	Ahome	449 215
002	Angostura	47 207
003	Badiraguato	31 821
004	Concordia	27 157
005	Cosalá	16 292
006	Culiacán	905 265
007	Choix	33 027
008	Elota	53 856
009	Escuinapa	59 436
010	El Fuerte	100 459
011	Guasave	295 353
012	Mazatlán	502 547
013	Mocorito	45 351
014	Rosario	53 773
015	Salvador Alvarado	81 109
016	San Ignacio	21 442
017	Sinaloa	88 659
018	Navolato	154 352

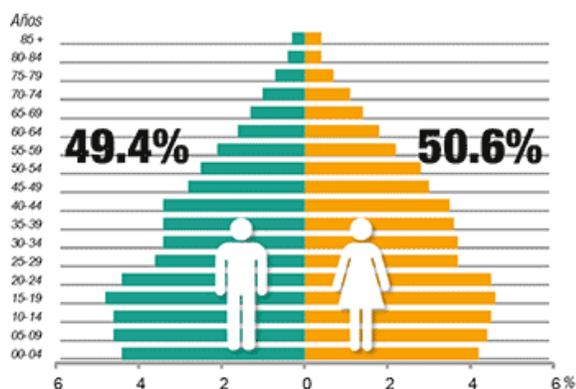


Figura 6. Distribución de la población en el Municipio de Navolato

Fuente: INEGI.

Capítulo 4. Propuesta metodológica

En este capítulo se presenta un esquema de trabajo consistente en diferentes etapas las cuales permitieron generar los lugares con mejor aptitud para establecer puntos de reunión. En la Figura 7 se observa de manera general un diagrama de la propuesta metodológica en el cual se ilustra el flujo de información que se tiene que llevar a cabo para cumplir con cada uno de los objetivos los cuales facilitarán la elección de estos elementos.

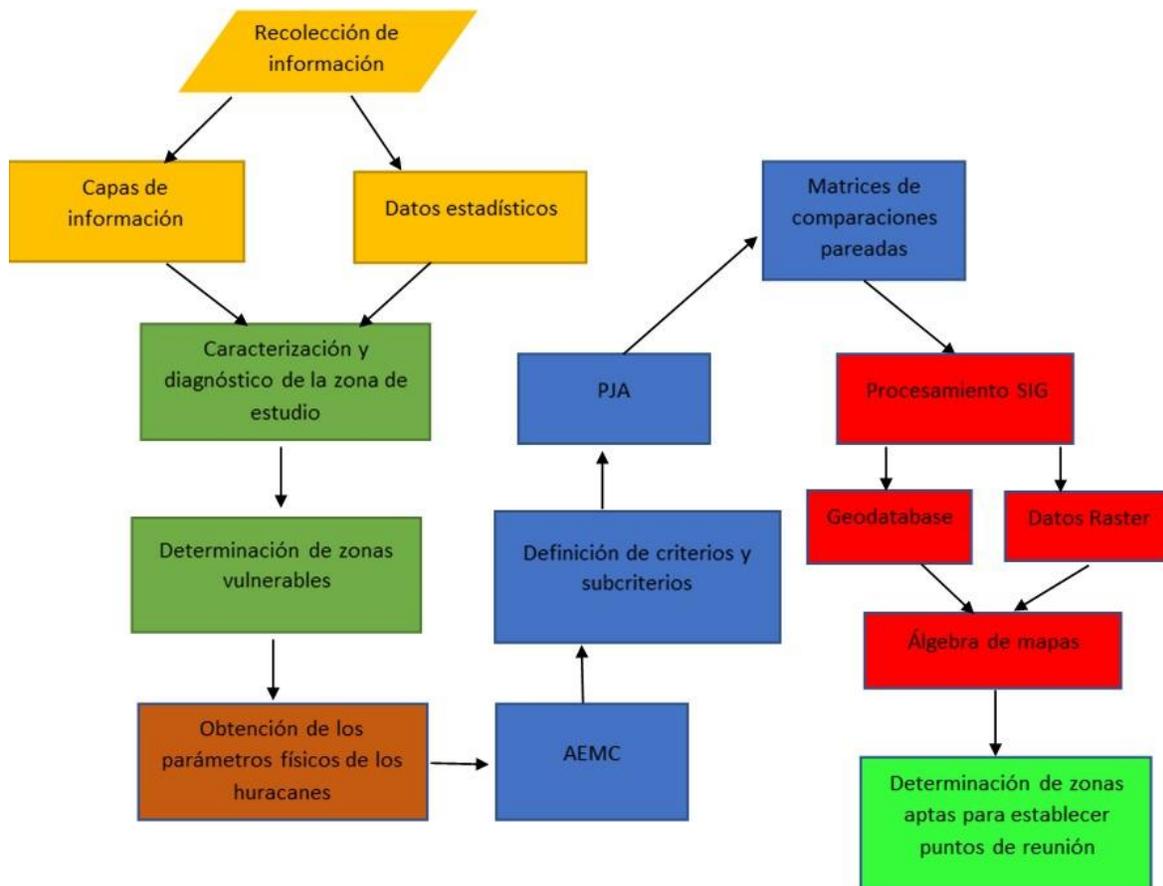


Figura 7. Propuesta metodológica

Fuente: Elaboración propia.

En las siguientes secciones se describe la propuesta metodológica considerada para la realización del presente Trabajo Terminal de Grado.

4.1 Recolección de información

La recolección de información es la parte inicial del proceso metodológico. Es importante que los datos sean obtenidos de diversas fuentes oficiales tales como el INEGI y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Esta información permitirá caracterizar la zona de estudio. Por otra parte, se facilitará la posterior definición de criterios, subcriterios y alternativas.

4.1.1. Capas de información

Las capas de información para el caso de estudio son representadas por archivos conocidos como archivos tipo *shape* (*shapefiles*) el cual es un formato sencillo y no topológico que se utiliza para almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas. Las entidades geográficas de un archivo *shape* se pueden representar por medio de puntos, líneas o polígonos (áreas). El espacio de trabajo que contiene archivos *shape* también puede incluir tablas del en formato dBASE, el cual es un formato estándar que permite el almacenamiento de datos mediante tablas, las cuales son compatibles en la actualidad con la mayoría de los manejadores de bases de datos, y que pueden almacenar atributos adicionales que se pueden vincular a las entidades de un archivo *shape*.

El formato anteriormente descrito permite trabajar con datos geográficos y su correspondiente base de datos (tabla de atributos). Con la ayuda del SIG es posible realizar procesos que van desde los más sencillos hasta cuestiones de análisis más complejas lo cual permitirá modelar algún fenómeno o temática que se presente sobre la superficie terrestre.

En la Figura 8 se muestra una representación de capas de información en un SIG. En dicha figura se observa una representación la cual permite la realización de procesos con la información, tales como: la densidad de población, el total de viviendas, además de realizar geoprosesos como los son la unión, la intersección, y la creación de buffers, por mencionar algunos, los cuales pueden ser representados espacialmente.

Cabe destacar que dentro de un SIG no solo se pueden representar fenómenos sociales, sino también temáticas geográficas propias del campo de las ciencias de la tierra como lo son: la edafología, los tipos de suelo, hidrología, geomorfología, climatología, etcétera.

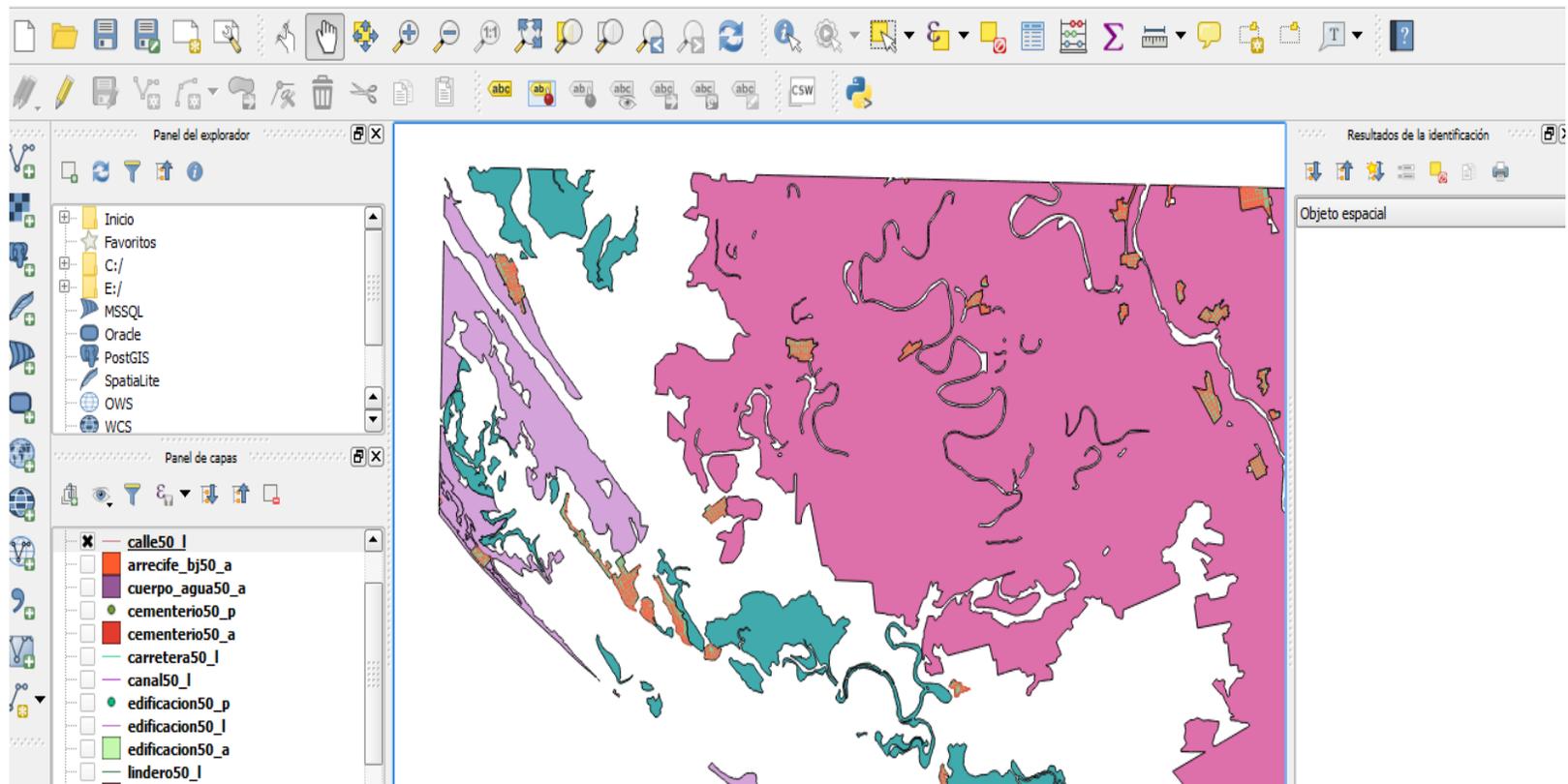


Figura 8. Representación de las capas de información en un SIG.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Datos estadísticos

El conocimiento de los datos estadísticos le permite al analista adentrarse en aspectos importantes como lo son para el caso de estudio la distribución de la población, ya que resulta conveniente contar con un panorama general del número de habitantes que radican en un lugar, para de alguna manera contar con una idea inicial del posible impacto que podría tener un huracán en un sitio determinado. Por otra parte, conocer la dinámica de población ya sea dentro del territorio nacional, estatal o municipal, permite llevar un registro espacio-temporal, por medio del cual se puede observar si los valores numéricos se incrementan, decrecen o se mantienen estables. De esto modo, es una aproximación inicial al conocimiento de la realidad y a los primeros elementos para posibles inferencias acerca de la magnitud de las eventuales acciones. La información debe cumplir con el principal requisito de veracidad, de ahí la importancia de su obtención a través de la consulta de fuentes oficiales.

Para el caso de estudio se realizó una búsqueda en el ITER (INEGI, 2010), el cual es un sistema de consulta dinámico, disponible en la página oficial del INEGI, que muestra información sociodemográfica de interés, a nivel nacional y estatal, con base en todas las localidades habitadas del país. Este sistema permite al usuario la consulta de indicadores sociodemográficos definidos para cada proyecto censal mediante la generación de consultas personalizadas que se pueden construir con un asistente que ayuda a determinar algún parámetro que requiera ser observado para un indicador determinado, de acuerdo con el nivel geográfico requerido. Con estos requisitos, se genera un reporte de salida con la información resultante para exportarse a formatos Excel o texto.

En la Tabla 1 se resumen la información demográfica más importante, la cual será representada de forma espacial.

Tabla 1. Resumen demográfico de la zona de estudio

Municipio o localidad	Población total	Total, de viviendas	Población de 0 a 2 años	Población de 65 años y mas	Población con limitación en la actividad	Población sin acceso a servicios de salud
Navolato	135,603	46,145	7,984	8,430	3,778	31,145
Altata	2,001	972	136	94	58	407

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI.

Para cartografiar esta información poblacional, se realizaron diversos procesos. En primer término, se descargó la información estadística del catálogo de claves y localidades de INEGI, el cual contiene información relacionada con cada uno de los municipios y localidades del país. Esto permite mediante el procesamiento en un SIG, generar las salidas cartográficas correspondientes (Figura 9).

	CVE_MUN	CVE_LOC	NOM_LOC	AMBITO	LAT_DEC	LON_DEC	ALTITUD	POB	VIVI
0	18	1	Navolato	U	24.76721900000...	-107.696759999...	12	29153	7482
1	18	2	Las Aguamitas	R	24.69873499999...	-107.522201999...	17	4	1
2	18	3	Aguapepito	R	24.59395700000...	-107.673756999...	4	634	172
3	18	4	Licenciado Alfred...	R	24.70294200000...	-107.821844999...	8	736	193
4	18	5	Los Algodones	R	24.87761700000...	-107.931624999...	-1	7	3
5	18	6	Altata	R	24.63577000000...	-107.931038000...	3	2001	477
6	18	8	Los Arredondo (L...	R	24.78420800000...	-107.590446000...	19	509	119
7	18	9	Bachigualatillo	R	24.71422000000...	-107.712361000...	10	306	76
8	18	10	Bachimeto	R	24.74128200000...	-107.743240000...	7	986	250
9	18	11	Bachoco	R	24.79500799999...	-107.805919000...	6	549	137
10	18	14	La Bandera	R	24.70066299999...	-107.863951999...	5	886	207
11	18	16	Baricuelto Dos	R	24.71880600000...	-107.721863999...	11	609	141
12	18	17	Bariometo	R	24.76704700000...	-107.660511000...	15	1171	301
13	18	18	Bariometo Segundo	R	24.65651300000...	-107.895579999...	2	299	73
14	18	19	El Batall?n	R	24.76441099999...	-107.590236000...	19	673	151
15	18	20	Los Rebolesmas d	R	24.61255300000...	-107.554203000...	5	736	54

Figura 9. Integración de información poblacional (INEGI) en un SIG

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI.

4.2. Caracterización y diagnóstico de la zona de estudio

Una caracterización nos permite conocer lo que hay en un lugar determinado, es decir nos puede ayudar a comprender las interrelaciones que se encuentran en el espacio geográfico. La caracterización geográfica también permite generar un inventario sobre el cual se pueden apoyar las decisiones ya que al conocer lo que se encuentra a nuestro alrededor es más fácil implementar acciones encaminadas hacia un propósito determinado. Por ello la importancia de conocer diversas variables de interés las cuales son definidas en función del objetivo en cuestión.

Por otra parte, el diagnóstico de la zona de estudio nos permite conocer el estado actual de distintas variables espaciales como lo son la población, el clima, la edafología, el relieve, la vegetación, etcétera.

En Gómez (1995), se menciona la importancia de la tendencia física que se aplica en el estudio de la superficie terrestre; la corológica o regional estudia las diferentes áreas en que se divide la superficie terrestre; la espacial estudia la localización y distribución de los fenómenos geográficos en la superficie terrestre; la paisajística estudia la fisonomía de la superficie terrestre con las diferentes clasificaciones de unidades; la ecológica estudia las relaciones de los seres humanos y el medio geográfico con las interrelaciones, interdependencias, interconexiones e interacciones; y la social considera a las sociedades humanas en su distribución espacial, como grupos espaciales con sus manifestaciones culturales en el conjunto de las relaciones de los mismos con la naturaleza.

De acuerdo a lo anterior se puede deducir la aportación geográfica a la representación para el caso de estudio aplicado a la gestión de riesgos de huracanes, ya que es posible conocer la localización, la distribución, las relaciones humanas con el medio geográfico, así como la organización del mismo. De este modo se resalta la aportación geográfica a la gestión ambiental en áreas de localización, distribución, diferenciación, estudio de relaciones de los seres humanos con el medio geográfico, así como la organización del espacio geográfico. Todo lo anterior puede ser aplicado y adaptado a la GIR.

4.2.1. Determinación de las zonas vulnerables

Con la ayuda de los procesos cartográficos descritos anteriormente, se pueden determinar los lugares que cuenten con un menor o mayor grado de vulnerabilidad. Para efectos del presente Trabajo Terminal de Grado, se entiende por vulnerabilidad a la población que tenga un mayor grado de exposición a los huracanes. Se representará a la vulnerabilidad desde el punto de vista demográfico tomando en cuanto la cantidad de habitantes.

Cabe mencionar que se pueden realizar análisis de vulnerabilidad más complejos y con mayor número de variables, para el caso de estudio se omiten diferentes enfoques debido a que, para el objetivo general del trabajo terminal y para los objetivos trazados, el conocer la distribución de la población ayuda a comprender el daño que podría ocasionar un huracán. Esto se describirá más adelante.

4.3. Obtención de los parámetros físicos de los huracanes

Como parte de la generación de información geográfica, fue necesaria la obtención de los parámetros físicos de un huracán que ocasionan un peligro como lo son: la velocidad del viento, la velocidad del flujo de agua y el nivel de inundación.

