



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Análisis multi-criterio para  
ubicar una reserva natural  
de ajolotes.**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniera Geomática**

**P R E S E N T A**

Andrea Isadora Vargas Garduño

**DIRECTOR(A) DE TESIS**

Ing. Ana Lilia Salas Alvarado



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020**



“Análisis multi-criterio para ubicar una reserva natural de ajolotes”

"Trata de dejar este mundo en mejores  
condiciones de cómo lo encontraste."

**Robert Baden-Powell**

“Análisis multi-criterio para ubicar una reserva natural de ajolotes”

## AGRADECIMIENTOS.

A mi mamá Ina por compartirme su amor por la naturaleza y la vida.

Quiero agradecer a quienes han sido mis puntos cardinales guiándome en mi vida, a mi mamá Rocío Garduño quien es mi inspiración a diario, por ti es que soy quien soy y estoy aquí, este trabajo es para ti con todo mi amor y orgullo de ser tu hija; a Ana Paula Vargas la mejor compañera de vida, por todos esos momentos de complicidad y espero compartir otras vidas contigo; a Julio Méndez por llenarme de amor, por confiar en mí, motivarme a seguir adelante y nos espera un mundo para conocerlo de la mano y a Nicolás Garduño el mejor abuelo, dejaste una marca en mi imborrable.

Un agradecimiento enorme a la Ing. Ana Lilia Salas Alvarado por acompañarme en este trabajo, por su apoyo, interés y entrega es que este trabajo se pudo realizar y gracias también por inspirarme desde inicios de la carrera, por la pasión que pone al impartir sus clases y el enorme interés a sus alumnos es que un día me gustaría ser una profesora ejemplar como ella.

Gracias a mis amigos con los que he compartido mi vida y me han permitido formar parte de la suya, son parte fundamental de mi historia a Angélica Hernández, Vania Ubaldo, Yael Palacios, Virgilio Galindo, Ana Luisa Robledo y Angélica Ramírez. Y a Mauricio Rivas por ser un gran compañero y amigo, gracias por crecer juntos en estos últimos años de la universidad.

A Alejandra de la Merced por haberme brindando un hogar lleno de amor, a Roberto Garduño por apoyarme a realizar una de mis mayores metas y a Arturo Vargas por motivarme a soñar en grande.

A Sergio Ortiz y Marilú Ahumada, Evany Díaz, Fernanda Ortiz y Paola Ortiz por brindarme una segunda familia y siempre estar ahí para cuando más los necesito.

Al Ing. José Benito Gómez Daza por aceptar formar parte del jurado y al M. I. Adolfo Reyes Pizano, M. I. Roberto Asencio Villagomez, Ing. Norma Isela Deloya Vega, Ing. Erik de Valle Salgado, a la Dra. Griselda Berenice Hernández Cruz por ser gran inspiración en mi paso por la facultad de ingeniería.

A el Ing. Irak Pérez, Ing. Miriam Honorato, Ing. Ramón Chávez, Ing. Eduardo Juan Diego, Ing. Guillermo Ramírez, Ing. Andrés Guadarrama, Ing. Víctor Medrano, Ing. Jafet Zimri y al Ing. Carlos López que han sido parte esencial en mi formación fuera de la facultad, gracias por compartir conmigo sus conocimientos y darme la oportunidad de crecer profesionalmente.

## INDICE

LISTADO DE FIGURAS.....	1
LISTADO DE TABLAS.....	3
RESUMEN.....	4
INTRODUCCIÓN.....	6
OBJETIVOS.....	8
OBJETIVO GENERAL.....	8
OBJETIVOS PARTICULARES.....	8
1. ANTECEDENTES.....	9
1.1 AJOLOTE.....	9
1.2 EXTINCIÓN DE LOS AJOLOTES.....	12
2. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	17
2.2 ANÁLISIS MULTI-CRITERIO.....	18
2.3 PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO.....	19
2.3.1 PRINCIPIOS.....	20
2.3.2 AXIOMAS.....	21
2.3.3 SÍNTESIS.....	21
3. METODOLOGÍA.....	25
3.1 INFORMACIÓN RECOPIADA.....	25
3.2 PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO.....	26

3.3 DEFINICIÓN Y GENERACIÓN DE CRITERIOS Y ALTERNATIVAS. ....	27
3.3.1 TEMPERATURA. ....	27
3.3.2 USO DE SUELO Y VEGETACIÓN.....	28
3.3.3 MUESTREO PECES.....	30
3.3.4 ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS.....	32
3.4 DEFINICIÓN Y GENERACIÓN DE RESTRICCIONES. ....	33
3.4.1 CUERPOS / CORRIENTES DE AGUA.....	33
3.5 PONDERACIÓN DE CRITERIOS.....	34
4. RESULTADOS.....	36
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	39
ANEXOS. ....	40
BIBLIOGRAFÍA. ....	48

## LISTADO DE FIGURAS.

Figura 1. Ilustración de un ajolote. ....	10
Figura 2. Ilustración de un ajolote. ....	11
Figura 3. Mapa de distribución de las especies de <i>Abystoma</i> . SEMARNAT (2018). Programa de acción para la conservación de las especies: <i>Ambystoma</i> spp [Mapa].....	12
Figura 4. Formato ráster y formato vectorial. Recuperado de <a href="http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad2/td_sig.htm">http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad2/td_sig.htm</a> .....	18
Figura 5. Proceso de un Análisis Multi-criterio. Elaboración propia. ....	19
Figura 6. Ejemplo de matriz pareada. Elaboración propia. ....	21
Figura 7. Ejemplo de matriz pareada normalizada y vectores característicos. Elaboración propia. .	21
Figura 8. Ejemplo de pesos correspondientes a cada criterio. Elaboración propia. ....	22
Figura 9. Ejemplo de vector de la suma ponderada. Elaboración propia. ....	22
Figura 10. Ejemplo de vector de consistencia. Elaboración propia. ....	22
Figura 11. Estructura jerárquica para la ubicación de una reserva natural de ajolotes. Elaboración propia.....	26
Figura 12. Ponderación de alternativas de temperatura. Elaboración propia. ....	27
Figura 13. Mapa de ponderación de alternativas de temperatura. Elaboración propia. ....	28
Figura 14. Ponderación de alternativas de Uso de Suelo y Vegetación. Elaboración propia. ....	29
Figura 15. Mapa de ponderación de alternativas de USV. Elaboración propia.....	30
Figura 16. Ponderación de alternativas de distancia a muestreo de peces. Elaboración propia. ....	31
Figura 17. Mapa de ponderación de alternativas de distancia a muestreo de peces. Elaboración propia.....	32
Figura 18. Mapa con la ubicación de las ANP terrestres en México. Elaboración propia. ....	33
Figura 19. Matriz de comparaciones pareadas. Elaboración propia. ....	34
Figura 20. Matriz de comparaciones pareadas normalizada. Elaboración propia. ....	34
Figura 21. Ponderación para cada criterio. Elaboración propia.....	35

Figura 22. Mapa de resultados de zonas factibles para la localización de una reserva natural de ajolotes en México. Elaboración propia. ....37

Figura 23. Mapa de resultados de zonas factibles delimitadas por cuerpos de agua para la localización de una reserva natural de ajolotes en México. Elaboración propia. ....38

Figura 24. Mapa "Clasificación de intervalos de temperatura". Elaboración propia. ....40

Figura 25. Mapa "Zonas factibles para la localización de una reserva natural de ajolotes en el estado de Durango". Elaboración propia. ....41

Figura 26. Mapa "Zonas factibles para la localización de una reserva natural de ajolotes en el estado de Hidalgo". Elaboración propia. ....42

Figura 27. Mapa "Zonas factibles para la localización de una reserva natural de ajolotes en el estado de México". Elaboración propia. ....43

Figura 28. Mapa "Zonas factibles para la localización de una reserva natural de ajolotes en el estado de Michoacán de Ocampo". Elaboración propia. ....44

Figura 29. Mapa "Zonas factibles para la localización de una reserva natural de ajolotes en el estado de Morelos". Elaboración propia. ....45

Figura 30. Mapa "Zonas factibles para la localización de una reserva natural de ajolotes en el estado de San Luis Potosí". Elaboración propia. ....46

## LISTADO DE TABLAS.

Tabla 1. Taxonomía del Ajolote. SEMARNAT (2018). Programa de acción para la conservación de las especies: Ambystoma spp [Tabla].....	9
Tabla 2. Grado de extinción de las especies Ambystoma existentes en México. Elaboración propia.....	13
Tabla 3. Escalas de comparación de AHP. Saaty, T. (1982), Decision Making for leaders. [Tabla]. .....	20
Tabla 4. Índices de inconsistencia aleatoria. Sánchez G. (2003). Técnicas participativas para la planeación. [Tabla]. .....	23
Tabla 5. Descripción y fuente sobre la información recopilada. Elaboración propia. ....	25
Tabla 6. Factibilidad de intervalos de temperatura. Elaboración propia. ....	27
Tabla 7. Clasificación general de los usos de suelo y si son óptimos para el desarrollo de los ajolotes. Elaboración propia. ....	29
Tabla 8. Factibilidad de alternativas de Uso de suelo y Vegetación. Elaboración propia....	29
Tabla 9. Factibilidad de alternativas de distancia muestreo de peces. Elaboración propia. .	31
Tabla 10. Tipo de entidades de cuerpos y corrientes de agua. Elaboración propia. ....	33
Tabla 11. Listado de estados donde se ubican los resultados de zonas factibles para ubicar una reserva de ajolotes. Elaboración propia. ....	36

## RESUMEN.

El ajolote es una especie endémica de México que cuenta con ciertas características únicas como la regeneración de extremidades, órganos y tejidos lesionados, también es una especie neotenia, es decir, alcanza la madurez sexual conservando sus características larvarias, y a diferencia de la mayoría de anfibios no pasa por un proceso de metamorfosis. Hoy en día esta especie se encuentra en peligro de extinción dado por el crecimiento urbano, la sobreexplotación, introducción de peces exóticos, entre otros.