Cabe mencionar que, esta parte fue proporcionada por un especialista adscrito a este programa de Maestría en Ingeniería de la Cadena de Suministro, el Dr. Óscar Cruz Castro, Investigador Catedrático del CONACYT, quien es el experto en la realización de los modelos y las simulaciones para la generación de estos parámetros

4.4 Análisis Espacial Multicriterio (AEMC)

El AEMC es una herramienta en la toma de decisiones la cual consiste en la integración de alguna metodología propia del campo de la toma de decisiones implementado en un sistema de información geográfica.

Lo anterior permite realizar operaciones entre capas de información (archivos tipo *shape*), para poder cumplir con un objetivo el cual debe de ser definido en función de una serie de criterios y subcriterios los cuales van a definirse y seleccionarse de acuerdo a las necesidades de la problemática a resolver.

4.4.1. Definición de criterios y subcriterios en el PJA

De acuerdo a Rinner (1997) la evaluación de técnicas multicriterio se basa en valores asociados a cada alternativa y los objetivos y preferencias de los decisores; los criterios pueden ser de naturaleza cuantitativa o cualitativa, y con frecuencia exhiben variabilidad espacial. Las técnicas convencionales de EMC, como la programación compromiso no tienen la capacidad de abocarse a la irregular distribución espacial de los valores de los criterios en la evaluación de alternativas.

De acuerdo a Tomas L. Saaty el método PJA se fundamenta en tres principios fundamentales los cuales son: construcción de las jerarquías, establecimiento de prioridades y consistencia lógica. Las jerarquías dentro de la metodología PJA son aquellas que conducen a un sistema hacia un objetivo deseado, y se pueden ejemplificar como la solución de conflictos, el desempeño eficiente o la aptitud. En el **Anexo A** se presenta con más detalle la metodología PJA.

Para el caso de estudio se definió una matriz de comparaciones pareadas la cual fue determinada por capas de información las cuales fueron ponderadas en formato vectorial (formato el cual para su construcción geométrica se representa por puntos líneas y polígonos).

4.5. Procesamiento SIG

Para realizar el procesamiento en un SIG, se deben definir el objetivo, los criterios y subcriterios, los cuales nos permitirán obtener las matrices de comparaciones pareadas en función de las decisiones de un grupo de especialistas como se describe en la Tabla 2.

Tabla 2. Explicación de las valoraciones en comparaciones pareadas en la metodología PJA

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	...	Criterio n
Criterio 1					
Criterio 2					
Criterio 3					
...					
Criterio n					

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI.

Como se mencionó anteriormente en primer lugar tiene que estar definido un objetivo, para posteriormente realizar una matriz de comparaciones pareadas como se ejemplifica en la Tabla 2, la cual describe cada uno de los criterios, los cuales se ponen de manera vertical y horizontal para posteriormente ir dando valores comparando filas con columnas en función de una escala de preferencias.

El proceso anterior consiste en la comparación de importancia entre dos criterios, para establecer cuál de las variables que son comparadas no ayudará de mejor manera a cumplir con el objetivo. Cabe mencionar que las comparaciones siempre deben de empezar iniciar desde la fila hacia la columna.

Una vez terminada la realización de las comparaciones pareadas se procede a generar en formato ráster (transformación de capas de información vectoriales a formato matricial, es decir cada pixel tiene un valor en función de la clasificación generada con los *shapfiles*) de cada una de las capas de información comparadas para poderlas procesar dentro del SIG utilizando un proceso llamado algebra de mapas, el cual consiste en la aplicación de operaciones con capas de información

para así generar un resultado y determinar la aptitud de un lugar en función de la escala de preferencias antes descrita.

4.6. Determinación de zonas aptas para establecer puntos de reunión

Una vez realizados los procesos anteriores, se genera un mapa final para ilustrar los posibles lugares a ser candidatos para puntos de reunión para evacuar a la población.

Capítulo 5. Aplicación al caso de estudio

Este proceso metodológico se aplicó al caso de estudio en el municipio de Navolato Sinaloa, en la bahía de Altata, esto debido al aumento de los huracanes en años recientes dentro de la zona de estudio. Se llevó a cabo un proceso de recolección de información estadística y de capas de información dentro de la zona de estudio, para así poder realizar mapas en los que se representen los efectos de los huracanes sobre la superficie terrestre.

5.1. Espacio físico y universo de estudio

La mayor parte de la extensión territorial del Municipio de Navolato, Sinaloa está delimitada por terrenos costeros, debido a su ubicación geográfica. Previamente se realizó una caracterización de la zona de estudio para conocer las condiciones físico-geográficas sobre las cuales se encuentra este municipio. En la Figura 10 se muestra la ubicación geográfica de la región de estudio.



Figura 10. Ubicación geográfica del área de estudio

Fuente: Elaboración propia con información del INEGI.

5.2. Recolección de información

Dentro de la localidad del Municipio de Navolato, en Sinaloa la distribución de la población para las localidades de la bahía de Altata , se representa en la parte inferior izquierda con base a información estadística de INEGI, como se observa en la Figura 11.

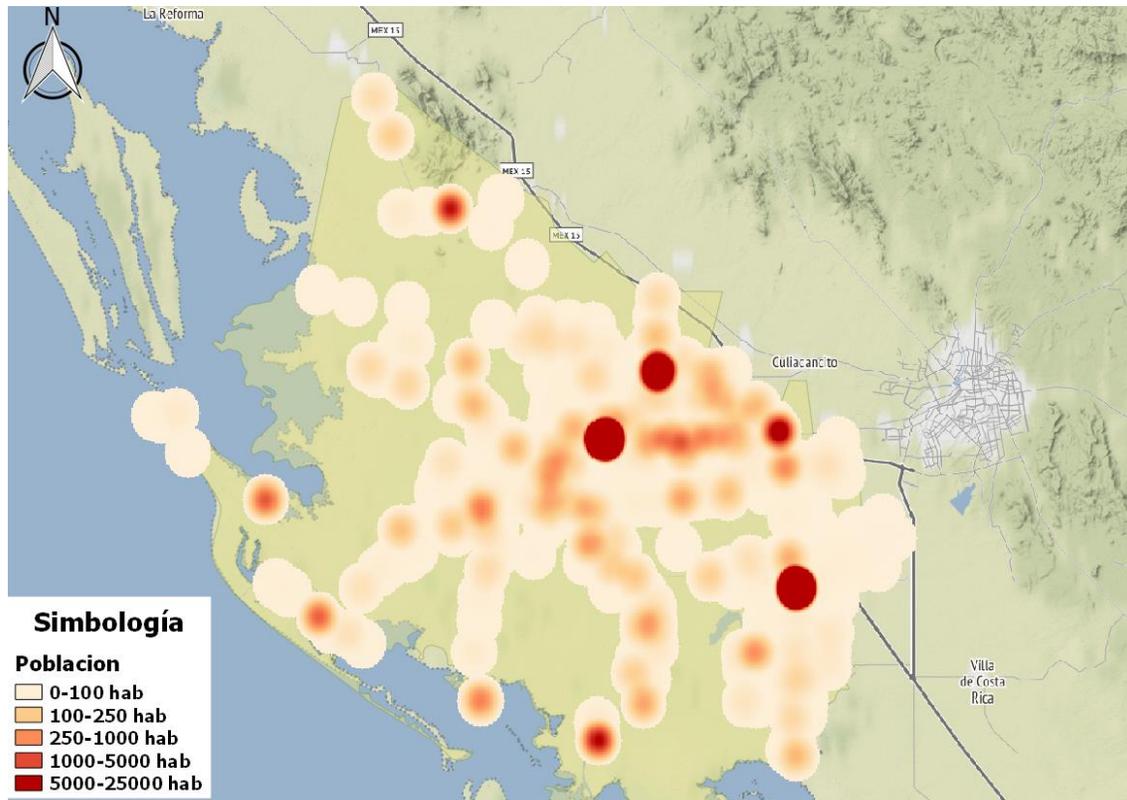


Figura 11. Representación de información demográfica en un SIG

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI.

Como se observa en la Figura 11 a población dentro del municipio representa una densidad baja en comparación con otros municipios de México. En color rojo se representan los lugares con mayor cantidad de población y en colores más tenues se representan los lugares que tienen poblaciones menores a 5,000 habitantes. Para la zona de estudio, su color se representa por un punto color naranja debido a la cantidad de población que se encuentra en la localidad que son 2001 habitantes mismos que entran dentro del cuarto rango de clasificación.

5.3. Obtención de capas de información

Para la obtención de capas de información en archivos con formato *shape*, fue necesario recurrir a diversas fuentes oficiales como lo son el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO) y el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) las cuales trabajan constantemente en la generación y actualización de capas de información con el objetivo de mantener un acervo digital importante en materia geográfica.

INEGI por su parte, es la fuente oficial del gobierno mexicano. En esta institución se publican datos estadísticos que abarcan diversas temáticas desde población hasta variables geográficas del territorio como lo son: relieve, geodesia, recursos naturales y topografía.

CONABIO es una institución que posee una colección de capas de información las cuales mediante un portal de geoinformación muestran un mapa web el cual contiene la representación de cada una de las capas de información las cuales pueden ser de interés, esto de acuerdo a las necesidades de los usuarios o investigadores.

Por último, el CENAPRED cuenta con datos en formato *shape*, los cuales representan riesgos asociados a diferentes fenómenos naturales los cuales se representan sobre la república mexicana, estos datos son de utilidad para tener un panorama general de variables como inundaciones, temperatura y probabilidades de ocurrencia de diferentes fenómenos.

Para el caso de estudio se consiguieron las siguientes capas de información en formato vectorial.

a) Niveles de Vegetación

Esta capa de información contiene los datos acerca de los principales niveles de vegetación en el municipio de estudio, así como del Municipio de Navolato (véase Figura 12).

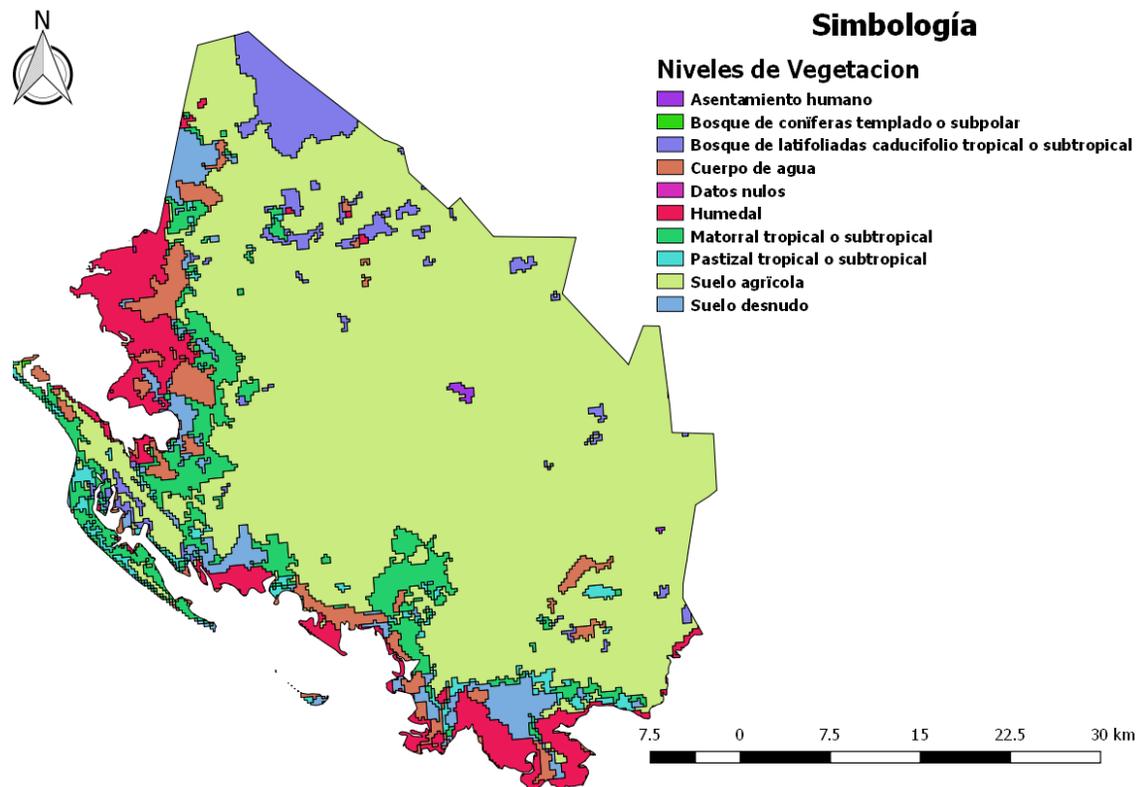


Figura 12. Representación de niveles de vegetación en un SIG

Fuente: Elaboración propia con información de CONABIO.

b) Tipos de suelo

Esta capa de contiene la información de cada uno de los tipos de suelos que prevalecen en el municipio de Navolato. Como se observa en la figura anterior existen cuatro tipos de suelo a lo largo del municipio. Según información del INEGI en la guía de interpretación de cartografía edafológica, dentro del municipio de Navolato Sinaloa, pueden encontrarse principalmente cuatro tipos de suelo los cuales son: Cambisol, Litosol, Solonchak y Vertisol. La clasificación de los suelos se puede apreciar visualmente en la Figura 13.

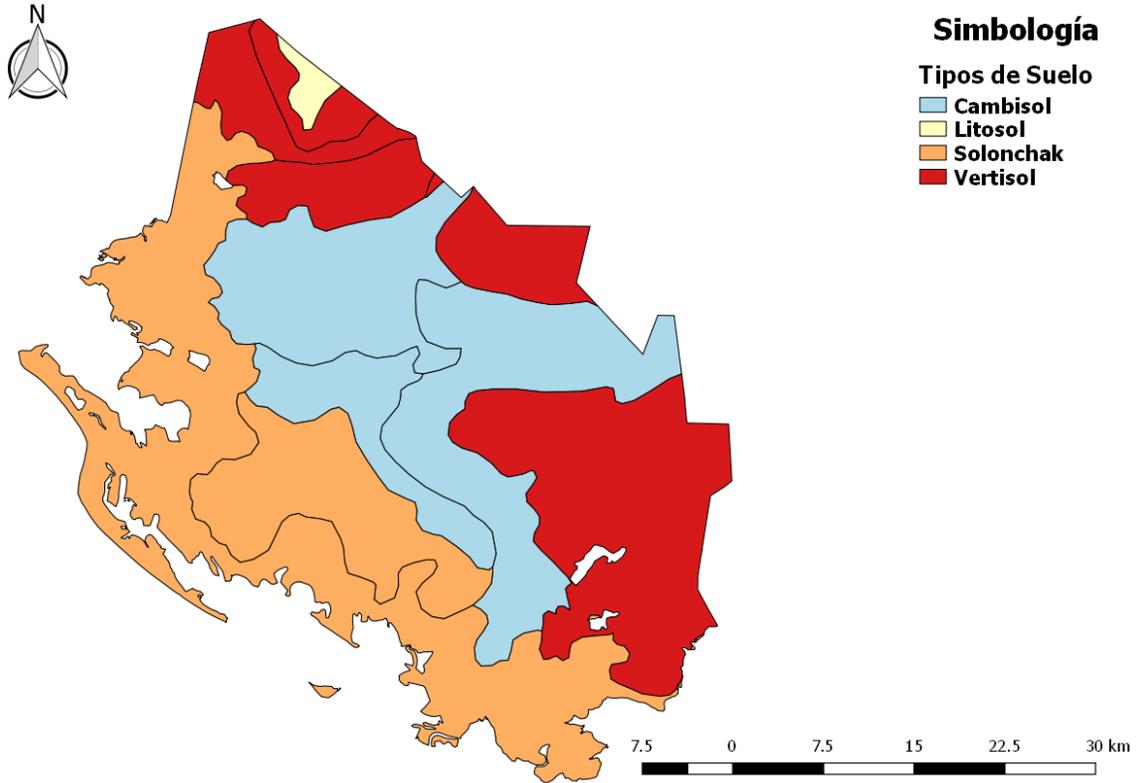


Figura 13. Representación de tipos de suelo en un SIG

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI.

c) Modelo de pendientes

Esta capa de información contiene datos acerca de las alturas correspondientes a los diferentes lugares del municipio de Navolato, en donde se observa que en su mayoría el municipio tiene una altura de 0 a 15 m de altura, por otra parte solo se pueden observar en color rojo algunas elevaciones las cuales tienen una altura mayor a 30 m mostrada en la Figura 14.

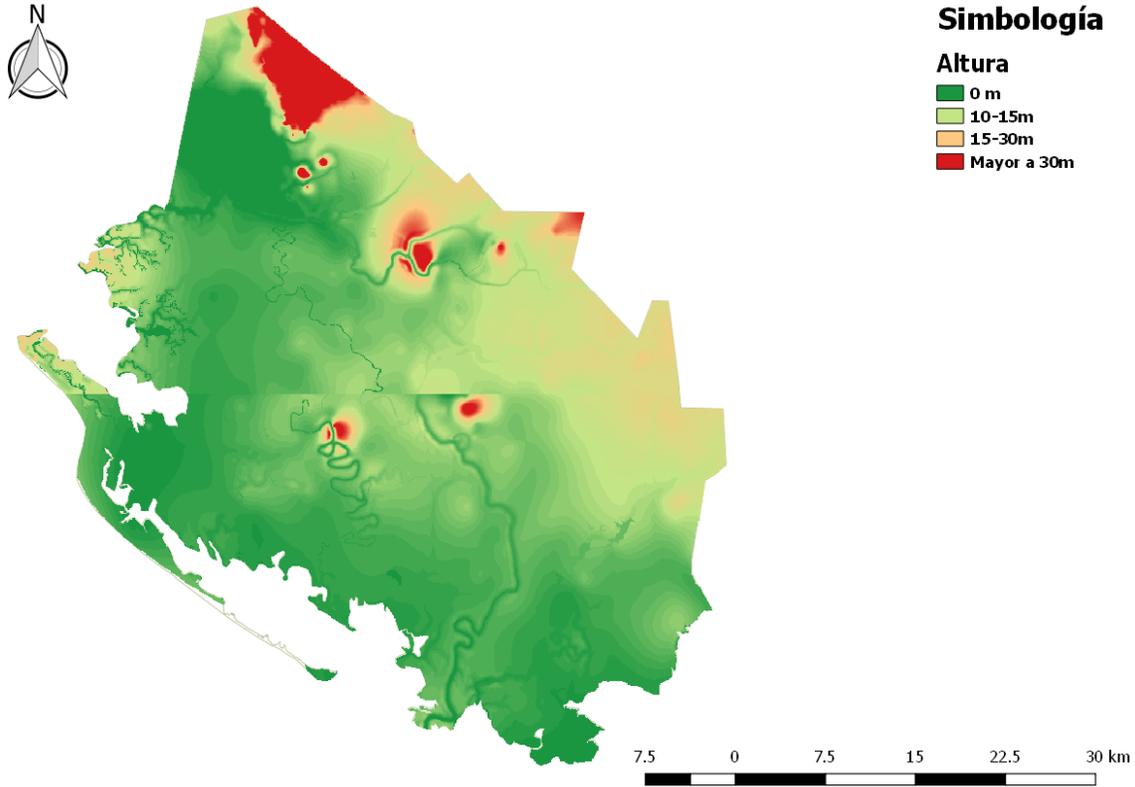


Figura 14. Modelo de pendientes en un SIG

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI.

d) Vías de acceso

Dentro de esta capa de información se encuentran definidas las vías de comunicación primarias y secundarias, además de las calles de las localidades que se encuentran dentro del municipio de Navolato. Es de suma importancia conocer de manera general como se encuentran las vías de acceso, ya que es un elemento clave en la identificación de las alternativas de salida al momento de evacuar a la población.

En la Figura 15 se muestran las vías de acceso más importantes del Municipio de Navolato.

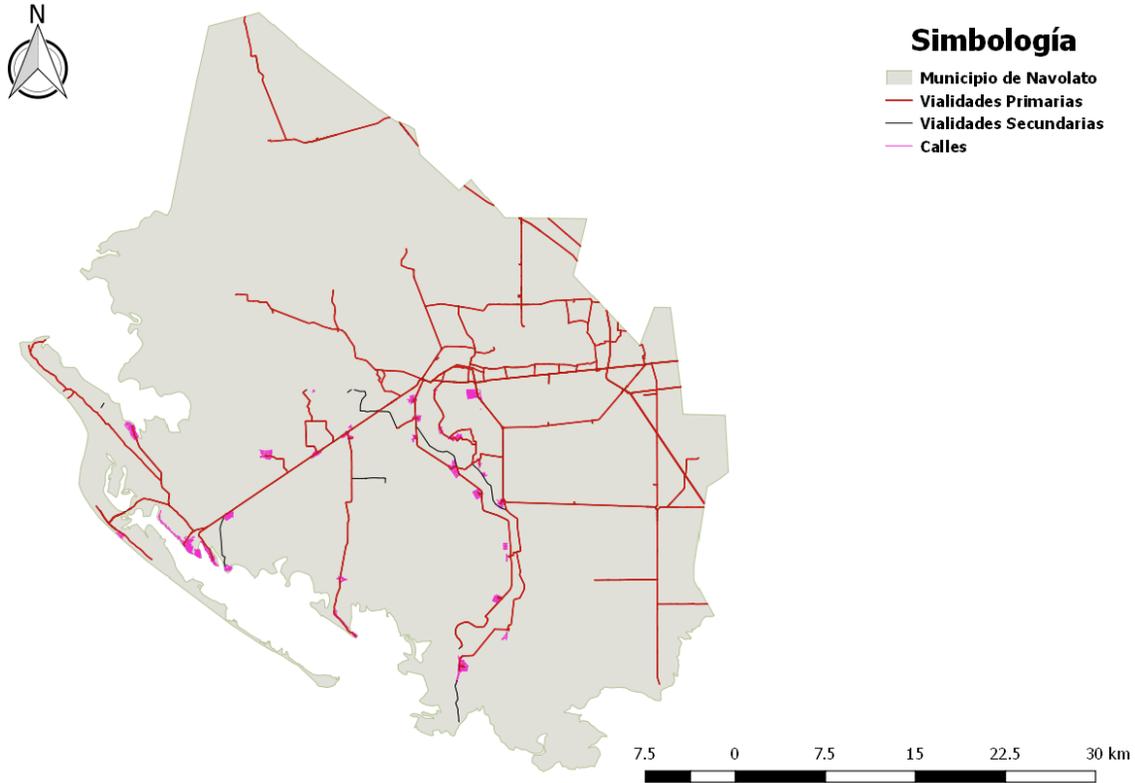


Figura 15. Vías de acceso representadas en un SIG

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI.

e) Instalaciones

El contenido de esta capa de información, consiste en la ubicación de los principales hospitales, que son una parte importante en momentos de contingencia cuando pasa un huracán. De igual manera las escuelas son una parte importante a tomar en cuenta por su tamaño y robustez con el que generalmente cuentan este tipo de estructuras ya que se pueden considerar para albergues. En la Figura 16, y en la Figura 17 se muestra la distribución de los servicios de salud y las escuelas en el Municipio de Navolato.

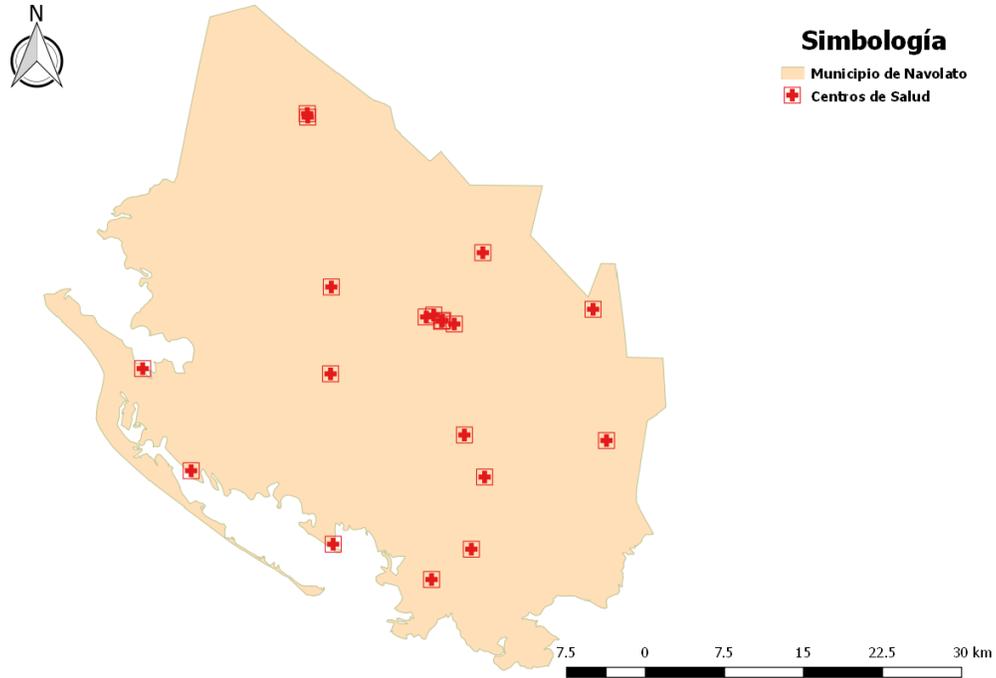


Figura 16. Distribución de los servicios de salud en el Municipio de Navolato

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI.

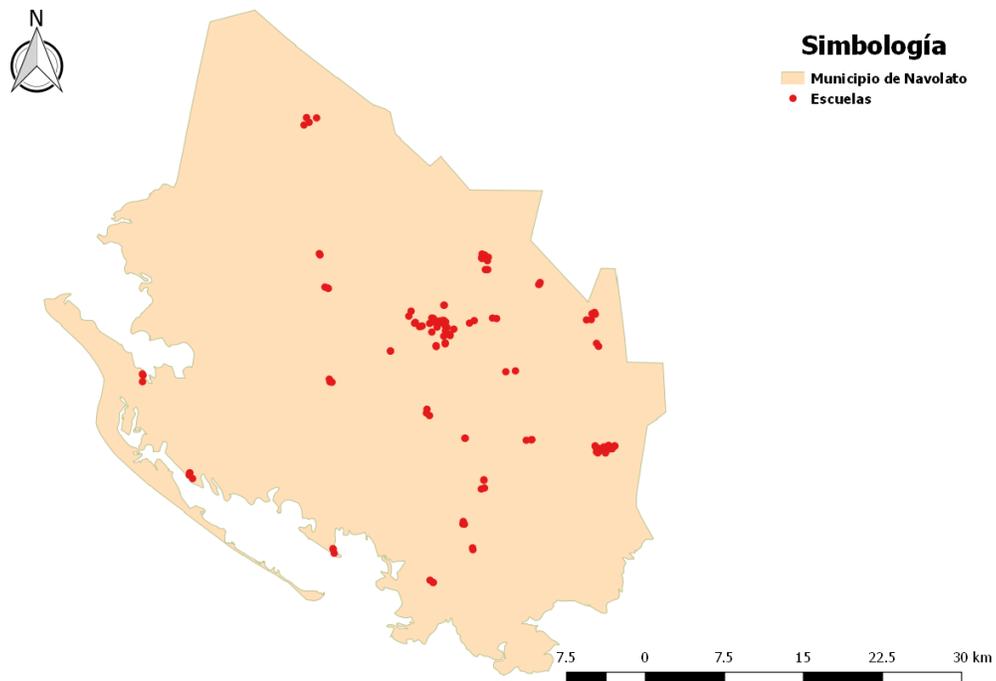


Figura 17. Distribución de las escuelas en el Municipio de Navolato

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI.

5.4. Obtención de los parámetros físicos de un huracán y determinación de zonas vulnerables

Para lograr una mejor calidad en la representación de la información se recurrió al profesorado del presente programa de posgrado, en particular al Dr. Óscar Cruz Castro, quien se encarga de realizar modelación numérica de huracanes para determinar los efectos de la marea de tormenta en la zona costera. Lo anterior con la finalidad de establecer los parámetros físicos de un huracán que ocasionan algún peligro al momento de llegar a las costas de un lugar determinado. Para el caso de estudio se tomaron en cuenta dos parámetros, los cuales son la velocidad del flujo de agua y los niveles de inundación.

En la Figura 18 se representa la velocidad del flujo de agua bajo los parámetros máximos de un huracán similares a los de “Manuel” que golpeó las costas de la bahía de Altata Sinaloa en el año 2013. El mapa muestra isolíneas, las cuales representan la velocidad del flujo de agua en una determinada zona.

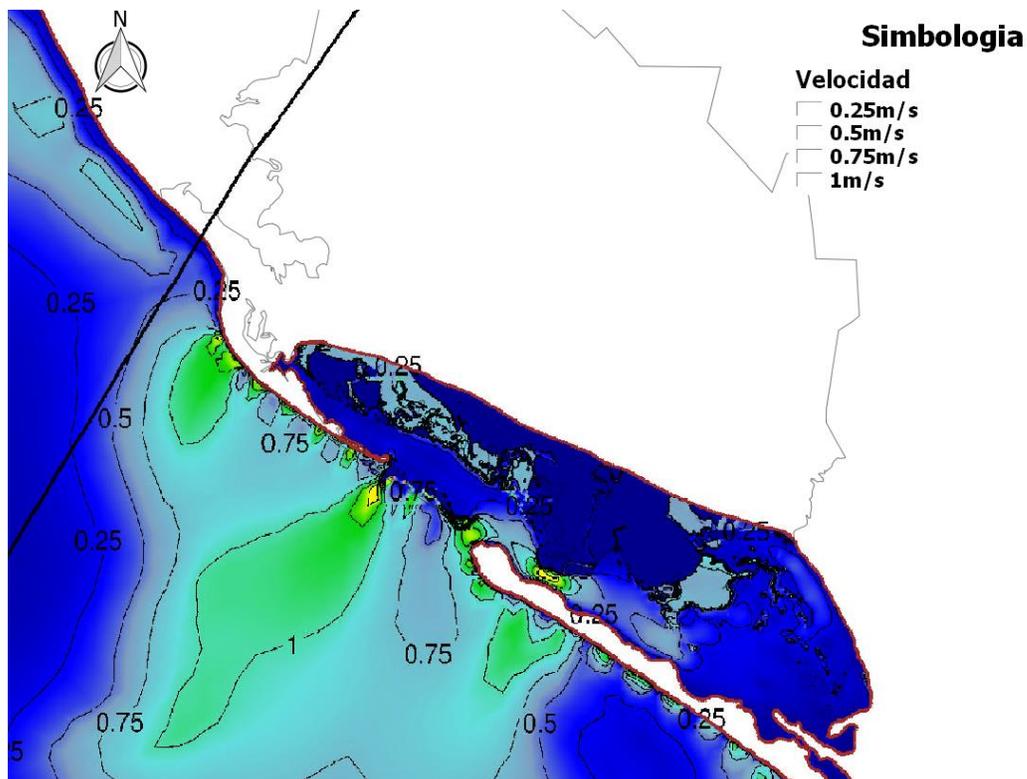


Figura 18. Representación de la velocidad del flujo de agua

Fuente: Proyecto de investigación 2354, Cátedras, CONACYT.

Para determinar las zonas vulnerables a ser inundadas se utilizó a Figura 19 en la que se muestran los niveles máximo y mínimo del tirante de agua. La altura del agua esta expresada en metros.

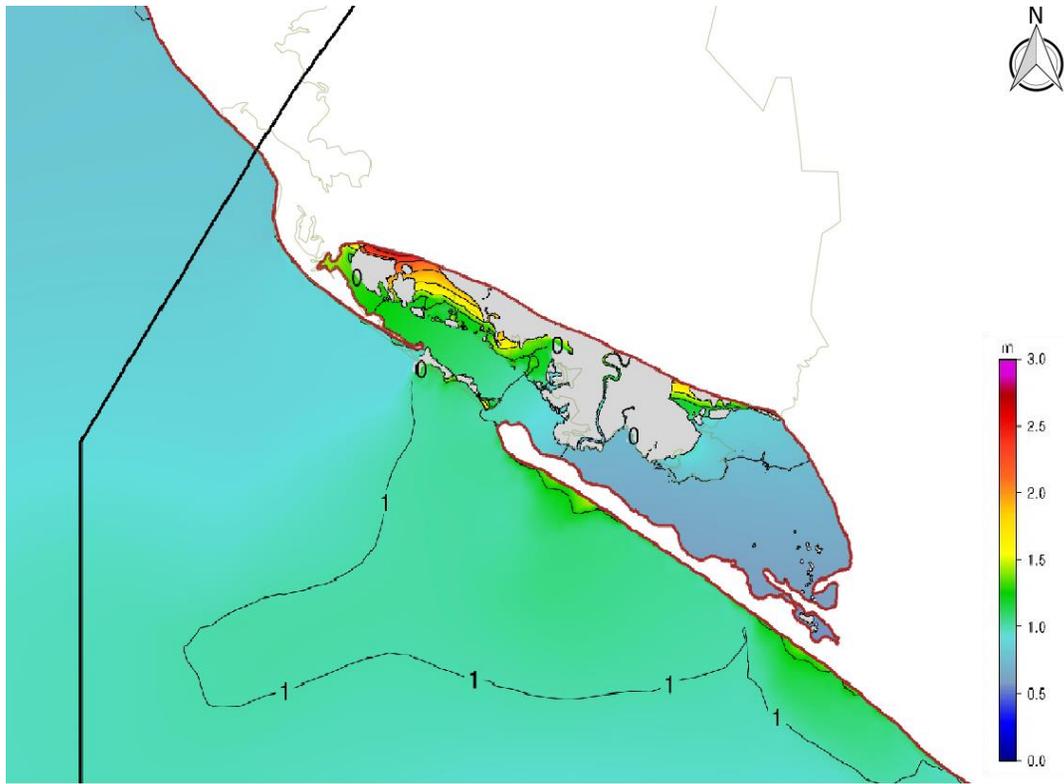


Figura 19. Representación de los niveles máximo y mínimo del tirante de agua

Fuente: Proyecto de investigación 2354, Cátedras, CONACYT.

Al realizar una sobreposición de capas de información generamos de manera visual una aproximación de las localidades dentro del municipio, las cuales pueden ser afectadas en mayor o menor medida por inundaciones durante un huracán.

Como se observa en la Figura 20, al sobreponer el mapa de calor que representa a la población se puede ver los lugares que podrían llegar a ser afectados por inundaciones, los colores verde, amarillo y rojo, son los lugares que presentan de acuerdo a esta capa de información un mayor grado de vulnerabilidad para sufrir daños. Además de lo anterior se pueden incluir datos de probabilidad de ocurrencia de huracanes, que es otra forma para conocer la distribución de ocurrencia de huracanes.

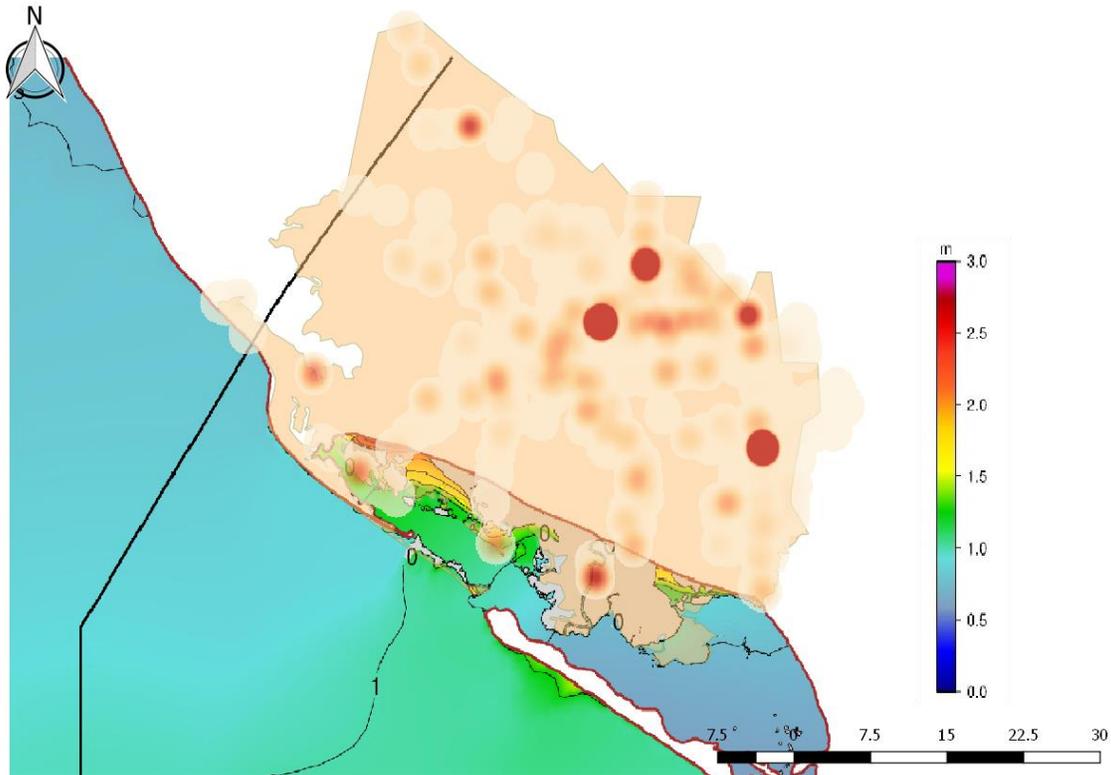


Figura 20. Representación de posibles afectaciones por el huracán en el municipio de Navolato

Fuente: Proyecto de investigación 2354, Cátedras, CONACYT.