El objetivo de este trabajo es localizar el lugar idóneo en donde ubicar una reserva natural de ajolotes para ayudar a evitar su extinción, utilizando un método de análisis multi-criterio llamado “proceso de análisis jerárquico” en conjunto con los sistemas de información geográfica.

Se definieron variables con base en las principales características necesarias en el hábitat de los ajolotes y con el proceso de análisis jerárquico se definió un peso a cada una de las variables según su importancia respecto a las otras. Se realizaron y procesaron capas de información georreferenciada que representarán a cada una de las variables en un sistema de información geográfica, estas capas se combinaron creando un análisis integrado de las posibles zonas en donde ubicar la reserva de ajolotes y su factibilidad.

Finalmente se detectaron posibles zonas a lo largo del país donde es factible la localización de una reserva natural donde los ajolotes se pueden desarrollar y así aumentar su población para evitar su extinción.

## ABSTRACT.

The axolotl, an endemic species of Mexico, has unique characteristics, such as the regeneration of limbs, organs and injured tissues, it is also a neotenic species, which means that it reaches sexual maturity while preserving its larval characteristics, and unlike most amphibians, it does not go through a process of metamorphosis. Currently, the axolotl is an endangered species due to urbanization, over-exploitation, introduction of exotic fish, among others.

The objective of this work is to identify the ideal place to locate a natural reserve for axolotls to help prevent their extinction, using a multi-criteria analysis method called "Analytic Hierarchy Process" along with geographic information systems.

Variables were defined based on the main characteristics that are necessary in the habitat of the axolotls and with the analytic hierarchy process, a value was defined for each of the variables according to its importance with respect to the others. Layers of georeferenced

information were made and processed which will represent each of the variables in a geographic information system, these layers were combined creating an integrated analysis of the potential zones to locate the axolotl reserve and its feasibility.

Finally, potential areas were detected throughout the country where it is viable to locate a natural reserve where axolotls can develop and increase their population to avoid extinction.

**Key words.**

Axolotl, Geographic Information Systems (GIS), Multi-criteria analysis, Analytic Hierarchy Process (AHP).

## INTRODUCCIÓN.

Actualmente el cambio climático, el crecimiento de la zona urbana, el mal manejo de los recursos naturales, el poco interés de las autoridades por proteger la naturaleza y la indiferencia de parte de la población hacia el medio ambiente, están llevando a México a perder gran parte de su biodiversidad en especies de flora y fauna.

Una especie que está clasificada como amenazada o en peligro por la *International Union for Conservation of Nature IUCN* es el ajolote o *ambystoma*, la cual es una especie endémica de México conocido desde tiempos prehispánicos. El ajolote es un anfibio con características excepcionales como la regeneración de sus extremidades y órganos, también es capaz de alcanzar la madurez sexual conservando sus características físicas larvarias.

Los ajolotes se distribuyen a lo largo de gran parte del territorio mexicano, principalmente en los bosques templados ubicados en la Faja Volcánica Transmexicana, ecosistemas que se han perdido o modificado aceleradamente siendo este uno de los principales motivos por los cuales esta especie está en peligro de extinción.

Este trabajo tiene el objetivo de localizar un sitio en el territorio mexicano donde sea factible localizar una reserva natural de ajolotes para promover su conservación y evitar la extinción de esta especie.

Uno de los principales motivos de esta tesis es el interés de establecer bases para llevar a cabo proyectos donde realizando el trabajo de campo y muestreo necesario, aplicar esta metodología para apoyar la conservación de diferentes especies no solo del ajolote y establecer espacios en los cuales se puedan crecer y reproducir adecuadamente.

Otro motivo es mostrar que la Ingeniería Geomática puede apoyar a otras ciencias como la biología, química, geografía y otras ingenierías en el desarrollo de proyectos o trabajar en conjunto para dar solución los grandes problemas existentes en nuestra actual sociedad.

Para analizar esta problemática es necesario identificar las causas que están llevando a esta especie al borde de la extinción y las condiciones idóneas necesarias en el hábitat de los ajolotes y a partir de ellas crear variables de cada una y con un sistema de información geográfica, SIG, gestionar y manipular diferentes tipos de información para producir una representación geoespacial de cada variable.

Utilizando “proceso de análisis jerárquico” un método de análisis multi-criterio se evalúan todas las variables o causas que están llevando a la extinción a los ajolotes y se define un peso a cada variable dependiendo la importancia que tenga una sobre las demás, este peso se determina mediante operaciones matriciales establecidas en el método de proceso de análisis jerárquico desarrollado por Thomas Saaty a finales de los años 70’s, este método es muy utilizado en problemas de localización.

Empleando un sistema de información geográfica se incorporan pesos a las capas de información geoespacial de las variables y utilizando una herramienta se combinan para crear un análisis integrado.

Dando como resultado una nueva capa en la cual señala los lugares viables localizar la reserva natural de ajolotes y el nivel de factibilidad.

## OBJETIVOS.

### OBJETIVO GENERAL.

Definir y evaluar una serie de variables y limitantes con base en las condiciones necesarias que requieren los ajolotes para identificar una zona idónea para ubicar aplicando un análisis multi-criterio una reserva natural de ajolotes.

### OBJETIVOS PARTICULARES.

- Identificar y analizar las características del hábitat, las principales necesidades y amenazas de los ajolotes.
- Conocer el método de “Procesos de Análisis Jerárquico” y cómo aplicarlo en conjunto con los Sistemas de Información Geográfica para resolver un problema de análisis multi-criterio.
- Definir los factores o variables y restricciones a considerar para la ubicación de una reserva natural de ajolotes.
- Calcular la importancia de cada factor y realizar una ponderación.
- Analizar los resultados e identificar cuales son las zonas idóneas para ubicar una reserva natural de ajolotes.

## 1. ANTECEDENTES.

“Ajolote el dios azteca que resiste a la muerte.”

El planeta en un principio estaba en total oscuridad, los antiguos Dioses aztecas se reunieron en Teotihuacán con el propósito de crear el Sol y la Luna; para ello en un lugar llamado Teotexcalli se sacrificaron dos Dioses en una hoguera, las deidades elegidas fueron Tecuciztécal el cual renació en la Luna mientras que Nanahuatzín reencarno en el Sol y para evitar que ambos salieran al mismo tiempo, los demás Dioses se tenían que sacrificar para crear el día y la noche.

El dios del viento Ehécatl fue el responsable de sacrificar a los Dioses, sin embargo, el Dios perro, Xólotl hermano de Quetzalcoatl se rehusó a ser sacrificado y escapó, huyó hacia las milpas y se convirtió en el pie del maíz que tiene dos tallos, el cual los campesinos llaman Xólotl. Cuando el viento lo descubrió se escondió entre los magueyes, convirtiéndose en lo que se conoce como mexólotl “maguey de dos cuerpos”, al ser nuevamente hallado, volvió a huir.

Finalmente, se sumergió en el agua convirtiéndose en *axólotl* (ajolote), donde lo capturaron y sacrificaron. Con su muerte colaboró en el sacrificio que los astros necesitaban para moverse y con ello iniciar la temporalidad y la vida del universo. Pero antes, él Dios creó todo lo anormal en la naturaleza y fue destinado a transportar al inframundo al Sol que muere en el ocaso, una misión muy importante en la dinámica cósmica, que expresa que la oscuridad, la anormalidad y la muerte son parte esencial de la vida. (de la Garza, 2014)

### 1.1 AJOLOTE.

Los ajolotes (del náhuatl: *atl* “agua” y *xolotl* “monstruo”; monstruo de agua), son anfibios del género *Ambystoma* que tienen la capacidad de conservar sus características larvarias aun cuando alcanza la madurez sexual, fenómeno conocido como *neotenia*.

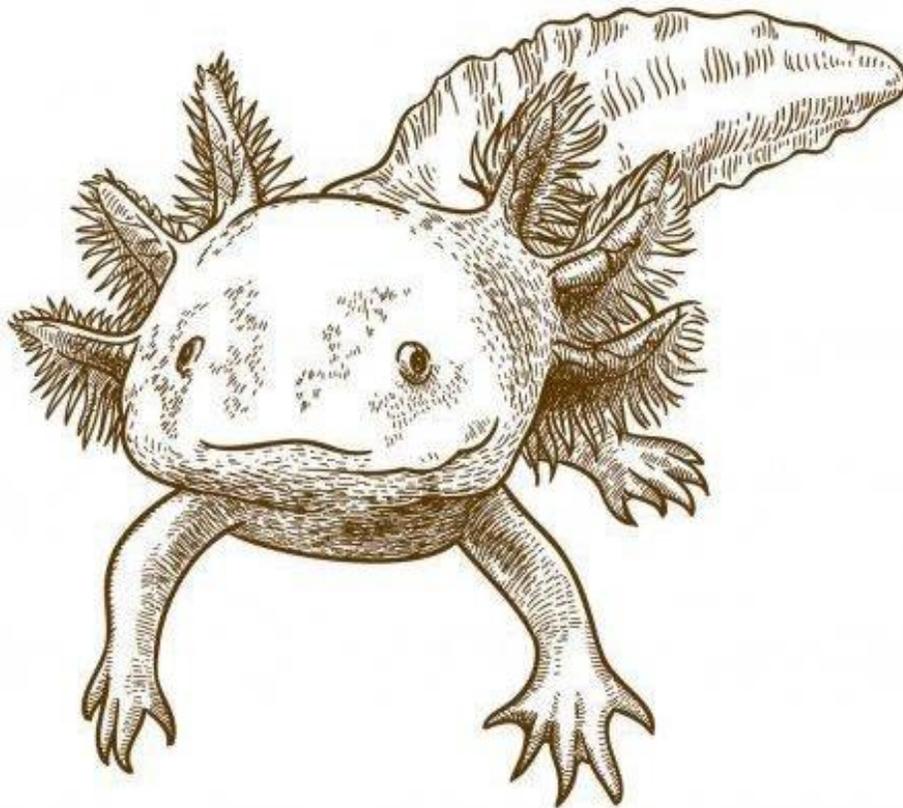
Reino	Animalia
Phylum	Chordata
Clase	Amphibia
Orden	Caudata
Familia	Ambystomatidae
Género	Ambystoma
Especies	Ambystoma spp

Tabla 1. Taxonomía del Ajolote. SEMARNAT (2018). Programa de acción para la conservación de las especies: *Ambystoma spp* [Tabla].

La apariencia de los ajolotes se asemeja a la de los renacuajos, pero de mayor tamaño con patas y cola, su piel es lisa y glandular. Poseen cuatro patas con cuatro dedos en las delanteras y cinco en las posteriores, sin uñas. Su cuerpo es robusto con surcos costales a los lados y cabeza ancha, su cola es aplanada lateralmente, carecen de párpados y cuentan con pulmones y branquias. Una característica distintiva son los tres pares de branquias externas y ramificadas que salen hacia atrás de su cabeza. Tienen una membrana rígida que se prolonga por toda la cola formando una aleta. A diferencia de otros anfibios, los ajolotes no presentan muda de piel. Tienen una gran boca con pequeños dientes en hileras a la entrada de la boca con una lengua retráctil parecida a la de las ranas.

El color de los ajolotes varía entre café, verde, negro, amarillo, manchado, rosa e incluso hay ajolotes albinos. Miden en promedio 25 centímetros de largo, de la cabeza hasta la cola y pesan de 60 a 110 gramos. Su vida suele ser de 5 a 8 años en vida silvestre mientras que en cautiverio han llegado a vivir hasta 30 años.

Los ajolotes tienen la capacidad de regenerar sus extremidades como la cola, mandíbula, sus patas, piel, órganos y partes de su cerebro.



*Figura 1. Ilustración de un ajolote.*

La dieta de los ajolotes es amplia, come pequeños peces como charales, renacuajos, insectos acuáticos, lombrices de tierra, crustáceos y moluscos de agua dulce. Cuando son larvas se alimentan de zooplancton que es formado por crustáceos microscópicos y rotíferos.

La forma en la que atrapan su alimento es por medio de succión repentina, con sus dientes retiene a sus presas y las traga entera. Pueden pasar varias semanas en ayuno o hasta recurrir al canibalismo.

Se reproducen una sola vez al año de diciembre a febrero. El macho agita su cola vigorosamente por aproximadamente medio minuto liberando una masa gelatinosa con una cubierta de esperma llamada *espermatóforo*, la hembra se desliza sobre el espermatóforo absorbiéndolo por la cloaca para fertilizar los huevos, después la hembra libera entre 600 y 1500 huevos fecundados, los cuales libera lentamente llegando a tardar hasta tres días. Usualmente los deja en vegetación con raíces esponjosas y densas. Eclosionan después de once a quince días y las larvas alcanzan la madurez sexual al año.

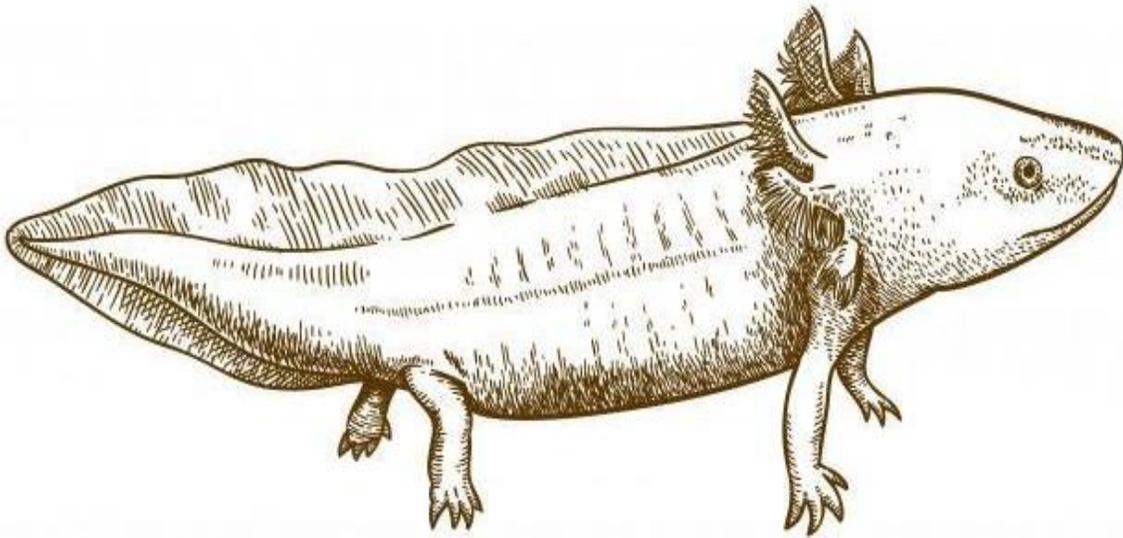


Figura 2. Ilustración de un ajolote.

El clima de su hábitat es de templado a frío húmedo, se encuentran en cuerpos de agua, arroyos, lagos, pozos, canales y manantiales poco profundos, con poca corriente y la temperatura ideal es fría - templada, no excediendo los 26° C.

La vegetación comúnmente son plantas con tejidos que almacenan agua, así como algunos tipos de pastos, también se encuentran en bosques o pastizales de montaña.

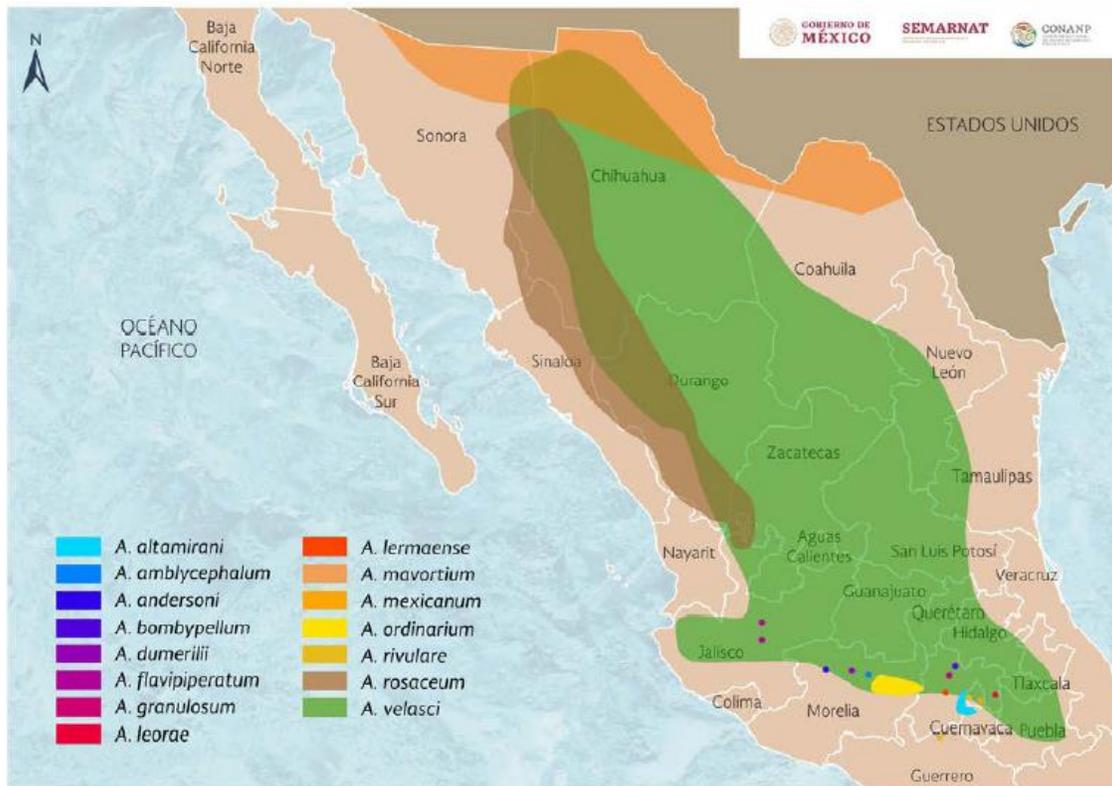


Figura 3. Mapa de distribución de las especies de *Abystoma*. SEMARNAT (2018). Programa de acción para la conservación de las especies: *Ambystoma* spp [Mapa].