5.4.1. Probabilidad de ocurrencia de un huracán

Para poder obtener la probabilidad de ocurrencia de un huracán en la zona de estudio se realizó lo siguiente:

1. Se descargó la información de la probabilidad de ocurrencia de huracanes de las diferentes categorías en México, en formato Keyhole Markup Language (KML), de la página del Atlas Nacional de Riesgos.
2. A través de la herramienta ArcGIS se exportó el archivo kml a una geodatabase que contenía todos los datos en una columna, y se creó una columna con un número consecutivo como referencia.
3. Se extrajo la información tabular en un archivo de texto (.txt), para separar los datos en columnas según el tipo de información.
4. Se extrajo la información de la geodatabase en formato shapefile (.shp).
5. Se realizó la unión del shapefile con la tabla de datos, a partir del número consecutivo de referencia.

6. Se cambió el sistema de referencia, de proyección Cónica Conforme de Lambert a Coordenadas Geográficas con Datum WGS84.

Este análisis nos permitió obtener los siguientes mapas con la información de la ocurrencia de huracanes en la bahía de Altata, municipio de Navolato, Sinaloa. En las siguientes ilustraciones se muestran las respectivas probabilidades de ocurrencia de huracanes en la zona de estudio, siendo Categoría 1 (Figura 21), Categoría 2 (Figura 22), Categoría 3 (Figura 23), Categoría 4 (Figura 24), y Categoría 5 (Figura 25).

El poder de los huracanes se mide en la escala Saffir-Simpson, que está estructurada en un rango de 1 a 5 para estimar los daños potenciales a la propiedad e inundaciones producidas cuando un huracán llega a tierra. La descripción de este tipo de eventos está a cargo de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (Schott et al., 2012). En el **Anexo B** se presentan una descripción de las características principales de las diferentes categorías de los huracanes bajo la escala Saffir-Simpson.

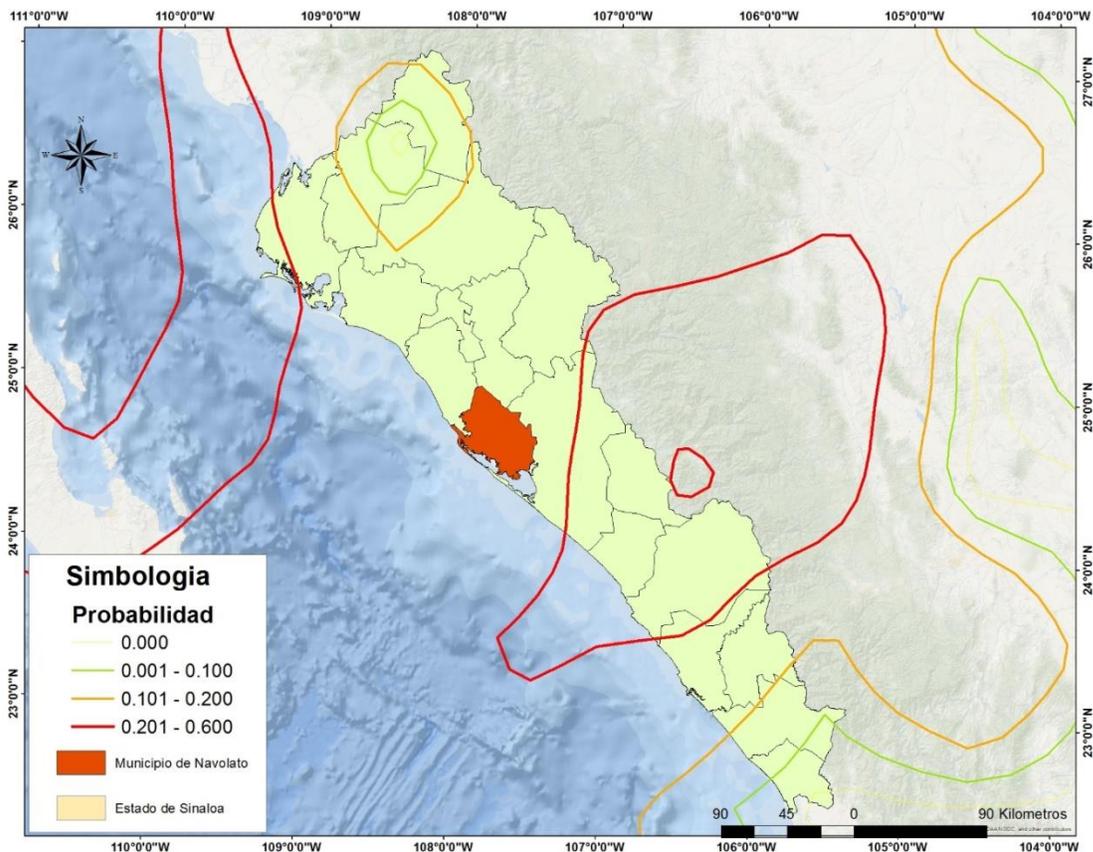


Figura 21. Probabilidad de ocurrencia de huracanes Categoría 1 en la región de estudio

Fuente: Elaboración propia con información del CENAPRED

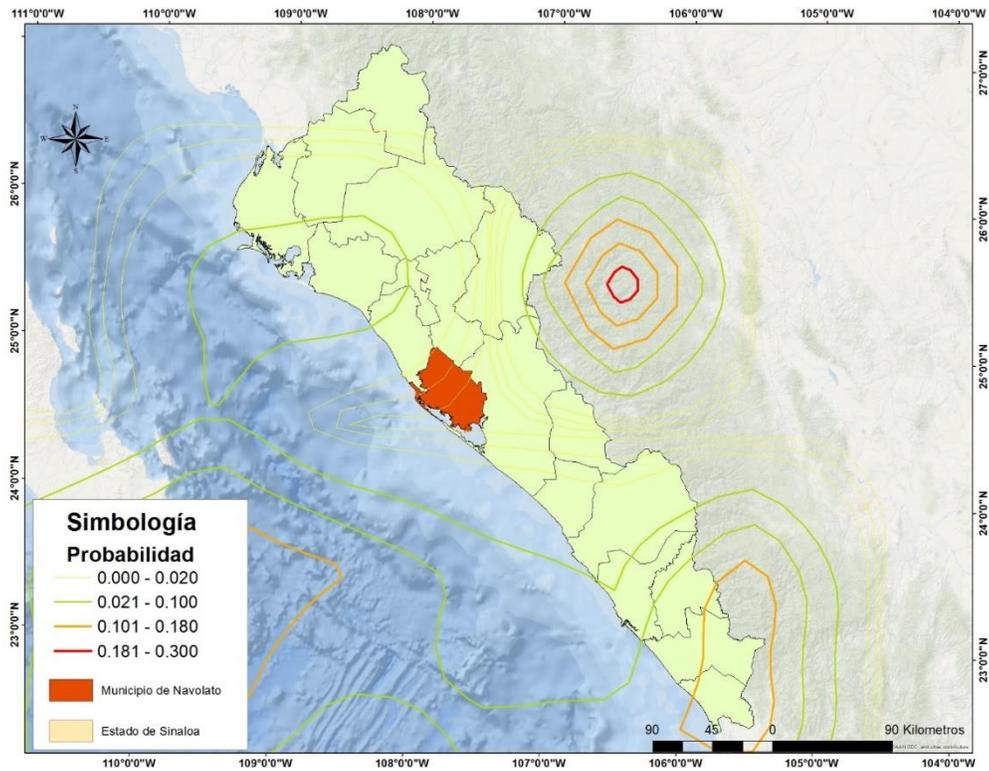


Figura 22. Probabilidad de ocurrencia de huracanes Categoría 2 en la región de estudio

Fuente: Elaboración propia con información del CENAPRED

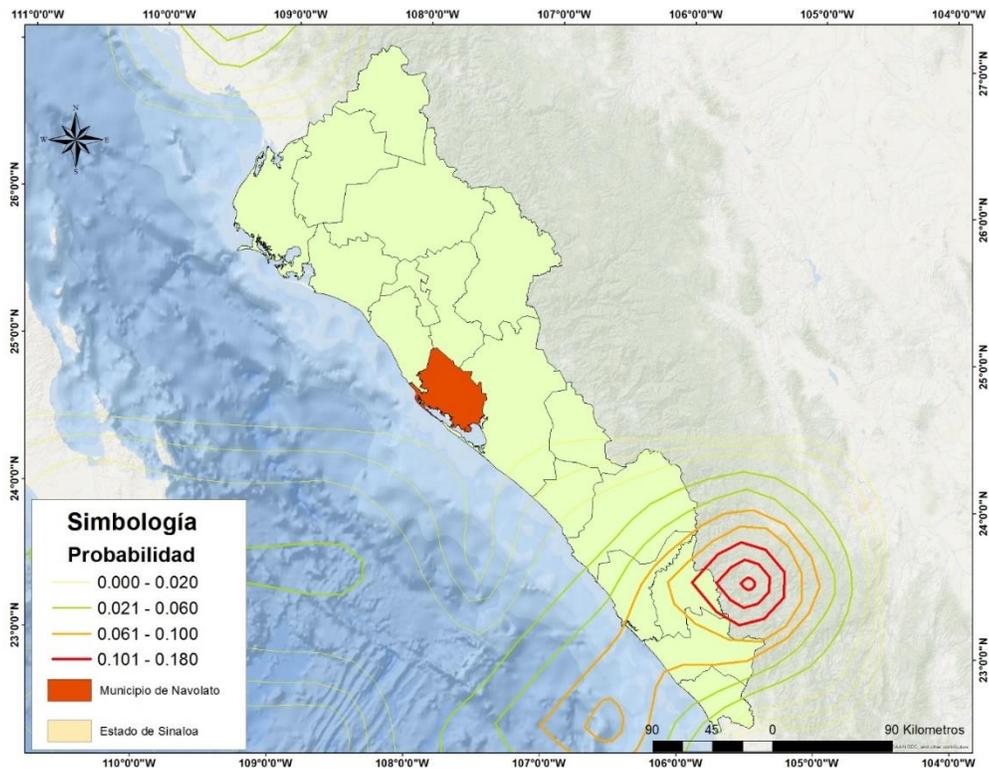


Figura 23. Probabilidad de ocurrencia de huracanes Categoría 3 en la región de estudio

Fuente: Elaboración propia con información del CENAPRED

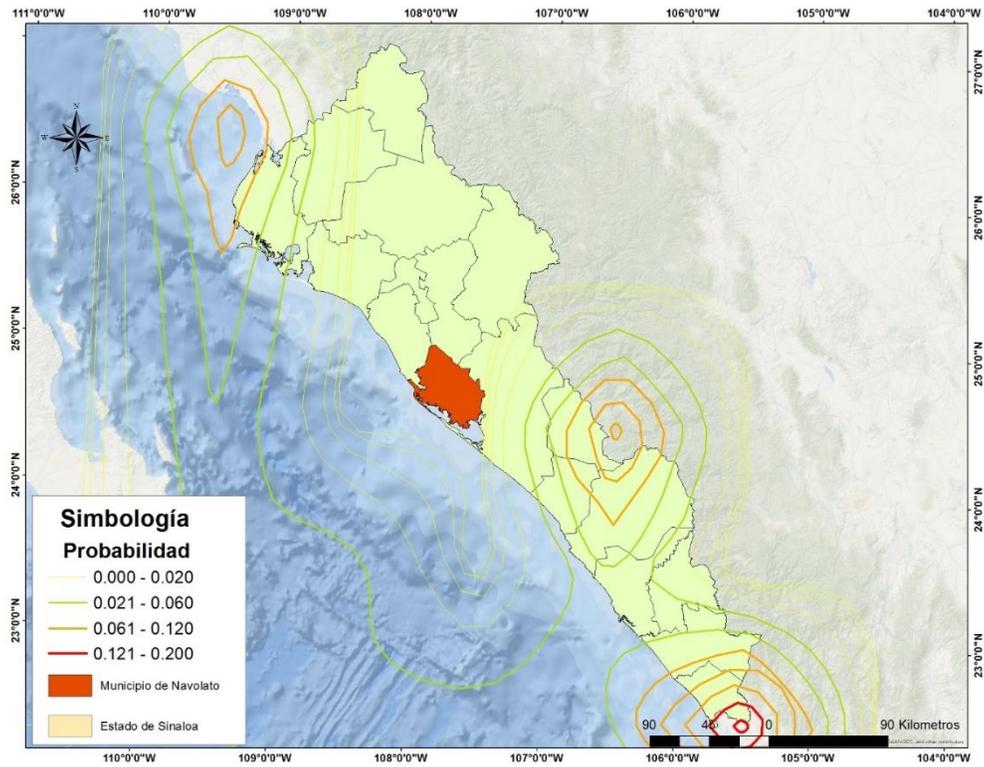


Figura 24. Probabilidad de ocurrencia de huracanes Categoría 4 en el estado de Sinaloa

Fuente: Elaboración propia con información del CENAPRED

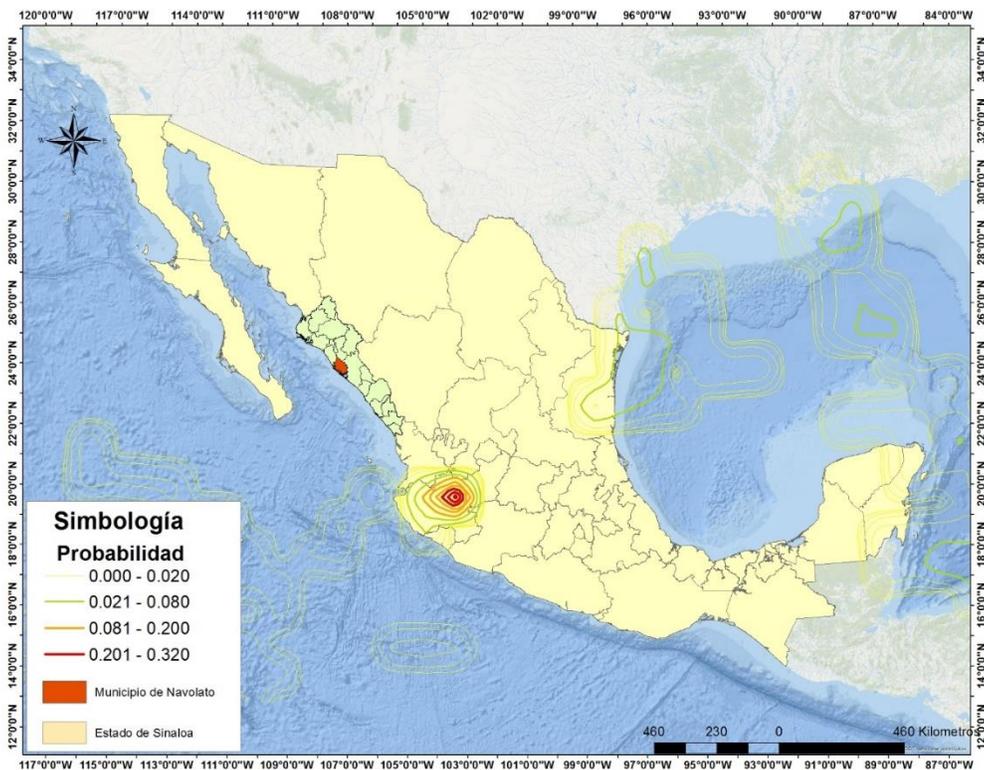


Figura 25. Probabilidad de ocurrencia de huracanes Categoría 5 en el estado de Sinaloa

Una vez conocida la probabilidad de ocurrencia de huracanes podemos determinar la probabilidad con la que puede llegar un huracán dentro de la zona de estudio para diferentes categorías.

Posteriormente debemos de definir las capas de información con la cuales trabajaremos para realizar el AEMC. Los insumos obtenidos de bancos de datos geoespaciales INEGI son los siguientes:

- Niveles de vegetación
- Tipos de suelo
- Velocidad del flujo de agua durante un huracán
- Modelo de pendientes.
- Nivel de inundación durante un huracán
- Principales vías de acceso
- Instalaciones a ser afectadas

Posteriormente se rasterizan las capas de información. Se le llama rasterización al proceso de transformar una imagen, de formato vectorial a pixeles.

Posteriormente generamos un archivo. gdb dentro de ArcGIS el cual nos permitirá almacenar nuestras capas de información estandarizadas, lo cual es de suma importancia para conservar la referencia espacial.

5.5. Análisis Espacial Multicriterio (AEMC)

Para comenzar con el proceso del AEMC, primero es necesario definir el objetivo del mismo, para determinar en función de eso, qué criterios y subcriterios se definirán para posteriormente aplicar el PJA.

Para el caso de estudio se elaboró un diagrama de jerarquías el cual ilustra el esquema de criterios y subcriterios, los cuales nos permitieron localizar lugares candidatos a ser puntos de reunión en caso de un huracán.