## 1.2 EXTINCIÓN DE LOS AJOLOTES.

En México se distribuyen 17 especies de ajolotes, de las cuales 11 son endémicas del país y de una *Ambystoma mavortium* comparte distribución con Estados Unidos y Canadá. De las 17 especies mexicanas 14 están en alguna categoría de riesgo dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010, una norma oficial mexicana que tiene como objetivo identificar y categorizar especies de flora y fauna silvestre en riesgo de las diferentes especies de los ajolotes endémicos una de ella está en la categoría como Peligro de Extinción (P), tres como Amenazadas (A) y once como Sujetas a protección Especial (Pr).

En la lista roja de la IUCN (*International Union for Conservation of Nature*), una organización internacional que se dedica a la conservación de los recursos naturales, se enlistan 12 en alguna categoría de amenaza, nueve en Peligro Crítico de Extinción (CR) y dos En Peligro de Extinción (EN), fuera de las categorías de amenaza, tres se ubican en Preocupación Menor (LC) y tres más como Datos Insuficientes (DD).

ESPECIE	NOMBRE COMÚN	ESTATUS	
		SEMARNAT	UICN
<i>Ambystoma altamirani</i>	Ajolote de arroyo de montaña / Ajolote de Zempoala	Amenazada (A)	En peligro (En)
<i>Ambystoma amblycephalum</i>	Ajolote de cabeza chata	Protección especial (Pr)	En peligro crítico (Cr)
<i>Ambystoma andersoni</i>	Achoque de Zacapu	Protección especial (Pr)	En peligro crítico (Cr)
<i>Ambystoma bombypellum</i>	Ajolote de piel fina	Protección especial (Pr)	En peligro crítico (Cr)
<i>Ambystoma dumerlii</i>	Achoque de Pátzcuaro	Protección especial (Pr)	En peligro crítico (Cr)
<i>Ambystoma flavipiperatum</i>	Ajolote de Chapala	Protección especial (Pr)	En peligro crítico (Cr)
<i>Ambystoma granulatum</i>	Ajolote de Toluca	Protección especial (Pr)	En peligro crítico (Cr)
<i>Ambystoma leorae</i>	Ajolote de Río Frío	Amenazada (A)	En peligro crítico (Cr)
<i>Ambystoma lermaense</i>	Ajolote de Lerma	Protección especial (Pr)	En peligro (En)
<i>Ambystoma mavortium</i>	Ajolote tigre rayado		Menor preocupación (LC)
<i>Ambystoma mexicanum</i>	Ajolote de Xochimilco / Ajolote mexicano	Peligro de extinción (P)	Menor preocupación (LC)
<i>Ambystoma ordinarium</i>	Achoque de Michoacán	Peligro de extinción (P)	Menor preocupación (LC)
<i>Ambystoma rivulare</i>	Ajolote de arroyo de Michoacán / Ajolote de arroyo de Toluca	Amenazada (A)	Datos deficientes (DD)
<i>Ambystoma rosaceum</i>	Ajolote rosado / Ajolote tarahumara / Salamandra de la Sierra Madre Occidental	Protección especial (Pr)	Menor preocupación (LC)
<i>Ambystoma silvense</i>	Ajolote del bosque de pino		Datos deficientes (DD)
<i>Ambystoma taylori</i>	Ajolote Alchichica	Protección especial (Pr)	En peligro crítico (Cr)
<i>Ambystoma velasci</i>	Ajolote del altiplano	Protección especial (Pr)	Menor preocupación (LC)

Tabla 2. Grado de extinción de las especies *Ambystoma* existentes en México. Elaboración propia.

Son una serie de factores los que han provocado la extinción de las diferentes especies de ajolotes, aunque aún no existe ningún estudio que evalúe de manera puntual cuales son las dimensiones de las declinaciones por determinado factor o factores. Las diversas amenazas y las consecuencias en las poblaciones son las siguientes:

**PÉRDIDA DEL HÁBITAT.** Posiblemente *Ambystoma mexicanum* sea la especie que haya sufrido pérdida del hábitat dramáticamente, actualmente sólo se conoce una población que persiste en los canales de Xochimilco y se conoce que históricamente se distribuía en el gran complejo lacustre del Valle de México.

De las otras especies es complicado evaluar el impacto de la pérdida del hábitat en sus áreas de distribución debido a que no se han realizado muestreos sistemáticos para conocer su distribución y tampoco se cuenta con información ambiental a la resolución adecuada para modelar la distribución de muchas especies en especial las que se distribuyen únicamente en arroyos y pequeños cuerpos de agua como es el caso de *A. altamirani* y *A. leorae*. Pero se puede mencionar que la mayor parte de los bosques templados ubicados en la Faja Volcánica Transmexicana donde se distribuyen 15 de las 17 especies endémicas, se han perdido acelerada y constantemente por el avance de la zona urbana.

Los cuerpos de agua donde habitan los ajolotes son ecosistemas muy vulnerables, son propensos a disminuir la calidad de su agua por afectaciones locales, por ejemplos los arroyos y ríos pequeños de las montañas son bloqueados o desviados por los humanos para el aprovechamiento del agua potable para consumo humano, actividades agropecuarias e industriales.

Se puede resumir la pérdida de hábitat por la deforestación de los bosques y el entubamiento o secamiento de los cuerpos de agua donde los ajolotes habitan.

**FRAGMENTACIÓN DEL HÁBITAT.** Se origina por la transformación del paisaje que se realiza con el objetivo de abrir tierras de cultivo, pastizales para el ganado, construir presas, carreteras o por el desarrollo urbano. “La principal consecuencia de la fragmentación del hábitat es el aislamiento de las poblaciones de flora y fauna, en especial esas especies que tienen poca movilidad.” (CONABIO, s.f.). Además, al tener un menor número de individuos y estar aisladas trae consigo endogamia y cuellos de botella, generando una pérdida genética que altera y disminuye la adaptación y la posibilidad de que la especie enfrente enfermedades emergentes.

En el caso de los ajolotes las interrupciones en el hábitat van desde unos metros hasta decenas de kilómetros.

**CONTAMINACIÓN DE LOS CUERPOS DE AGUA.** Es una de las amenazas más severas a las que están expuestos los ajolotes, el origen de estos contaminantes son de origen diverso:

Contaminación por agroquímicos puede provocada por abonos artificiales ricos en nitrógeno y fósforo, los cuales provocan eutrofización del agua. “La eutrofización es el proceso por el cual un cuerpo de agua es enriquecido con nutrientes limitantes para el fitoplancton, principalmente fósforo y nitrógeno, y en algunas ocasiones silicio, potasio, hierro o

manganeso. Estos nutrientes promueven el crecimiento excesivo de algas y su acumulación, las cuales se descomponen por la intervención de organismos aerobios presentes en el sistema, agotando el oxígeno disponible, provocando la turbidez en los cuerpos de agua, condiciones anóxicas y, como resultado, la muerte y descomposición de la flora y fauna acuática.” (Harper, 1992).

Pesticidas que afectan a los anfibios causando malformaciones y capacidad baja para reconocer sus predadores.

Contaminación por desechos de la acuicultura; la industria acuícola es una actividad que afecta potencialmente a los ajolotes, esta actividad genera residuos ricos en materia orgánica que contribuye a la eutrofización de los cuerpos del agua.

Contaminación por actividades mineras; la minería es una de las actividades que causan mayores impactos en los hábitats tanto terrestres como acuáticos. Durante la extracción, una gran cantidad de metales pesados y residuos son vertidos a aguas superficiales y a vasos que eventualmente se filtran a aguas subterráneas.

Contaminación por urbanización; los asentamientos humanos generan residuos que son importantes contaminantes en los ecosistemas acuáticos, dichos contaminantes son una gran amenaza, especialmente para los ajolotes que se distribuyen en los cuerpos de agua próximos a grandes urbes como las poblaciones de *A. altamiranoi* y *A. mexicanum* en la Ciudad de México.

**INTRODUCCIÓN DE ESPECIES EXÓTICAS.** Se puede considerar que es uno de los principales problemas para la conservación de los ajolotes; desde hace unos años el gobierno mexicano ha promovido la implementación de criaderos de peces exóticos como la carpa, la tilapia y la trucha para fines comerciales en los cuerpos de agua del país, lo que ha puesto en grave riesgo de extinción a las poblaciones de ajolotes que se distribuyen en toda la Faja Volcánica Transmexicana.

La introducción de peces exóticos tiene efectos directos e indirectos: los efectos directos se relacionan con la depredación de huevos, larvas y ajolotes adultos por parte de los peces, y los indirectos son la competencia por el alimento y la contaminación que generan sus desechos orgánicos. También la introducción de estas especies tiene como consecuencia la transmisión de enfermedades patógenas y parásitos.

**ENFERMEDADES.** La propagación de patógenos importantes promovidos por especies exóticas favorecen a que ocurran importantes declinaciones poblacionales, desde finales de 1980 y hasta el presente se han documentado la presencia y prevalencia de *quitridiomicosis*<sup>1</sup> en anfibios del todo el mundo incluyendo los ajolotes de México como se evaluó en el trabajo de (Vredenburg, y otros, 2008)

---

<sup>1</sup> La **quitridiomicosis** es una enfermedad causada por un hongo patógeno *Batrachochytrium dendrobatidis* (Bd), el cual afecta la piel de los anfibios y puede provocar la muerte. (Mendoza Almeralla Cinthya, 2015)

También hay enfermedades no infecciosas como irritación de la piel, ingestión de cuerpos extraños, flotación anormal. La mala calidad del agua provoca un aumento en la secreción de moco, pérdida branquias, mudas retenidas o excesivas, ojos saltones, hemorragias internas, crecimiento lento o reducido y hasta la muerte.

**CAMBIO CLIMÁTICO.** Es un fenómeno que potencialmente causa la extinción de diferentes especies incluidos los ajolotes, el principal efecto que tiene el cambio climático en la extinción de los ajolotes es el aumento de temperatura que afecta a los cuerpos de agua y provoca la metamorfosis de los ajolotes.

## 2. MARCO TEÓRICO.

### 2.1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

Un **Sistema de Información Geográfica (SIG)** es un conjunto de herramientas compuestas por datos, usuarios, software y hardware diseñadas para almacenar, manipular, administrar, consultar, analizar y visualizar datos espaciales, con el objetivo de realizar un análisis que implica la componente de posición geográfica.

Los SIG's son sistemas complejos que integran una serie de distintos elementos interrelacionados y son los siguientes:

**DATOS** son la materia prima necesaria para trabajar un SIG y los datos con componente geográfica son vital para la existencia de un SIG.

**MÉTODOS** son planteados por el usuario y aplicados a los datos para llegar al resultado deseado.

**SOFTWARE** son programas especialmente diseñados para trabajar con los datos espaciales y aplicar los métodos antes mencionados.

**HARDWARE** es el equipo necesario para ejecutar el software.

**USUARIOS** son las personas que utilizar los SIG para solucionar un problema o completar una tarea.

La tecnología de los SIG's puede ser utilizada para investigaciones científicas, la gestión de los recursos, gestión de activos, la arqueología, la evaluación del impacto ambiental, la planificación urbana, la cartografía, la sociología, la geografía histórica, el marketing, la logística por nombrar unos pocos.

Los SIG's son fundamentales porque integran información espacial y no espacial y ofrecen un marco consistente de análisis para los datos y diferentes formas de manipularlos y desplegarlos.

Un dato geográfico describe un objeto o fenómeno y es un dato que ocupa un espacio cartográfico y comúnmente tiene una localización específica referenciada en un sistema geográfico.

La información geográfica se divide en dos componentes principales, la componente espacial que hace referencia a su posición dentro de un sistema de referencia establecido, esta componente es por la cual la información puede calificarse como geográfica o georreferenciada. La componente espacial responde a la pregunta ¿dónde?.

En la localización establecida por la componente espacial tiene lugar algún fenómeno dado y la naturaleza de dicho fenómeno y sus características quedan establecidas por la característica temática, esta característica responde a la pregunta ¿qué?.

Los datos geográficos pueden ser temáticos y no considerar el aspecto espacial; o solo considerar el aspecto espacial y analizar sus características geométricas.

En los SIG's existen dos grandes formas de representar capas de información, que son los formatos **ráster** y **vectorial**. El formato ráster se basa en una matriz de celdas en filas y columnas y cada celda contiene valor único de una variable que puede ser un identificador de un objeto o el valor de una variable como altura o temperatura. El formato ráster no recoge de manera determinada las coordenadas de cada una de las celdas, sino los valores de esta. Algunos ejemplos del formato ráster más comunes es una imagen satelital o el modelo de elevación digital.

El formato vectorial representa la variable y sus características mediante entidades geométricas, y son de tres tipos puntos, líneas o polígonos. En el formato vectorial si puede tener coordenadas puntuales para cada objeto.

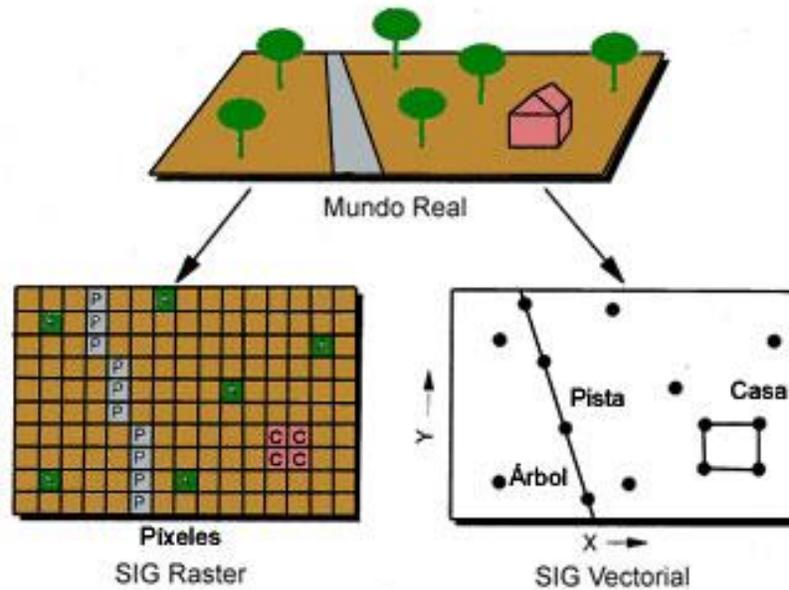


Figura 4. Formato ráster y formato vectorial. Recuperado de [http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad2/td\\_sig.htm](http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad2/td_sig.htm)

Los SIG cuentan con una serie de herramientas denominadas **geo-procesamientos** con las que se pueden manipular o realizar operaciones entre los datos espaciales o geográficos para analizarlos, administrarlos y obtener la información necesaria para llegar al objetivo del SIG.

## 2.2 ANÁLISIS MULTI-CRITERIO.

La toma de decisiones son procesos complejos en los que intervienen múltiples criterios, la **Evaluación Multi-criterio** o **Análisis Multi-criterio (EMC)** es una herramienta capaz de realizar una completa evaluación cuantitativa de diferentes alternativas e integrar

múltiples alternativas y limitaciones para obtener una solución que satisfaga mejor algún problema.

El Análisis Multi-criterio ofrece la oportunidad de obtener un análisis equilibrado de todas las facetas de los problemas de planeación, particularmente debido a que considera por completo varios efectos o factores intangibles, como los sociales o las repercusiones ambientales.

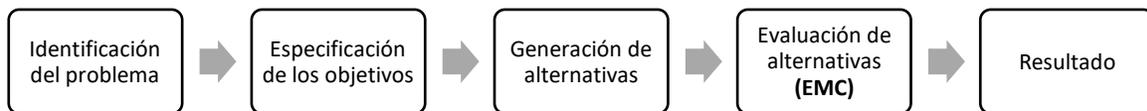


Figura 5. Proceso de un Análisis Multi-criterio. Elaboración propia.

### 2.3 PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO.

El Análisis Multi-criterio tiene diferentes metodologías propuestas para darle solución a los problemas de criterios múltiples, una metodología es el **Proceso de Análisis Jerárquico AHP** (Analytic Hierarchy Process) desarrollado por Thomas Saaty a finales de los 60's el cual mediante la realización de un modelo jerárquico permite de una manera eficiente y gráfica estructurar la información, analizarla por partes y observar los efectos de los cambios de prioridades.

El AHP “se trata de desmenuzar un problema y luego unir todas las soluciones de los sub-problemas en una conclusión.” (Saaty L. T., The analytic hierarchy process., 1980)

El Proceso de Análisis Jerárquico, es un método matemático creado para evaluar alternativas cuando se tiene en consideración varios criterios y necesita que quien tome las decisiones realice evaluaciones subjetivas según la importancia de cada criterio y precise la prioridad con respecto a cada una de las alternativas para cada criterio.

El AHP utiliza comparaciones pareadas, construye matrices a partir de estas comparaciones, y usando elementos del álgebra matricial establece prioridades entre las alternativas de cierta importancia, con respecto a una alternativa de una importancia superior o sea una jerarquización con prioridades que muestran la prioridad para cada una de las alternativas de decisión.

Cuando las prioridades de las alternativas de cada criterio se tienen definidas, todas se integran para obtener las prioridades globales frente al objetivo principal. Los resultados frente a las alternativas se convierten entonces en un importante elemento de soporte para quien debe tomar la decisión.

El método de AHP tiene tres funciones básicas las cuales son:

Estructuración de la Complejidad. Saaty usa una descomposición jerárquica, o sea, un problema lo descompone en sub-problemas que se relacionan entre sí para darle solución al problema inicial.