En primer lugar, definimos el objetivo que es la localización de lugares candidatos a ser puntos de reunión, el objetivo es conocido como el nivel 0 dentro de nuestro esquema de jerarquías. Para establecer los subcriterios utilizamos las definiciones de peligro, riesgo y exposición este es el nivel 1. Una vez identificadas las variables más importantes dentro del nivel 1, se eligen los subcriterios, que son aquellos los cuales nos van a permitir en un nivel 4 crear las alternativas, que para el caso de

estudio será un mapa de salida resultante, con la localización de los posibles candidatos a ser puntos de reunión.

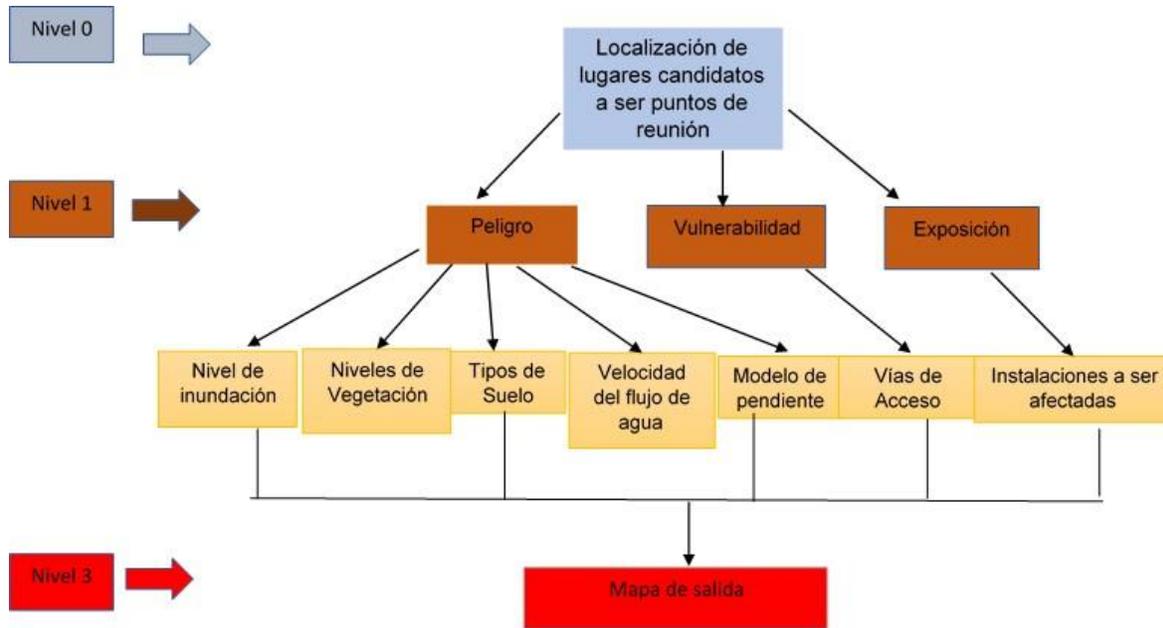


Figura 26. Estructura del PJA para el problema de estudio. Objetivo, criterios y subcriterios

Fuente: Elaboración propia.

5.5.1. Matriz de comparaciones pareadas

De acuerdo al PJA, este método nos permite incluir una jerarquización de tres niveles basados en primer lugar en el objetivo, en el nivel uno se tienen los criterios, en segundo nivel se encuentran los subcriterios y finalmente en el tercer nivel las alternativas. De acuerdo al objetivo PJA podemos priorizar alternativas o dar prioridad a ciertas acciones para implementar algún proyecto dentro de un territorio con ayuda de los SIG, esto se logra dando pesos específicos y valores que pueden aumentar o disminuir el valor total de los criterios.

Para generar la matriz de comparaciones pareadas es necesario en primer lugar contar con los criterios necesarios los cuales nos van a ayudar a cumplir nuestro objetivo, para el caso de estudio se definieron los siguientes criterios: peligro, vulnerabilidad y exposición, los cuales cumplen con la fórmula del riesgo, misma que ya fue descrita en el capítulo 2.

De acuerdo a las capas que pueden representar un peligro cuando un huracán se acerca a la costa, se definieron los siguientes subcriterios con ayuda de un especialista en el tema de modelación numérica de huracanes para determinar los efectos de la marea tormenta en la zona costera y se determinaron los siguientes: nivel de inundación, nivel de vegetación, tipos de suelo, velocidad del flujo de agua y modelo de pendientes. Para definir el criterio de vulnerabilidad, se eligió la capa de vías de acceso, debido a que resulta importante determinar que vías de acceso sufren un menor daño durante el paso de un huracán.

La exposición se representa por una capa que contiene instalaciones de salud, las cuales toman una importancia relevante principalmente después de haber pasado el huracán, ya que es donde se atiende a la gente que sufrió algún tipo de daño físico debido al paso del fenómeno. Por último, se representan las vías de comunicación.

5.5.2. Capas definidas para realizar el PJA

Se definen las siguientes capas para la aplicación del PJA.

1. Nivel de inundación
2. Niveles de vegetación
3. Tipos de suelo
4. Velocidad del Flujo de agua
5. Modelo de pendientes
6. Vías de acceso
7. Instalaciones a ser afectadas

Una vez que se tiene la definición de las capas de información a utilizar, se procede a llenar la matriz de comparaciones pareadas.

Para realizar el procedimiento en primer lugar es necesario poner en forma de filas y columnas las capas de información que previamente fueron definidas, para que el formato de llenado tenga la estructura que se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Formato de llenado de la matriz de comparaciones pareadas

	Nivel de inundacion	Niveles de vegetacion	Tipos de suelo	Velocidad del flujo de agua	Pendiente	Vias de acceso	Instalaciones a ser afectadas
Nivel de inundacion							
Niveles de Vegetacion							
Tipos de Suelo							
Velocidad del Flujo de agua							
Pendiente							
Vias de acceso							
Instalaciones a ser afectadas							

Fuente: Elaboración propia.

Para el llenado de la matriz de comparaciones pareadas es necesario tener clara la utilidad de la escala de preferencias de Saaty. En la parte derecha de la escala gráfica (), se pueden observar los valores que tienen una mayor importancia para cumplir el objetivo (1,3,5,7,9), del lado izquierdo se encuentran los valores que tienen menor importancia (1/9,1/7,1/5,1/3) y por último se encuentra en el centro el valor 1 que quiere decir que la comparación tiene la misma importancia (Figura 27).

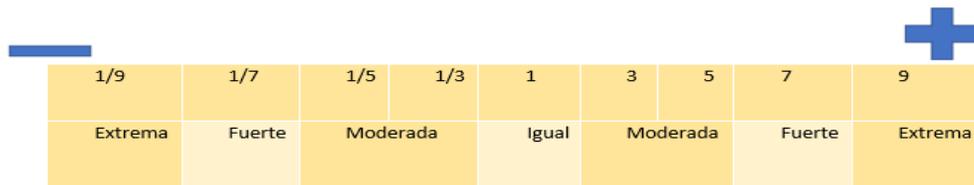


Figura 27. Escala gráfica y verbal para comparaciones pareadas en el PJA

Fuente: Elaboración propia.

Una vez listas las capas de información y con la ayuda de especialistas los cuales nos van a ayudar a definir la importancia de cada una de las comparaciones se procede a realizar el llenado de la siguiente manera:

1. En primer lugar, el llenado de la matriz se inicia desde las filas hacia cada una de las columnas.
2. Cuando se comparen dos capas de información iguales el valor será 1, ya que la importancia entre ambas es la misma.
3. Los números enteros del 3 al 9 representan mayor importancia, por ejemplo, para el caso de estudio la velocidad del flujo de agua es más importante que los niveles de vegetación.
4. En cada uno de los valores inversos de comparación se pondrá el recíproco del valor que se obtiene, por ejemplo, en la comparación del nivel de inundación y el nivel de vegetación, se determina una mayor importancia a el nivel de inundación por lo que se pone el número 7. Si revisamos la comparación a la inversa que sería el nivel de vegetación respecto al nivel de inundación sólo se completa con el valor recíproco y se realiza el mismo

procedimiento para toda la matriz. Una vez llena la matriz, se obtiene una suma total de cada una de las columnas, como se muestra en Tabla 4.

Tabla 4. Comparaciones pareadas entre criterios

	Nivel de inundacion	Niveles de vegetacion	Tipos de suelo	Velocidad del flujo de agua	Pendiente	Vias de acceso	Instalaciones a ser afectadas
Nivel de inundacion	1	7	3	0.33333333	0.2	0.142857143	0.2
Niveles de Vegetacion	0.142857143	1	3	0.2	0.33333333	0.2	0.142857143
Tipos de Suelo	0.333333333	0.333333333	1	0.333333333	0.2	0.2	0.142857143
Velocidad del Flujo de agua	3	5	3	1	0.33333333	3	5
Pendiente	5	3	5	3	1	0.333333333	0.333333333
Vias de acceso	7	5	5	0.333333333	3	1	3
Instalaciones a ser afectadas	5	7	7	0.2	3	0.333333333	1
Suma	21.47619048	28.33333333	27	5.4	8.0666667	5.20952381	9.819047619

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se elabora una nueva tabla donde se va a dividir el valor de cada una de las posiciones de la matriz entre el total de la suma de cada columna, para asignar un peso a cada una de las comparaciones (es un proceso de normalización, la suma de los promedios de cada una de las filas debe ser exactamente 1), quedando como se muestra a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5. Normalización de las calificaciones

	Nivel de inundacion	Niveles de vegetacion	Tipos de suelo	Velocidad del flujo de agua	Pendiente	Vias de acceso	Instalaciones a ser afectadas	PROMEDIO
Nivel de inundacion	0.046563193	0.247058824	0.111111111	0.061728395	0.0247934	0.027422303	0.020368574	0.07700654
Niveles de Vegetacion	0.006651885	0.035294118	0.111111111	0.037037037	0.0413223	0.038391225	0.014548982	0.04062238
Tipos de Suelo	0.015521064	0.011764706	0.037037037	0.061728395	0.0247934	0.038391225	0.014548982	0.02911211
Velocidad del Flujo de agua	0.139689579	0.176470588	0.111111111	0.185185185	0.0413223	0.575868373	0.509214355	0.24840879
Pendiente	0.232815965	0.105882353	0.185185185	0.555555556	0.1239669	0.063985375	0.033947624	0.18590557
Vias de acceso	0.32594235	0.176470588	0.185185185	0.061728395	0.3719008	0.191956124	0.305528613	0.23124458
Instalaciones a ser afectadas	0.232815965	0.247058824	0.259259259	0.037037037	0.3719008	0.063985375	0.101842871	0.18770002
								1

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6 se observan las capas que fueron seleccionadas para cumplir con el objetivo con sus respectivas contribuciones de importancias relativas. Para este caso, las capas de información resultaron ser: la velocidad del flujo de agua, las vías de acceso, las instalaciones a ser afectadas y la pendiente.

Tabla 6. Calificación final de importancia relativa de las capas

	PROMEDIO
Nivel de inundacion	0.07700654
Niveles de Vegetacion	0.04062238
Tipos de Suelo	0.02911211
Velocidad del Flujo de agua	0.24840879
Pendiente	0.18590557
Vias de acceso	0.23124458
Instalaciones a ser afectadas	0.18770002
	1

Fuente: Elaboración propia.

5.5.3. Procesamiento SIG

Para comenzar a trabajar las capas de información, fue necesaria la utilización de QGIS el cual es un SIG de código abierto licenciado bajo GNU (General Public License). QGIS es un proyecto oficial de *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo). Este programa se ejecuta en ambientes Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android, y soporta numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos ráster y bases de datos.

En primer lugar, se agrega cada una de las capas de información que previamente fueron definidas (véase Figura 28). Una vez que agregadas estas las capas de información se formulan algunos criterios de variables en forma de enunciado para facilitar las condiciones de aptitud en función del objetivo.

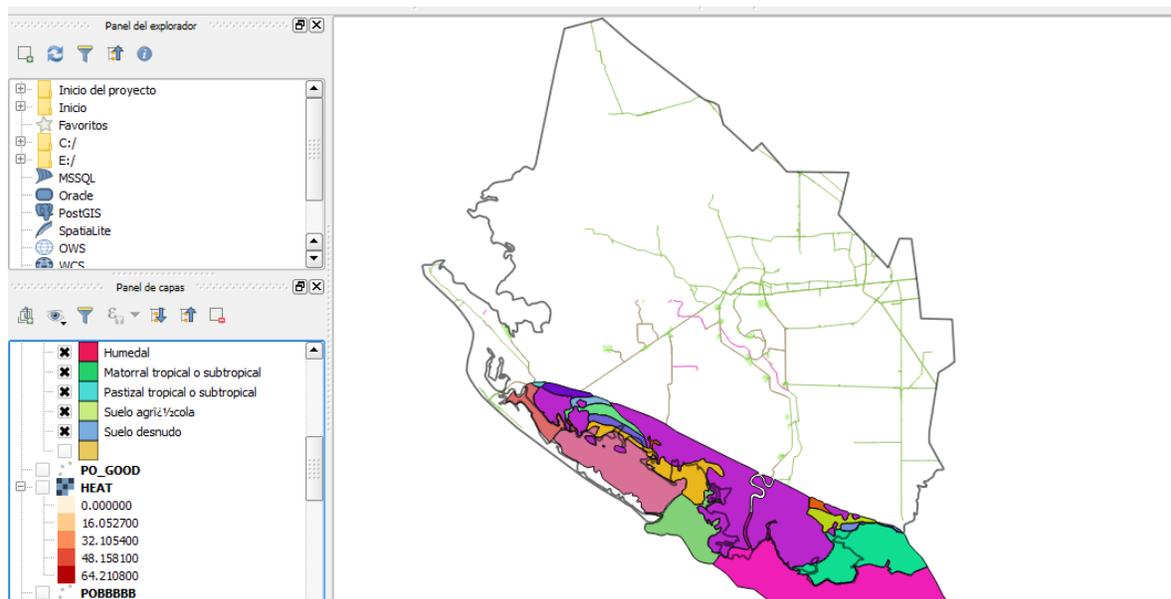


Figura 28. Capas de información consideradas en el análisis en ambiente QGIS

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 7 se muestran los criterios adoptados para definir las escalas aplicadas para la calificación individual de las características de nivel de inundación, nivel de vegetación, tipo de suelo y velocidad de flujo de agua.

Tabla 7. Características a evaluar, descripción y escalas de calificación

Característica	Descripción	Calificación
Nivel de inundación	0 cm	3. Apto
	Entre 50 y 90 cm	2. Condiciones aceptables
	Más de 100 cm	1. No deseable
Nivel de vegetación	Donde existan asentamientos humanos	3. Apto
	Donde existan zonas con vegetación	2. Condiciones aceptables
	Donde existan humedales y cuerpos de agua	1. No deseable
Tipo de suelo	Solonchak	3. Apto
	Vertisol	2. Condiciones aceptables
	Cambisol o litosol	1. No deseable
Velocidad de flujo de agua	Menor a 0.3 m/s	3. Apto
	Entre 0.3 y 1 m/s	2. Condiciones aceptables
	Mayor a 1 m/s	1. No deseable
Pendiente	Altura entre 0 y 15 m	3. Apto
	Altura entre 15 y 35 m	2. Condiciones aceptables
	Altura de 35 o más	1. No deseable
Vías de acceso	Vías de acceso primarias	3. Apto
	Vías de acceso secundarias	2. Condiciones aceptables
	Calles con poca conexión	1. No deseable
Instalaciones por afectarse	Área de cultivo	3. Apto
	Escuelas	2. Condiciones aceptables
	Hospitales	1. No deseable

Fuente: Elaboración propia.

Una vez establecidas nuestras las preferencias de aptitud, se trabajan con las capas de información directamente en QGIS utilizando filtros espaciales para seleccionar sólo los valores que planteamos anteriormente.

En primer lugar, se definen los valores de la capa de nivel de inundación como se muestra en la Figura 29. En la Figura 30 se muestra la utilización de esta sintaxis para indicar que el Niv_Ind (nivel de inundación), selecciona solo aquellos valores que tengan 0. Del mismo modo se ejemplifica para los otros niveles de inundación.

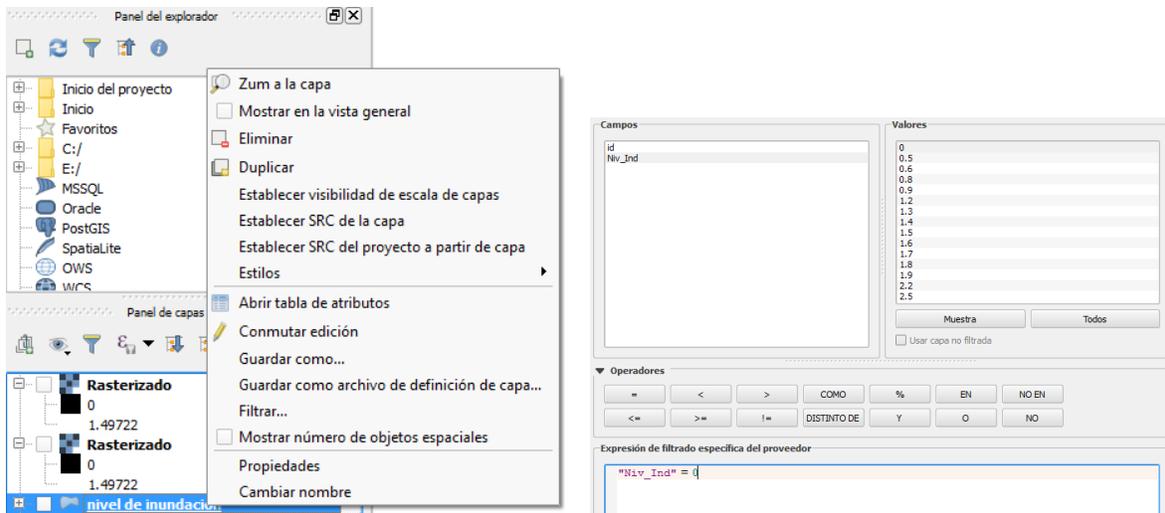


Figura 29. Proceso de definición de información de nivel de inundación

Fuente: Elaboración propia.