Medición en escalas. El AHP tiene definido una escala general que se puede aplicar a cualquier situación lo cual permite la universalidad del método y provee una gran amplitud para las comparaciones.

Síntesis. El enfoque del AHP es totalmente sistémico, porque, aunque analiza las decisiones a partir de la descomposición jerárquica, en ningún momento pierde de vista el objetivo general y las interdependencias existentes entre los conjuntos de factores, criterios y alternativas, por lo tanto, este método está enfocado en el sistema en general, y la solución que presenta es para la totalidad, no para la particularidad.

El Proceso de Análisis Jerárquico también cuenta con una serie de principios y axiomas.

### 2.3.1 PRINCIPIOS.

El principio de la descomposición permite estructurar un problema complejo en sub-problemas jerárquicos con dependencias de acuerdo con el nivel de descomposición en el que se encuentren.

Los juicios comparativos permiten realizar combinaciones en parejas o pareadas de todos los elementos de un sub-grupo con respecto al criterio principal de ese sub-grupo, son combinaciones por ello se habla de comparaciones biunívocas.

Intensidad	Definición	Explicación
1	De igual importancia	Dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo
3	Moderada importancia	La escala y el juicio favorecen levemente una actividad sobre la otra
5	Importancia fuerte	La escala y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre la otra
7	Muy fuerte o demostrada	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la práctica
9	Extrema importancia	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra, es absoluta y totalmente clara
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes.
Recíprocos	$a_{ij} = 1 / a_{ji}$	Hipótesis del método

Tabla 3. Escalas de comparación de AHP. Saaty, T. (1982), *Decision Making for leaders*. [Tabla].

La composición jerárquica o síntesis de prioridades, ya cuando se obtienen las soluciones locales se integran para obtener la solución general que se está buscando.

### 2.3.2 AXIOMAS.

Axioma 1: Si referente a un criterio, la alternativa A es n veces mejor que B, entonces B es 1/n veces mejor que A. Este principio es utilizado en el análisis matricial que se realiza a los criterios y las alternativas. Garantiza que el análisis se haga de manera bidireccional.

Axioma 2: Los elementos que son comparados no deben diferir en mucho en cuanto a la característica de comparación establecida.

Axioma 3: Existe dependencia jerárquica en las alternativas de dos niveles consecutivos.

Axioma 4: Las probabilidades deben estar representadas en la estructura de criterios y alternativas.

### 2.3.3 SÍNTESIS.

Cuando se tiene la matriz de comparaciones pareadas entre las diferentes alternativas, se calcula lo que se conoce como prioridad de cada alternativa, a este paso se le conoce como **sintetización**, es un proceso matemático preciso donde se calculan valores y vectores característicos también conocidos como **eigenectores**.

El procedimiento para la sintetización es el siguiente:

Se suman los valores en cada columna de la matriz de comparaciones pareadas.

CRITERIO	a	b	c
a	1.00	4.00	7.00
b	0.25	1.00	5.00
c	0.14	0.20	1.00
$\Sigma$	1.39	5.20	13.00

Figura 6. Ejemplo de matriz pareada. Elaboración propia.

Se divide cada elemento de la matriz entre la sumatoria de su columna y la matriz resultante se conoce como matriz pareada normalizada. Y a la sumatoria de cada renglón es el vector característico o eigenvector.

CRITERIO	a	b	c	Eigenvector
a	1 / 1.39	4 / 5.20	7 / 13	2.03
b	0.25 / 1.39	1 / 5.20	3 / 13	0.76
c	0.14 / 1.39	0.20 / 5.20	1 / 13	0.22

Figura 7. Ejemplo de matriz pareada normalizada y vectores característicos. Elaboración propia.

Se normaliza cada eigenvector, se obtiene calculando el promedio del eigenvector correspondiente a cada criterio, este promedio es el peso que tiene cada alternativa.

	Peso		Peso
a	2.03 / 3	a	0.6757
b	0.76 / 3	b	0.2523
c	0.22 / 3	c	0.0720

Figura 8. Ejemplo de pesos correspondientes a cada criterio. Elaboración propia.

Debe existir una consistencia de los juicios para que haya una calidad en la decisión final, es muy difícil conseguir una consistencia perfecta porque finalmente los juicios son hechos por humanos, por lo tanto, se puede esperar cierta inconsistencia en casi cualquier conjunto de comparaciones pareadas.

El AHP puede calcular el nivel de consistencia entre las comparaciones pareadas, conocido como **porción de consistencia PC**. Un valor de  $PC < 0.10$  indica un nivel razonable de consistencia en las comparaciones pareadas mientras que un valor de  $PC > 0.10$  indica inconsistencia en los juicios.

Si el valor de la porción de consistencia está en un intervalo aceptable se puede continuar con el proceso y en el caso de no ser así, se debe reconsiderar y modificar los juicios sobre las comparaciones. A continuación, se muestra como obtener la porción de consistencia entre las comparaciones pareadas

Primero se obtiene el vector de la suma ponderada, multiplicando el promedio o peso de cada alternativa por cada valor en el renglón de la matriz de comparaciones pareadas.

CRITERIO	VECTOR DE LA SUMA PONDERADA
a	$((0.6757*1) + (0.2523*4) + (0.0720*7)) = 2.19$
b	$((0.6757*0.25) + (0.2523*1) + (0.0720*5)) = 0.78$
c	$((0.6757*0.14) + (0.2523*0.20) + (0.0720*1)) = 0.22$

Figura 9. Ejemplo de vector de la suma ponderada. Elaboración propia.

Se calcula el vector de consistencia dividiendo el vector de la suma ponderada entre el promedio.

CRITERIO	VECTOR DE CONSISTENCIA
a	$2.19 / 0.675 = 3.24$
b	$0.78 / 0.252 = 3.10$
c	$0.22 / 0.073 = 3.01$

Figura 10. Ejemplo de vector de consistencia. Elaboración propia.

Se calcula el valor lambda  $\lambda$  que es el promedio del vector de consistencia.

$$\lambda = \frac{2.0432 + 0.9059 + 0.1693}{3} = 3.12$$

El **índice de consistencia IC** se calcula con la siguiente fórmula

$$IC = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad \text{donde } n \text{ es el número de atributos}$$

$$IC = \frac{3.12 - 3}{3 - 1} = \frac{0.12}{2} = 0.06$$

Se calcula la proporción de consistencia PC que indica el nivel de consistencia de la matriz de comparaciones pareadas con la siguiente fórmula.

$$PC = \frac{IC}{IA} \quad \text{Donde: } IC \text{ es el índice de consistencia}$$

*IA es el índice de azar*

El **índice de azar IA** es el índice de consistencia de una matriz de comparaciones pareadas generada aleatoriamente, el índice de azar depende del número de elementos que son comparados.

Para la asignación del índice de azar se recurre a la siguiente tabla.

INDICES DE INCONSISTENCIA ALEATORIA										
n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de azar IA	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Tabla 4. Índices de inconsistencia aleatoria. Sánchez G. (2003). *Técnicas participativas para la planeación*. [Tabla].

Algunos autores sugieren el siguiente cálculo del índice de azar.

$$IA = \frac{1.98 * (n - 2)}{n} \quad \text{Donde } n \text{ es el número de elementos}$$

$$PC = \frac{0.06}{0.58} = 0.10$$

Para este ejemplo obtenemos que las comparaciones pareadas entran dentro del intervalo aceptable, por lo que se puede continuar con el proceso.

### 3. METODOLOGÍA.

La integración de los Sistemas de Información Geográfica y el Análisis Multi-criterio permite realizar análisis espaciales a mayor profundidad y más precisos debido al uso de información geoespacial la cual contiene atributos de importancia para el estudio que se pueden manipular para utilizarlos en el análisis de las variables con el extra de que esta información se encuentra georreferenciada y se puede aplicar esta dupla en la toma de decisión de un problema de localización.

#### 3.1 INFORMACIÓN RECOPIADA.

Se analizó las características esenciales en el hábitat de los ajolotes y sus principales amenazas, se buscó información geoespacial con los atributos necesarios para que pudieran formar variables para el análisis multi-criterio, o ser de utilidad en el proceso, la información encontrada es la siguiente:

ARCHIVO	DESCRIPCIÓN	TIPO	AUTOR	FUENTE
Anfibios	Recopilado de puntos de muestreo donde se han encontrado poblaciones de diferentes anfibios.	CSV	CONABIO	Geoportal CONABIO <a href="http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/">http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/</a>
Temperatura máxima promedio mensual 1902 - 2015	Conjunto de 12 rasters con la temperatura mensual promedio desde 1902 hasta 2015.	Ráster	Agustín Fernández Eguiarte	Repositorio Institucional del Centro de Ciencias de la Atmósfera <a href="http://ri.atmosfera.unam.mx:8586/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/home">http://ri.atmosfera.unam.mx:8586/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/home</a>
Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250 000 serie VI	Ubicación, distribución y extensión de diferentes tipos de vegetación y usos agrícolas. Serie VI generada en 2016.	Shape	INEGI	INEGI <a href="https://www.inegi.org.mx/default.html">https://www.inegi.org.mx/default.html</a>
Peces	Conjunto de muestreos donde se han encontrado poblaciones de peces.	CSV	CONABIO	Geoportal CONABIO <a href="http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/">http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/</a>
Áreas Naturales Protegidas Federales de México 2017	Cobertura de las áreas naturales protegidas existentes en México en 2017.	Shape	SEMARN AT – CONABIO	Geoportal CONABIO <a href="http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/">http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/</a>
Cartas Topográficas escala 1:50 000	Información que representa la infraestructura, orografía, hidrografía y las poblaciones del país.	Shape	INEGI	INEGI <a href="https://www.inegi.org.mx/default.html">https://www.inegi.org.mx/default.html</a>
Índice de cartas 1:50 000	Cobertura de las cartas topográficas de INEGI escala 1 : 50 000, con la clave de las cartas.	Shape	CONABIO	Geoportal CONABIO <a href="http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/">http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/</a>

Tabla 5. Descripción y fuente sobre la información recopilada. Elaboración propia.

### 3.2 PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO.

La metodología del proceso de análisis jerárquico propone descomponer un problema en sub-problemas para después unir todas las soluciones de esos problemas pequeños en una sola conclusión.

En este trabajo el problema principal u objetivo a cumplir es encontrar un lugar idóneo en México en donde se pueda ubicar una reserva natural de ajolotes, este lugar debe contar con ciertas características o criterios necesarios para el desarrollo apropiado de los ajolotes.

Estos criterios son los sub problemas en los cuales es descompuesto el problema principal y estos criterios tienen una serie de alternativas los cuales dan solución a los sub problemas.

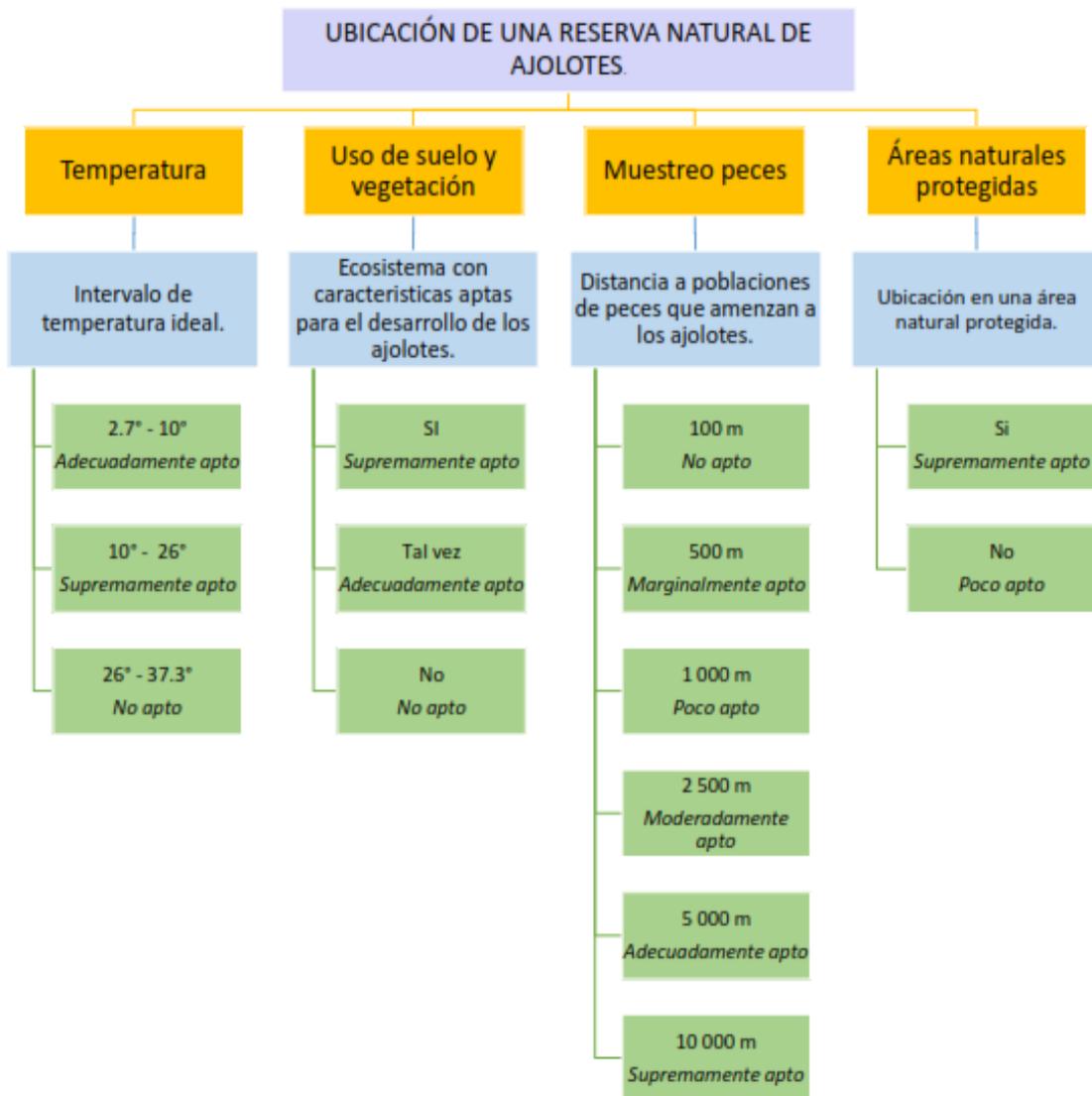


Figura 11. Estructura jerárquica para la ubicación de una reserva natural de ajolotes. Elaboración propia.

Estas alternativas fueron definidas a partir de las condiciones más importantes que se debe cumplir en su hábitat y las amenazas principales que frenan el desarrollo de los ajolotes.

### 3.3 DEFINICIÓN Y GENERACIÓN DE CRITERIOS Y ALTERNATIVAS.

#### 3.3.1 TEMPERATURA.

La temperatura de los cuerpos o corrientes de agua donde habitan los ajolotes es uno de los criterios más importantes, debido a que si esta se eleva provoca en los ajolotes que entren en proceso de metamorfosis y se convierte a salamandra terrestre, en esta transformación fisiológica el animal modifica su corazón y su aparato respiratorio para que les sea posible respirar fuera del agua y pierden la capacidad de regenerarse.

La información geográfica utilizada para generar esta variable es una serie de rásters realizados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, los cuales utilizando un programa de procesamiento geoespacial se promediaron para obtener la temperatura anual promedio de 1902 al 2015 y se cortó para que solamente abarque el área de estudio que es México. La temperatura mínima fue de 3.7°C y la máxima de 37.3°C.

Se clasificaron en tres intervalos de temperatura dependiendo de la factibilidad para que los ajolotes conserven, ver figura 24 (anexos):

- 3.7°C – 10° C es una temperatura fría, pero en la cual aún se pueden desarrollar los ajolotes.
- 10°C – 26°C es el intervalo de temperatura ideal para los ajolotes.
- Mayor a 26°C son niveles de temperatura en los cuales los ajolotes entran en proceso de metamorfosis.

3.7°C – 10°C	Adecuadamente apto
10°C – 26°C	Supremamente apto
26°C – 37.3°C	No apto

Tabla 6. Factibilidad de intervalos de temperatura. Elaboración propia.

Estas alternativas de temperatura se ponderaron con el método de AHP y como resultado se obtuvo el mapa de ponderación de alternativas de temperatura, ver figura 13.

Matriz de comparaciones pareadas			
ALTERNATIVA	2.7° - 10°	10° - 26°	26° - 37.3°
2.7° - 10°	1.00	0.33	7.00
10° - 26°	3.00	1.00	9.00
26° - 37.3°	0.14	0.11	1.00
Σ	4.14	1.44	17.00

ALTERNATIVA	Peso	%
2.7° - 10°	0.29	29
10° - 26°	0.65	65
26° - 37.3°	0.06	6

Figura 12. Ponderación de alternativas de temperatura. Elaboración propia.