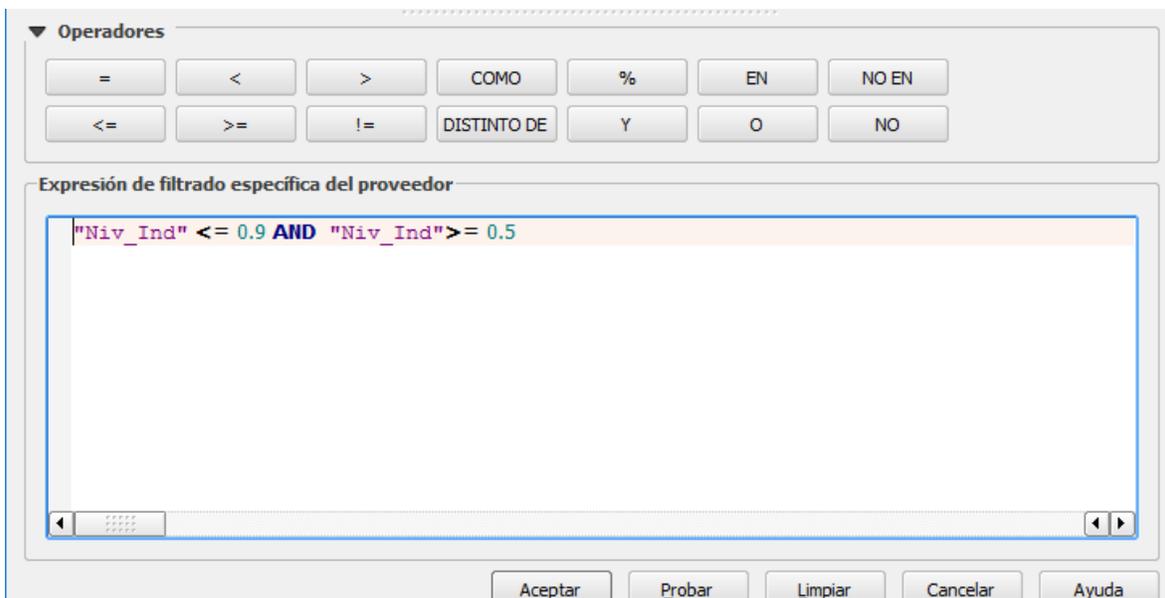


Figura 30. Proceso de definición de información de nivel de inundación. Continuación.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez terminada la clasificación de los valores de inundación, el resultado obtenido genera una nueva clasificación de acuerdo a la valoración de la escala que se definieron (véase Figura 31).

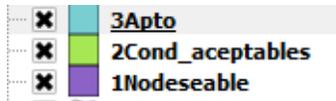


Figura 31. Escala de valoración en el ambiente QGIS.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo el resultado ya listo, se procede a rasterizar cada una de las tres capas de información resultante. Rasterizar es un proceso por medio del cual una imagen vectorial es transformada en un conjunto de píxeles. Signados los valores numéricos, se rasteriza la capa de información correspondiente (véase Figura 32).

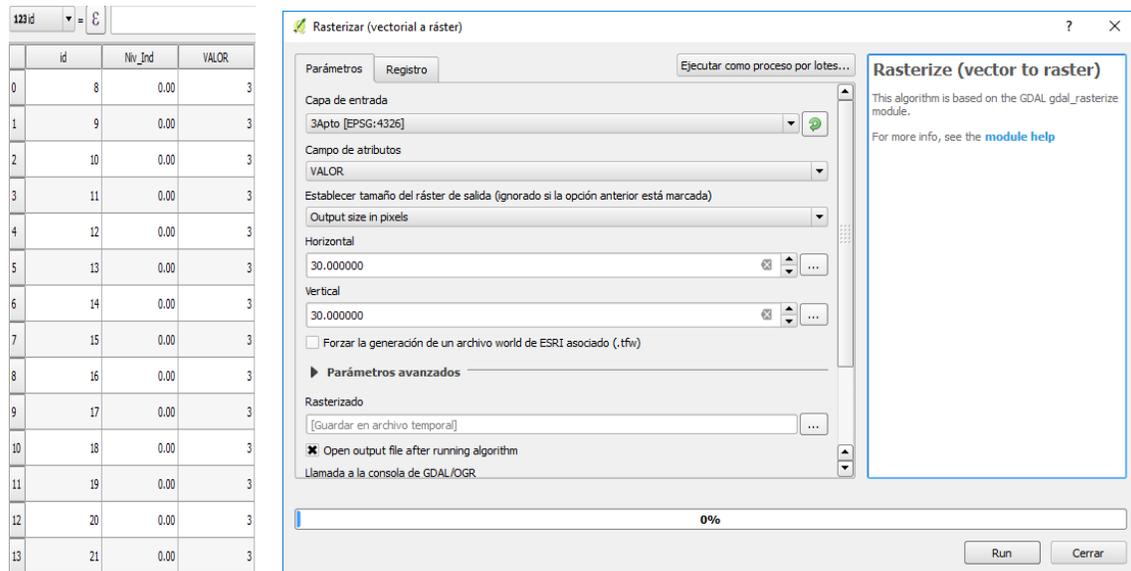


Figura 32. Proceso de rasterización en el ambiente QGIS.

Fuente: Elaboración propia.

Se establece que, dentro del tamaño del píxel dentro de la imagen, para fines de este trabajo lo dejaremos en un tamaño de píxel de 30 x 30 unidades de mapa. La rasterización queda de la forma en que se muestra en la Figura 33.

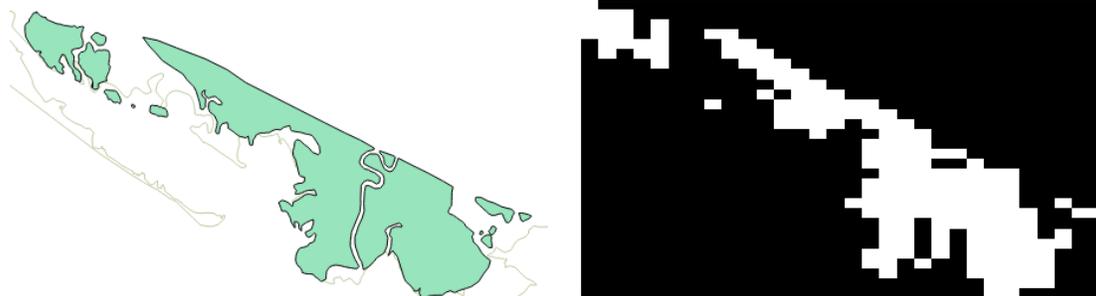


Figura 33. Comparación del formato vectorial y el formato ráster

Fuente: Elaboración propia.

Por último, se realiza el álgebra de mapas (proceso que nos permite realizar operaciones con las capas de información ráster, para proporcionarnos un mapa resultante con dichas operaciones). Para el caso del primer criterio (nivel de inundación), se suman las condiciones aptas más las condiciones aceptables más las no deseables, para así obtener un solo mapa resultante con estos tres criterios. El proceso se realiza como se aprecia en la Figura 34 y en la Figura 35.

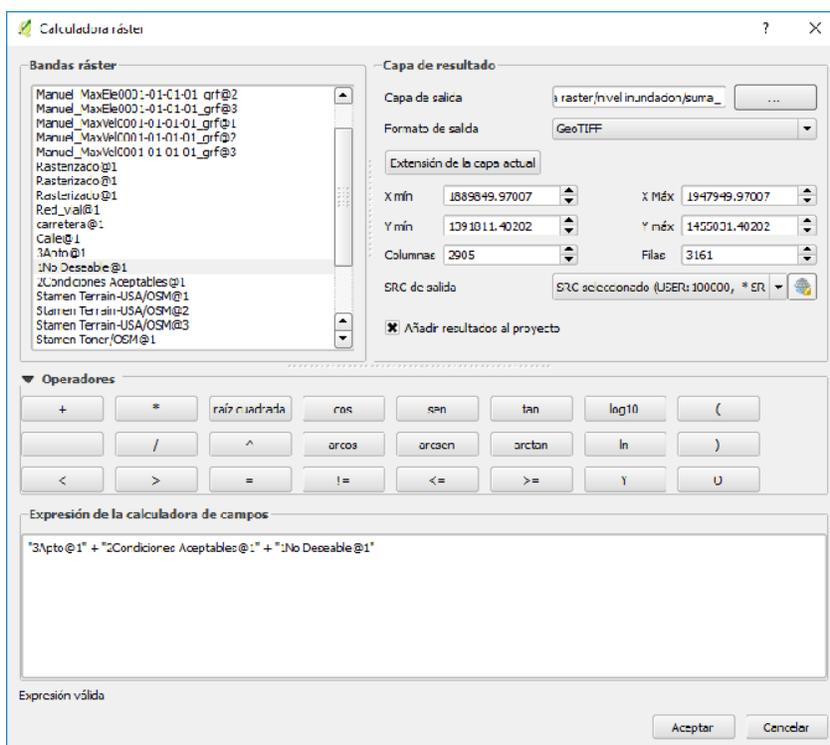


Figura 34. Realización del álgebra de mapas

Fuente: Elaboración propia.

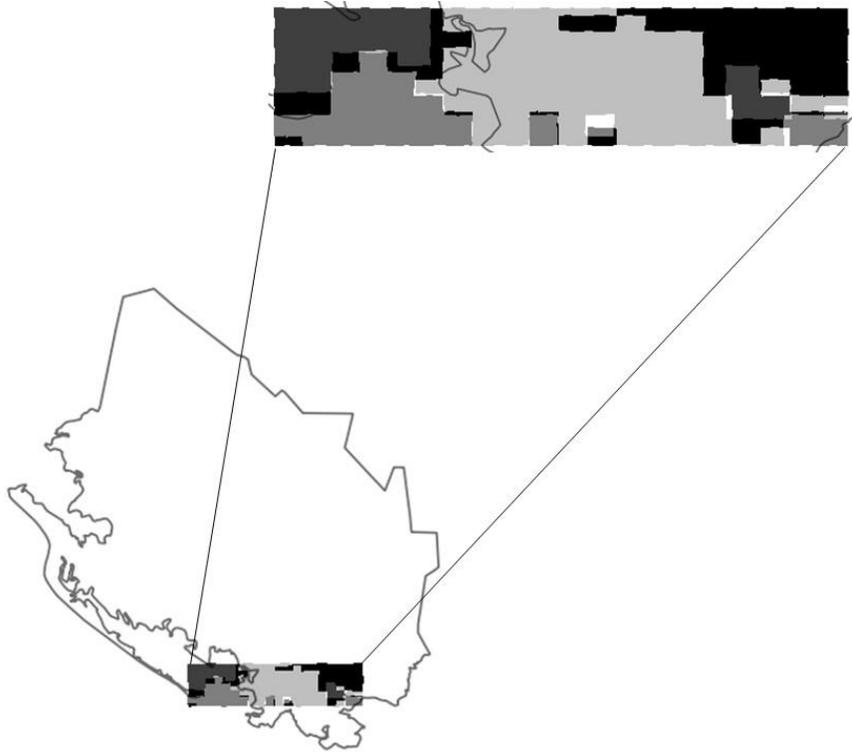


Figura 35. Mapa resultante del álgebra de mapas

Fuente: Elaboración propia.

El mismo procedimiento se repite para las capas de nivel de vegetación, tipo de suelo, velocidad de flujo de agua, pendiente, vías de acceso, e instalaciones por afectarse.

Para obtener el resultado de acuerdo a las reglas que anteriormente fueron designadas se realizó la suma de las seis capas ráster finales, las cuales representan nuestros criterios de acuerdo al diagrama de jerarquías propuestas al inicio del capítulo.

Es importante mencionar que para el cálculo del mapa final se tomaron en cuenta los promedios resultantes de la matriz de comparaciones pareadas, de este modo, cada capa resultante a la calculadora ráster (herramienta que permite hacer operaciones entre formatos ráster dentro de QGIS). La forma de realizar este cálculo se muestra en la Figura 36, donde se suma cada una de las capas de información, para obtener como salida un único mapa con base a la escala de preferencias previamente definida. Después de agregar las capas de información se utiliza el promedio obtenido de las comparaciones pareadas para multiplicarlo de acuerdo al valor que corresponda a la capa de información.

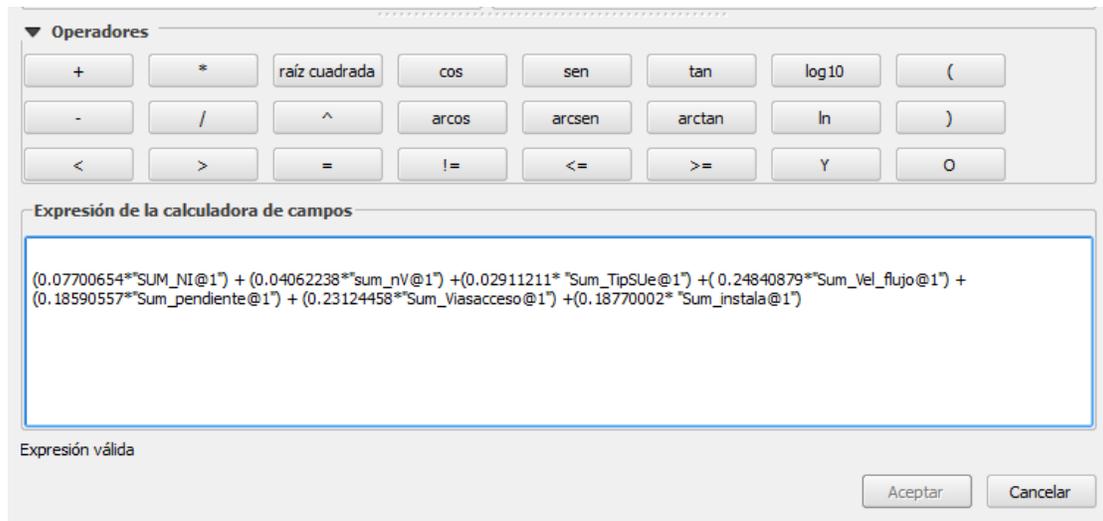
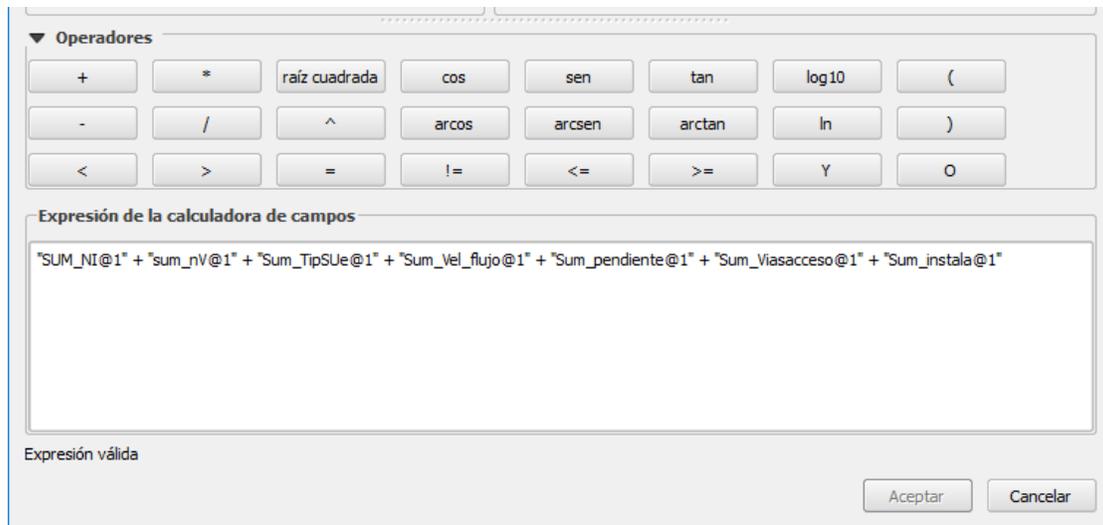


Figura 36. Álgebra de mapas con las ponderaciones obtenidas con el método PJA

Fuente: Elaboración propia.

Una vez multiplicado su respectivo valor del promedio de las comparaciones pareadas, finalmente se obtiene un mapa final con el resultado en función de la escala propuesta, es decir: apto (3), condiciones aceptables (2) y no deseable (1). Este mapa se muestra en la Figura 37.

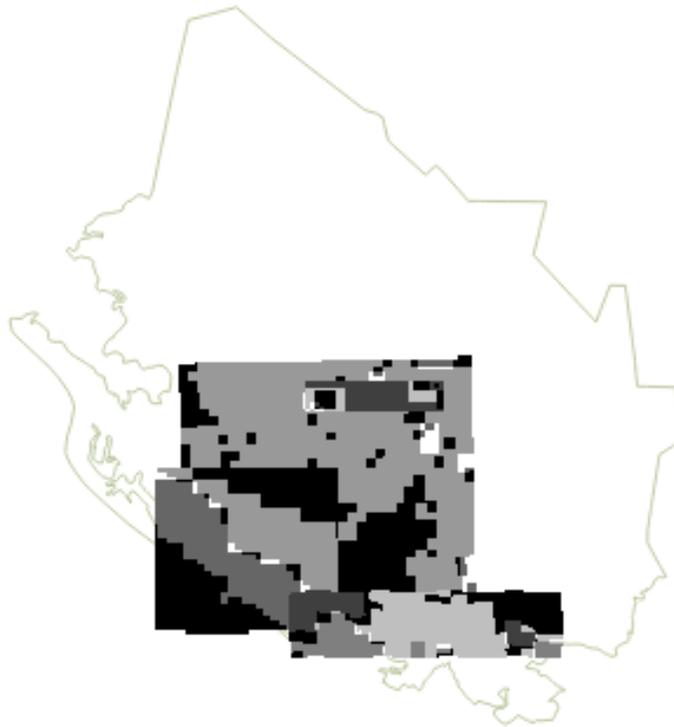


Figura 37. Mapa resultante del álgebra de mapas y aplicación del método PJA

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenido el resultado se tiene que realizar un trabajo de geoprocésamiento el cual permite visualizar de una mejor manera la zona de mayor aptitud, después procesar la información ráster, para tener una mejor calidad visual de las zonas, se realizó un proceso de poligonización, el cual es un proceso inverso a la rasterización, es decir, consiste en transformar los píxeles ráster a un formato vectorial, lo cual nos da una mejor calidad visual de nuestros resultados.

El proceso de mejorar la calidad visual del mapa resultante se muestra en la Figura 38, QGIS cuenta con una herramienta la cual permite la transformación del formato ráster a vectorial.

Por último, al adaptar los colores necesarios, se generó el mapa final con base en los colores que habíamos adaptado, es decir, en función de las condiciones aptas, aceptables y no deseables. Esta representación es la Figura 39.

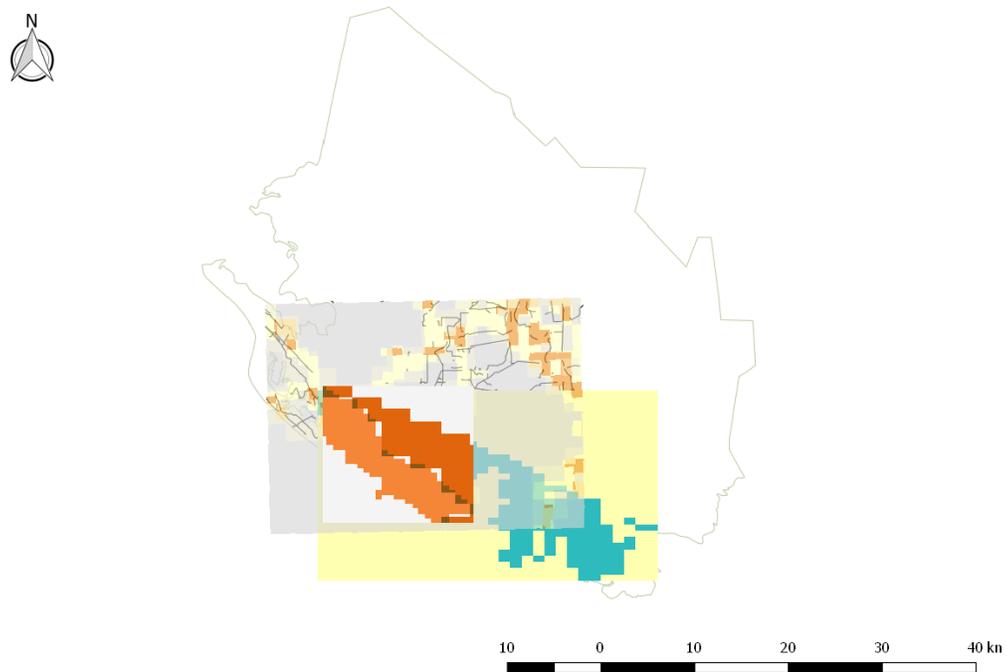


Figura 38. Conversión de formato ráster a vectorial

Fuente: Elaboración propia.

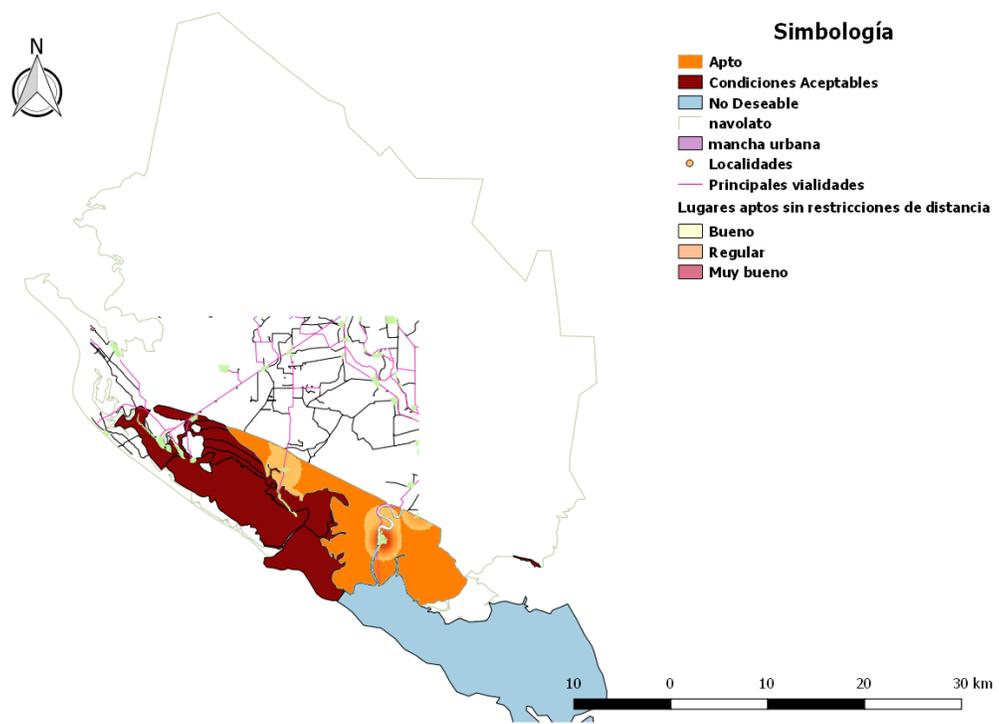


Figura 39. Mapa final en formato vectorial

Fuente: Elaboración propia.

5.5. Identificación de puntos de evacuación

Por otra parte, los puntos de reunión propuestos para desalojar a la población se muestran sobre el lugar más apto, y que cumple con las mejores condiciones que previamente se establecieron, como se observa en el mapa se propusieron dos lugares para los puntos de reunión, el primero cumple con las condiciones de accesibilidad, para poder llevar a la gente hacia un lugar más seguro en la parte norte de la bahía, y por otra parte existe la posibilidad de establecer un punto de reunión en alguna de las localidades que se encuentran en la parte central de la bahía la cual cumple con las condiciones de aptitud para establecer el punto de reunión.

Cabe mencionar que el mapa resultante no toma en cuenta restricciones de distancia, por lo que solo elige los lugares que sean más aptos, estos pueden ser utilizados como refugios temporales.

Para elegir los puntos de reunión se debe tener en cuenta que la determinación de estos lugares debe de ser antes de que ocurra el fenómeno en cuestión, es importante establecer las restricciones que nos facilitaran la determinación de los mismos.

En primer lugar, para este ejercicio se ha considerado que, en condiciones previas a la ocurrencia de un huracán, se limita a 1,000 m de caminata hacia el punto de reunión, por cuestiones de tiempo y esfuerzo. Otra cuestión importante a tener en cuenta es que el punto de reunión debe de estar en una vialidad primaria, es decir que permita ya sea a algún autobús o combi desplazarse hacia lugares más seguros.

Para lograr cumplir con estas restricciones es necesario, tener la capa de calles dentro de las diferentes localidades. Después de eso se determina la medida lineal de la capa de calle a partir de la vía primaria más importante. Una vez tomada la medida lineal en función de las calles, se divide el total de la distancia entre el rango deseado puede ser de 0 a 1,000 m.

Como se observa en la Figura 40 con la sobreposición de Google Maps se puede establecer, que efectivamente el punto de reunión se encuentra sobre una vía primaria, en intervalos de 1,000 m cada uno de los puntos. Se realiza el mismo procedimiento para cada una de las localidades.

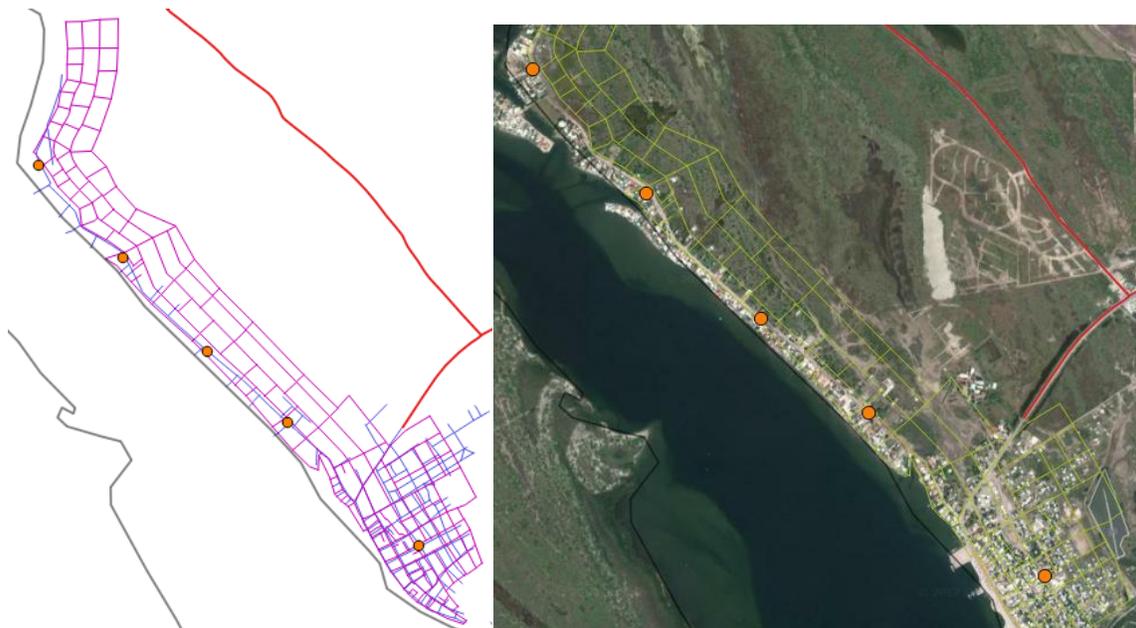
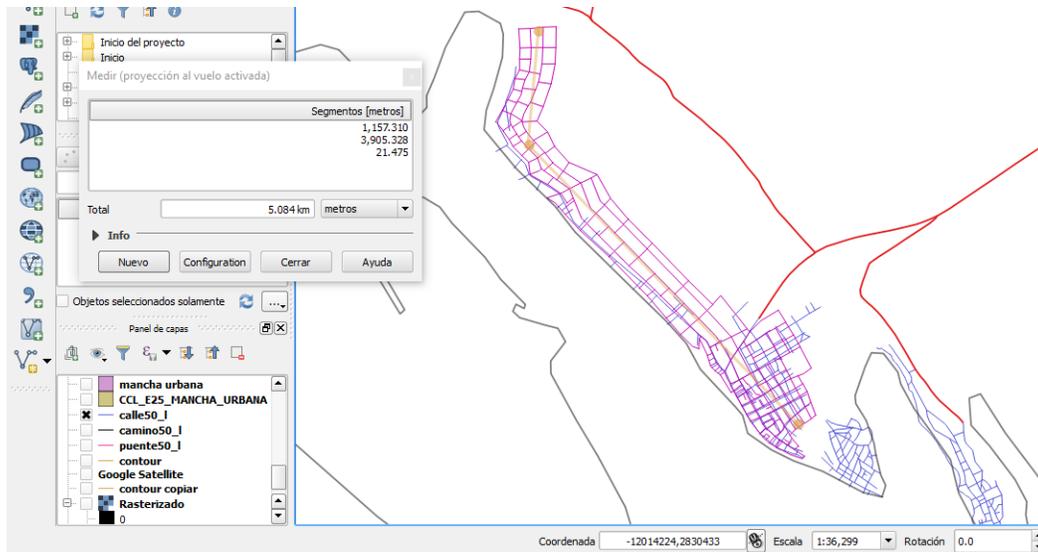


Figura 40. Identificación de puntos de reunión

Fuente: Elaboración propia.

Por último se genera un capa de puntos de reunion los cuales son propuestos en funcion de la longitud de la localidad, teniendo en cuenta siempre las vias primarias de acceso.

En el mapa en color rojo se observa la ubicación de cada uno de los puntos de reunión, mismos que cumplen con las condiciones de distancia de acuerdo a la condición de no rebasar más de 1,000 m, para que la gente no camine distancias

que en condiciones previas a un huracán pueden resultar muy largas para recorrer. Por otra parte, queda definida la aptitud de la Bahía de Altata en la Figura 41, en color verde se observa que es una zona no deseable para ubicar puntos debido a que las condiciones de relieve y accesibilidad, hacen nula la posibilidad de establecer puntos de reunión, en contraste con las zonas en color morado y beige, en donde se encuentran las condiciones aptas para poner puntos de reunión.

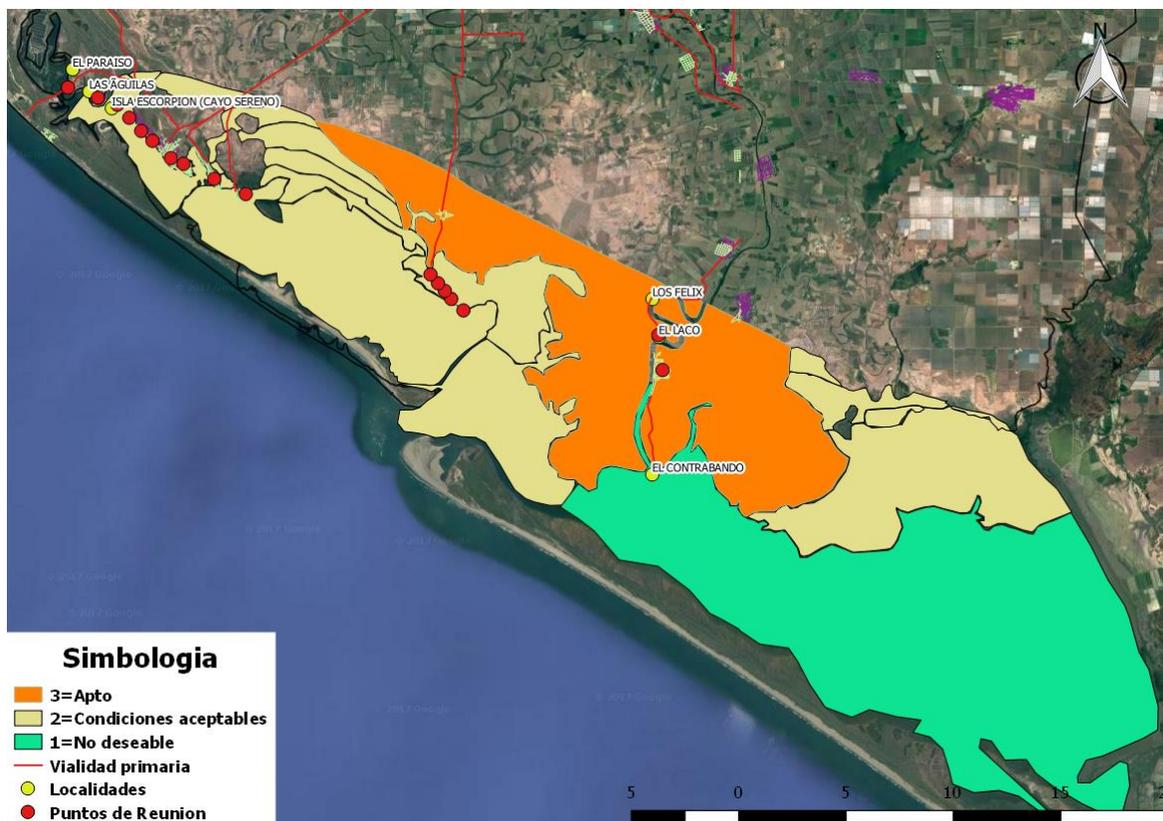


Figura 41. Ubicación de los puntos de reunión en formato vectorial

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Derivado del trabajo anterior se desprenden las siguientes conclusiones, recomendaciones y posibles líneas de trabajo futuro.

Conclusiones

Las principales conclusiones alcanzadas al haber concluido este Trabajo Terminal de Grado son las siguientes:

- El uso de los SIG permite realizar la incorporación de información de naturaleza geográfica, sociodemográfica y espacial en un proceso de apoyo a la toma de decisiones en caso de una situación de riesgo para los habitantes de una población. Esta incorporación ya se ha hecho para valorar el riesgo de ciertos sitios ante huracanes y otro tipo de desastres, pero no para la identificación de sitios de reunión ante desastres.
- La evaluación multicriterio ha demostrado ser una herramienta consistentemente utilizada en la gestión de riesgos ante desastres de distinta naturaleza. Al ser integrada con herramientas de análisis espacial se alcanza una evaluación integral de los riesgos cuando estos son generados por un proceso que conlleva una naturaleza multifactorial.
- Los SIGs por otra parte son una parte fundamental para integrar resultados de análisis espacial complejos, como lo son las diferentes variables territoriales que componen una determinada zona. Partiendo de la localización espacial se pueden establecer reglas las cuales ayudan a definir condiciones, las cuales pueden ser un factor de ayuda al momento de cumplir un objetivo.
- La técnica PJA permite la estimación de ponderaciones con base en una estrategia sencilla de comparaciones pareadas, y conduce a resultados de los cuales, no necesariamente el evaluador puede tener una idea a priori. La técnica PJA ha sido implementada consistentemente para su utilización en herramientas de análisis espacial, facilitando la estimación de ponderaciones superando así los inconvenientes existentes en otras técnicas de valoración multicriterio. En el presente trabajo, la integración de esta información es también realizable como ejercicio de aplicación del conocimiento.
- La definición de criterios en función de las capas de información permitió generar un mapa de riesgo de la Bahía de Altata durante la ocurrencia de un huracán, este mapa se obtuvo con el empleo de un método de AEMC a partir

de la determinación de zonas con una mejor aptitud espacial para localizar puntos de reunión, en función de reglas las cuales nos permitieron encontrar valores adecuados para cumplir con el objetivo de trabajo.

- Los resultados fueron de la mano con una metodología enfocada a la prevención del riesgo, la cual utiliza la fórmula del riesgo, tomando de manera cuantitativa valores los cuales fueron determinados mediante una matriz de comparaciones pareadas, definidos por especialistas los cuales con base a sus conocimientos definieron el orden de importancia para cada uno de los criterios determinados.
- A través de este proceso fue posible la creación de escenarios base en función de diversos factores demográficos, físico-geográficos, de accesibilidad, esto aunado al conocimiento de algunos parámetros físicos de un huracán, lo cual permite establecer la ubicación de puntos de reunión, así como se identificaron elementos de ayuda en la construcción de rutas hacia las cuales se puede desalojar una población de un lugar determinado.
- Al utilizar herramientas las cuales ayuden a los planificadores y a los tomadores de decisiones a establecer programas, acciones e implementaciones las cuales resulten de utilidad para ayudar a la población en diversas temáticas como lo son la prevención de riesgos, el ordenamiento territorial y la planeación urbana.
- Es importante mencionar que mediante la implementación de herramientas para el soporte en la toma de decisiones se minimiza la exposición de la población a riesgos los cuales aumentan o disminuyen en función de que las instancias encargadas de evaluar dichos aspectos, conozcan de mejor manera su espacio geográfico.

Recomendaciones

A continuación, se mencionan las siguientes recomendaciones derivadas del presente trabajo.

- Es posible crear bancos de datos de información espacial y sugerir, ante las instancias gubernamentales a cargo de su administración (en este caso, el INEGI), que estén disponibles para poder replicar trabajos de esta naturaleza, sin invertir tiempos extensos en la consulta de información.

- Se recomienda trabajar de cerca con tomadores de decisiones en la gestión de riesgos para tener mayor sensibilización de las comparaciones pareadas en la obtención de las ponderaciones.

Trabajo futuro

De los hallazgos de este trabajo se pretende sentar las bases que eventualmente permitan encontrar estrategias generalizables que puedan ser aplicables a cualquier lugar vulnerable al riesgo por la ocurrencia de huracanes. Como posibles corrientes de trabajo futuro, derivado del presente trabajo, se identifican:

- La incorporación de otras estrategias multicriterio que pudieran ser métodos alternativos al PJA y, en consecuencia, se puedan establecer comparativos de desempeños en los tiempos requeridos y precisión en los análisis hechos.
- La generación de tecnologías que permitan la automatización de la utilización de las herramientas bajo el proceso metodológico aquí presentado.
- El estudio de cómo han sido sensibles los tomadores de decisiones en eventos de desastres ante la integración de información de naturaleza multicriterio con la finalidad de mejorar dichos procesos de toma de decisiones.
- La aplicación de este marco metodológico a escenarios de emergencias de otra naturaleza como sismos, erupciones volcánicas, accidentes industriales, etcétera.

Referencias

- Abu, B.S. (2013). Remote sensing, GIS, and AHP for assessing physical vulnerability to tsunami hazard. *Japan: International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering* Vol. 7.
- Acosta, J.O. (2011). *El uso de los SIG y la evaluación multicriterio (EMC) para la determinación de escenarios de peligros de inundaciones en cuencas fluviales. Estudio de caso Guanabo. Ciudad de la Habana*. La Habana cuba: Instituto de Geografía Tropical. Agencia de medio ambiente AMA.
- Baas, S. (2009). *Análisis de Sistemas de Gestión de Riesgo*. Roma Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Blodgett, R.H. & Keller, E.A. (2007). *Riesgos Naturales*. Madrid (España): Pearson Prentice Hall.
- Bode, N.W. & Codling, E.A. (2013). Human exit route choice in virtual crowd evacuations. *Animal Behaviour*, 86(2), pp. 347-358
- Borrough, P. (2001). *Principles of Geographical Information System for Land Resources Assesment*. New York: Oxford University.
- Bruyn, G.C. (1989). *Models and Methods in Multiple Criteria Decision Making*. Belgium: Pergamon Press.
- Buzai, G.D. (2013). *Sistemas de Información Geográfica (SIG), Teoría y Aplicación*. Lujan Provincia de Bueno Aires Argentina: Universidad de Lujan.
- Cano, J.I. (1996). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio*. Madrid: RA-MA.
- Cantos, J.O. & Ayala Carcedo, F.J. (2002). *Riesgos Naturales. Conceptos Fundamentales y Clasificación*. Madrid: Ariel.
- CENAPRED (2001). *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México. Atlas de riesgos de la República Mexicana*. Centro Nacional de Prevención de Desastres, México: SEGOB. Consultado en: <http://www.cenapred.unam.mx/es/DocumentosPublicos/PDF/SerieEspecial/diagnostico.pdf>.
- Eastman, J.R. (1995). Raster procedures for multi-criteria/multi-objective decisions. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 539-547.
- Garcia, E. (1998). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía. Serie Libros 6. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gómez, J. (1995). *Análisis geográfico ordenación del territorio y medio ambiente*. Universidad de Deusto. Bilbao, España.

- Hernández, S.V. (2010). *Obtención de mapas de riesgo a partir de trayectorias históricas de ciclones tropicales empleando evaluación*. La Habana: UCT GEOCUBA Investigación y Consultoría.
- Hernández, S.V. (2013). *Obtención de mapas de riesgo a partir de trayectorias históricas de ciclones tropicales empleando evaluación geoespacial multicriterio*. La Habana: UCT GEOCUBA.
- INEGI (2009). *Prontuario de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. México: Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática.
- INEGI (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010. Principales Resultados por localidad (ITER)*. Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática, INEGI.
- López, R.A. (2009). *Determinación de áreas con aptitud para la expansión urbana con fines de ordenamiento territorial aplicando el análisis espacial multicriterio: Caso cuenca baja del río Lujan*. Lima-Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York.
- Martínez, E., Álvarez, M., Arquero, A. & Romero, M. (2010). Apoyo a la selección de emplazamientos óptimos de edificios. Localización de un edificio universitario mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). *Informes de la Construcción* 62(519), pp. 35-45.
- Moreno, A. (2006). *Sistemas y Análisis de Información Geográfica*. Madrid: RA-MA.
- Moshinsky, M.R. (2015). *Atlas Nacional de Riesgos*. Consultado en <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/index.php/riesgos-hidrometeorologicos/ciclones-tropicales-huracanes>
- Na, H.S. & Banerjee, A. (2015). A disaster evacuation network model for transporting multiple priority evacuees. *IIE Transactions*, 47(11).
- Ospina, E.P. (2015). *Determinación de zonas aptas para la construcción de colegios distritales en la localidad de Suba, partiendo de métodos de análisis multicriterio y herramientas SIG*. Granada: Universidad Militar Nueva Granada.
- Pacheco, J.F. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. Santiago de Chile: CEPAL, Naciones Unidas.
- Preciado, J.M. (1997). El planteamiento teórico multiobjetivo/multicriterio y su aplicación a la resolución de problemas medioambientales y territoriales, mediante SIG ráster. *Espacio, Tiempo y Forma*, 129-151.
- Pusineri, G. (2006). *Aplicación de Sistemas de Información Geográfica para la prevención de riesgos y la formulación de planes de contingencia en inundaciones*. Buenos Aires, Argentina: FICH-UNL.

- Quintana Roo, (2007). *Plan Coordinador de Emergencias*. Cancún, Quintana Roo, México.
- Rinner, J.M. (1997). *Multicriteria Decision Analysis in Geographic information Science*. New York: Springer.
- Schott, T., Landsea, C., Hafele, G, Lorens, J., Taylor, A., Thurm, H., Ward, B., Willis, M., & Zaleski, W. (2012). *The Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale*. National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA.
- Sendra, J.B. (1992). *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid: Rialp.
- Sendra, J.B. (2004). *Sistemas de Información Geográfica y Localización de Instalaciones*. Madrid: RA-MA.
- Sharifi, M.A. (2006). *Spatial Multiple Criteria Decision Analysis In Integrated Planning*. Melbourne Australia: International Institute for Geo-Information Sciences and Earth Observation, ITC, The Netherlands.
- Voogd, H. (1983). *Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning*. London England: Pion.
- Wisner, B. & Adams, J. (2002). *La salud ambiental en emergencias y desastres: una guía práctica*. Organización Mundial de la Salud. Organización de las Naciones Unidas.

Anexo A. Proceso de Jerarquía Analítica (PJA)

El Proceso de Jerarquía Analítica (PJA) es definido como una técnica estructurada para organizar y analizar decisiones complejas, basadas en matemáticas y psicología, fue desarrollado por Thomas L. Saaty (1980) y ha sido ampliamente estudiado y refinado desde entonces. Esta metodología de análisis multicriterio se fundamenta en tres principios fundamentales: construcción de jerarquías, establecimiento de prioridades y consistencia lógica.

Construcción de las Jerarquías

Las jerarquías dentro de la metodología PJA, son aquellas que conducen a un sistema hacia un objetivo deseado, estas jerarquías se pueden ejemplificar como la solución de conflictos, el desempeño eficiente o la aptitud. La construcción de las jerarquías, debe de seguir un esquema jerárquico, el cual está compuesto por objetivo, criterios, subcriterios, y alternativas por evaluar (ver Figura A.1).

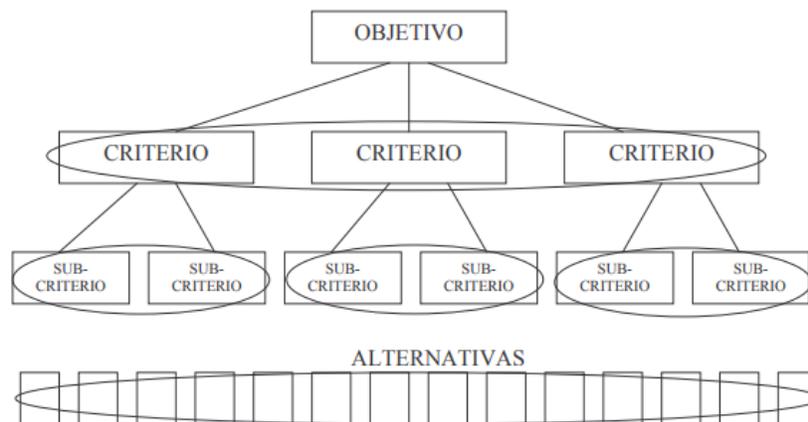


Figura A.1. Construcción de jerarquías en el Proceso de Jerarquía Analítica (PJA).

Fuente: Saaty (1980)

Establecimiento de prioridades

El cálculo de la prioridad se realiza en función de comparaciones a pares con respecto a un criterio dado. Para comparar los elementos se forma una matriz y se pregunta: ¿Cuánto supera este elemento (o actividad) al elemento con el cual se está comparando en la medida en que posee la propiedad, contribuye a ella, la domina, influye sobre ella, la satisface, o la beneficia? El segundo principio que

destaca de este método multicriterio es el establecimiento de prioridades entre los elementos de la jerarquía. Se propone una escala de prioridades como forma de independizarse de las diferentes escalas que existen entre sus componentes. Los seres humanos perciben relaciones entre los elementos que describen una situación, pueden realizar comparaciones a pares entre ellos con respecto un cierto criterio y de esta manera expresar la preferencia de uno sobre otro.

La síntesis del conjunto de estos juicios arroja la escala de intensidades de preferencias (prioridad) entre el total de elementos comparados. De esta forma es posible integrar el pensamiento lógico con los sentimientos, la intuición (que es reflejo de la experiencia), etcétera. Los juicios que son ingresados en las comparaciones a pares, responden a estos factores. Los tipos de comparaciones pareadas que se presentan son:

1. Importancia: Apropiado cuando se comparan criterios entre sí.
2. Preferencia: Apropiado cuando se comparan alternativas.
3. Más probable: Usado cuando se compara la probabilidad de los resultados, ya sea con criterios o alternativas.

Se crea una matriz para cada criterio o subcriterio de la jerarquía que permita determinar la prioridad P_{ij} , de los elementos de su nivel inmediatamente inferior al comparar de a pares estos elementos del nivel inferior usando una escala de proporciones también conocida como escala de Saaty (Tabla A.1).

Tabla A.1. Escala de Saaty para comparaciones pareadas en la metodología PJA

Apreciación cualitativa	Valor	Recíproco
Igualmente preferible	1	1
Entre igual y moderadamente preferible	2	1/2
Moderadamente preferible	3	1/3
Entre moderadamente y fuertemente preferible	4	1/4
Fuertemente preferible	5	1/5
Entre muy fuerte y fuertemente preferible	6	1/6
Muy fuertemente preferible	7	1/7
Entre muy fuerte y extremadamente preferible	8	1/8
Extremadamente preferible	9	1/9

Fuente: Saaty, 1980

Consistencia lógica

Los seres humanos tienen la capacidad de establecer relaciones entre los objetos o las ideas, de manera que sean consistentes, es decir, que se relacionen bien entre sí y sus relaciones muestren congruencia. En este sentido consistencia implica dos cosas: transitividad y proporcionalidad; la primera es que deben respetarse las relaciones de orden entre los elementos, es decir, si A es mayor que C, y C es mayor que B entonces la lógica dice que A es mayor que B. La segunda es que las proporciones entre los órdenes de magnitud de estas preferencias también deben cumplirse con un rango de error permitido. Por ejemplo, si A es 3 veces mayor que C, y C es dos veces mayor que B, entonces A debe ser 6 veces mayor que B. Este sería un juicio 100% consistente ya que se cumple la relación de transitividad y de proporcionalidad.

La escala a que se hace referencia existe en el inconsciente, no está explícita y sus valores no son números exactos, lo que existe en el cerebro es un ordenamiento jerárquico para los elementos. Dada la ausencia de valores exactos para esta escala la mente humana no está preparada para emitir juicios 100% consistentes (que cumplan las relaciones de transitividad y proporcionalidad). Se espera que se viole la proporcionalidad de manera tal que no signifique violaciones a la transitividad. Por ejemplo, en la siguiente Figura A.2 se muestra una escala gráfica la valoración promedio en función de una expresión verbal.



Figura A.2. Escala numérica y su relación con la escala verbal en el Proceso de Jerarquía Analítica (PJA).

Fuente: Elaboración propia.

Los juicios consistentes imponen 2 propiedades en forma simultánea:

- Transitividad de las preferencias: Si C1 es mejor que C2 y C2 es mejor que C3 entonces se espera que C1 sea mejor que C3.
- Proporcionalidad de las preferencias: Si C1 es 3 veces mejor que C2 y C2 es 2 veces mejor que C3 entonces se espera que C1 sea 6 veces mejor que C3.

Por supuesto, es necesario, cierto grado de consistencia en la fijación de prioridades para los elementos o actividades con respecto de algún criterio para obtener resultados válidos en el mundo real.

El PJA mide la inconsistencia global de los juicios mediante la Proporción de Consistencia, que es el resultado de la relación entre el Índice de Consistencia y el Índice Aleatorio. El Índice de Consistencia es una medida de la desviación de consistencia de la matriz de comparaciones a pares y el Índice Aleatorio es el índice de consistencia de una matriz recíproca aleatoria, con recíprocos forzados, del mismo rango de escala de 1 hasta 9. El valor de esta proporción de consistencia no debe superar el 10%, para que sea evidencia de un juicio informado.

Anexo B. Categorías de los Huracanes

Un huracán es un tipo de ciclón tropical, el término genérico para un sistema de baja presión que generalmente se forma en los trópicos. Los ingredientes para un huracán incluyen un disturbio atmosférico preexistente, océanos tropicales tibios, humedad y vientos relativamente ligeros en lo alto. El poder de los huracanes se mide en la escala Saffir-Simpson, que está estructurada en un rango de 1 a 5 para estimar los daños potenciales a la propiedad e inundaciones producidas cuando un huracán llega a tierra. Las siguientes descripciones corresponden a las dadas por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Categoría 1

Vientos de 74 a 95 millas por hora. La marea sube entre 4 y 5 pies sobre lo normal. No se produce un daño significativo en los edificios o construcciones, pero puede dañar casas rodantes, arbustos, árboles, y señales de tránsito débiles. Ocurren algunas inundaciones en caminos costeros.

Categoría 2

Vientos de 96 a 110 millas por hora. La marea sube entre 6 y 8 pies sobre lo normal. Se dañan algunos techos, puertas y ventanas de edificios y construcciones; los arbustos y árboles sufren un considerable daño, incluso algunos árboles pueden caer. Daño considerable a casas rodantes, muelles y señales de tránsito débiles. Unas dos o cuatro horas antes de la llegada del ojo del huracán se han inundado las rutas costeras y las de evacuación que están a baja altura. Algunas embarcaciones pequeñas en lugares de anclaje desprotegido rompen los postes de amarre.

Categoría 3

Vientos entre 111-130 millas por hora. La marea sube entre 9 y 12 pies sobre el nivel normal. Las estructuras pequeñas son destruidas por inundaciones costeras, las estructuras más grandes son destruidas por el embate de las olas y por escombros flotantes. Los árboles y arbustos son estropeados, pierden el follaje por la fuerza del viento y algunos grandes caen. Las casas rodantes son destruidas. Las rutas de evacuación que se encuentran a baja altura tienen que ser cortadas entre

3 y 5 horas antes de la llegada del ojo del huracán por el alto nivel de agua en ellas. Las inundaciones cerca de la costa destruyen estructuras menores. El terreno que está a menos de cinco pies sobre el nivel del mar y ocho millas tierra adentro (incluso más) podría ser inundado. Puede ser necesaria la evacuación de personas que habitan casas que están a un bajo nivel sobre el mar, incluso a varias cuadras de la línea costera.

Categoría 4

Vientos entre 131 y 155 millas por hora. El mar está sobre los 13 o 18 pies de su nivel normal. Fallas más generalizadas en las paredes, y algunos techos de pequeñas residencias colapsan. Arbustos, árboles y todas las señales en la calle son derribadas. Destrucción total de casas rodantes. Daño extensivo a puertas y ventanas. Por los altos niveles de agua, las rutas de evacuación que están a baja altura deben ser cerradas con 3 a 5 horas de anticipación a la llegada del ojo del huracán. Las plantas bajas de las estructuras ubicadas cerca de la orilla del mar sufren destrucción considerable. Terrenos que están a menos de 10 pies sobre el nivel del mar podrían ser inundados obligando a la evacuación masiva de áreas residenciales que se encuentran a seis millas al interior.

Categoría 5

Vientos superiores a las 155 millas. La marea supera los 18 pies sobre el nivel normal. Muchas residencias y edificios industriales sufren la falla completa de sus techos. Algunos edificios colapsan por completo. Todos los arbustos, árboles y señales de tránsito son derribados. Completa destrucción de casas rodantes. Severa y extensiva destrucción de puertas y ventanas. Las rutas de evacuación que están a baja altura son cortadas por los altos niveles de agua entre 3 y 5 horas antes de la llegada del centro del huracán. Serios daños a las plantas bajas de todas las estructuras ubicadas a menos de 15 pies sobre el nivel del mar y a unas 500 yardas de la línea de la costa. Podría ser necesaria la evacuación masiva de las áreas residenciales ubicadas en áreas a baja altura que se ubican entre las 5 y 10 millas de la línea de la costa.