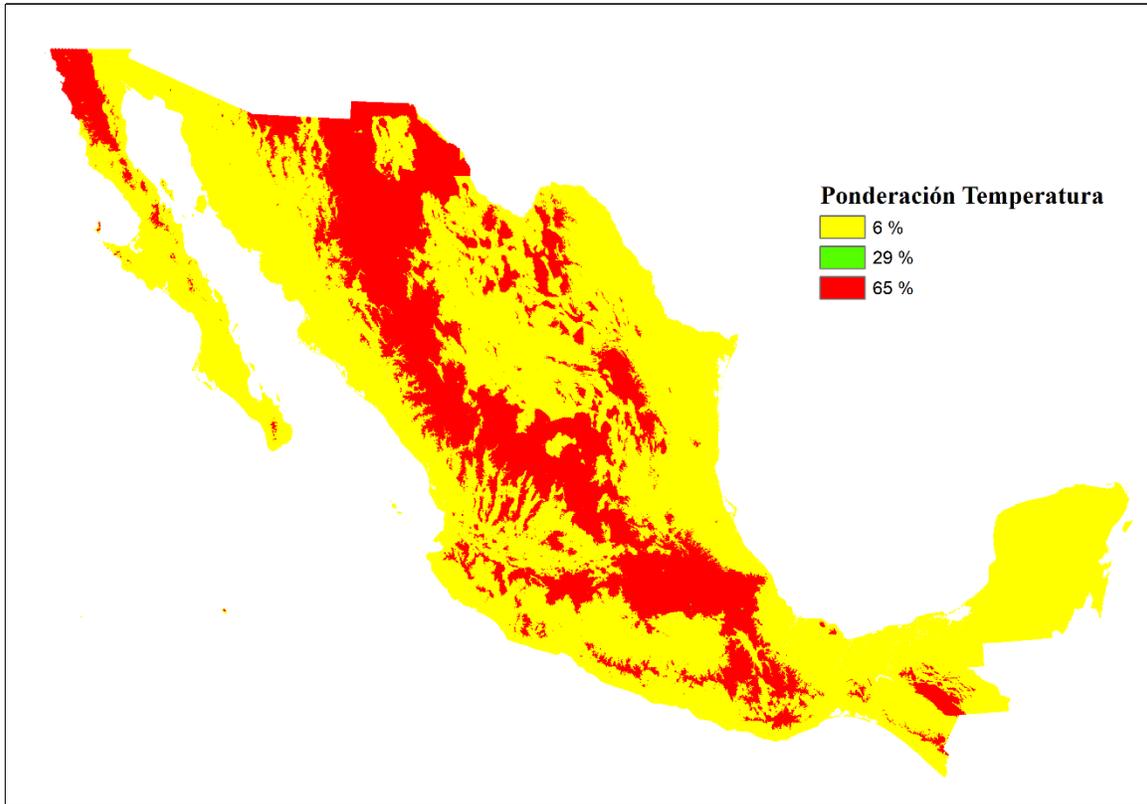


Figura 13. Mapa de ponderación de alternativas de temperatura. Elaboración propia.

### 3.3.2 USO DE SUELO Y VEGETACIÓN.

Conociendo cual es el ecosistema en el que usualmente se desarrollan las poblaciones de ajolotes o las principales características existentes en estos se puede definir cuáles tipos de suelo son adecuados para instalar una reserva natural de ajolotes.

Se descargó la Serie VI de Uso de Suelo y Vegetación generada por INEGI, investigando las principales características de los usos de suelo se generalizaron para hacer más fácil su posterior clasificación.

Y se clasificaron en tres alternativas dependiendo si son óptimos para ubicar una reserva de ajolotes. Los bosques, los usos denominados como “agua” que son los cuerpos de agua y “galería” que es vegetación vinculado al borde de un río son clasificados como si óptimos para la localización de los ajolotes, debido a que cuentan con las características necesarias.

Mientras que la “pradera” es tal vez óptimo debido a que no cuenta con todas las características idóneas, pero si cuenta con algunas. Y todos los demás usos de suelo y vegetación se consideran no óptimos.

Clasificación General	Óptimos
Acuícola	No
Agricultura	No
Agua	Si
Arena	No
Bosque	Si
Chaparral	No
Galería	Si
Halófila	No
Manglar	No
Matorral	No
Mezquital	No
Palmar	No
Pastizal	No
Petén	No
Popal y tular	No
Pradera	Tal vez
Sabana	No
Selva	No
Sin vegetación	No
Urbano	No

Tabla 7. Clasificación general de los usos de suelo y si son óptimos para el desarrollo de los ajolotes. Elaboración propia.

Esta clasificación determina si cuenta con las características necesarias para el objetivo.

Tal vez	Adecuadamente apto
Si	Supremamente apto
No	No apto

Tabla 8. Factibilidad de alternativas de Uso de suelo y Vegetación. Elaboración propia.

Mediante el proceso de análisis jerárquico se ponderaron las alternativas como se puede observar en el mapa de ponderación de alternativas de usos de suelo y vegetación, ver figuran 15.

Matriz de comparaciones pareadas			
ALTERNATIVA	SI	TAL VEZ	NO
SI	1.00	3.00	9.00
TAL VEZ	0.33	1.00	5.00
NO	0.11	0.20	1.00
$\Sigma$	1.44	4.20	15.00

ALTERNATIVA	Peso	%
SI	0.67	67
TAL VEZ	0.27	27
NO	0.06	6

Figura 14. Ponderación de alternativas de Uso de Suelo y Vegetación. Elaboración propia.

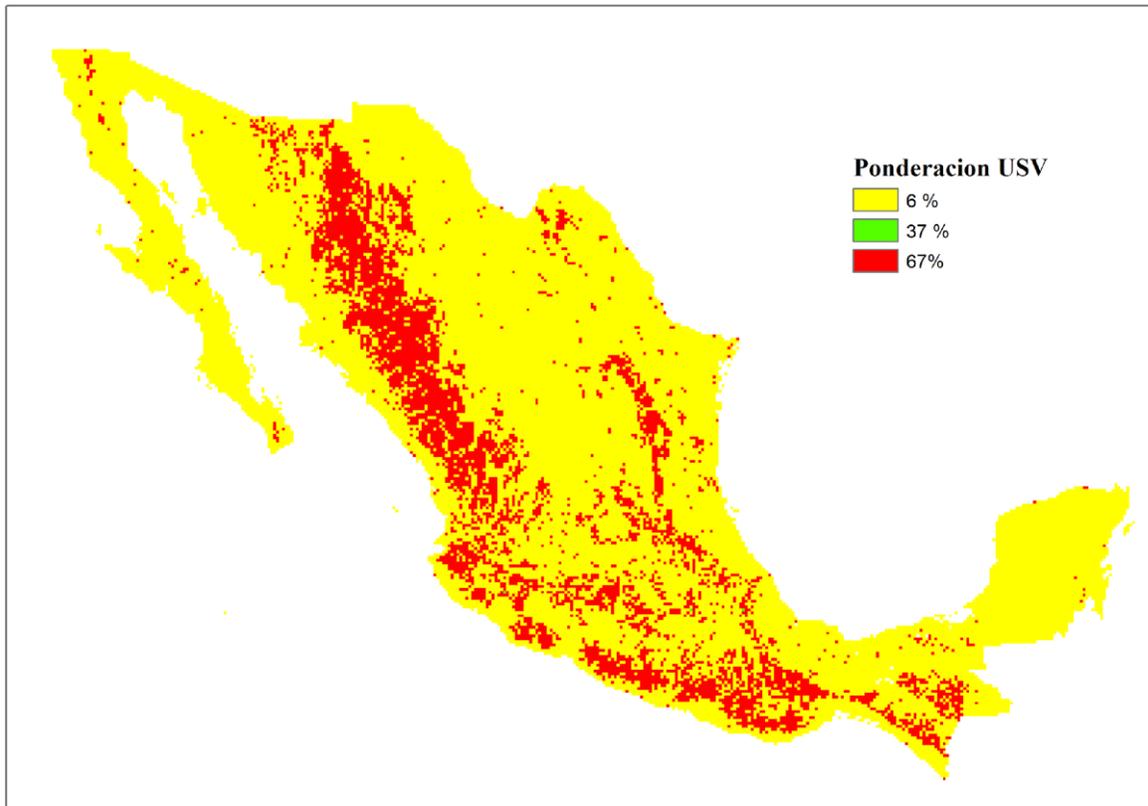


Figura 15. Mapa de ponderación de alternativas de USV. Elaboración propia.

### 3.3.3 MUESTREO PECES.

Existen especies de peces que amenazan a las poblaciones de ajolotes, compitiendo con ellos por la comida o devorando a los ajolotes cuando estos son pequeños, en México hay tres especies de peces principalmente que amenazan a los ajolotes, estos son la trucha arcoíris, la carpa y la tilapia. Estas especies exóticas son incorporadas por los humanos a los cuerpos de agua para su reproducción y venta.

CONABIO generó un muestreo de diferentes especies de peces, de este muestreo se filtró solamente a las tres especies de interés y se generaron una serie de buffers a diferentes distancias a 100 m, 500 m, 1000 m, 2500 m, 5000 m y 10000 m. En estas alternativas que se plantean a mayor distancia del muestreo de peces es una mejor ubicación para la reserva para que los ajolotes tengan un riesgo menor de encontrarse con estas especies de peces.

100 m	No apto
500 m	Marginalmente apto
1000 m	Poco apto
2500m	Moderadamente apto
5000 m	Adecuadamente apto
10000 m	Supremamente apto

Tabla 9. Factibilidad de alternativas de distancia muestreo de peces. Elaboración propia.

Cada buffer de distancia se ponderó respecto a la importancia que tiene una alternativa sobre las demás como se puede observar en el mapa de ponderación de alternativas de distancia a muestreo de peces, ver figura 17.

<i>Matriz de comparaciones pareadas</i>						
ALTERNATIVAS	10000	5000	2500	1000	500	100
10000 m	1.00	2.00	3.00	5.00	7.00	9.00
5000 m	0.50	1.00	2.00	5.00	7.00	9.00
2500 m	0.33	0.50	1.00	3.00	5.00	7.00
1000 m	0.20	0.20	0.33	1.00	3.00	7.00
500 m	0.14	0.14	0.20	0.33	1.00	5.00
100 m	0.11	0.11	0.14	0.14	0.20	1.00
$\Sigma$	2.29	3.95	6.68	14.48	23.20	38.00

ALTERNATIVAS	Peso	%
10000 m	0.44	44
5000 m	0.34	34
2500 m	0.22	22
1000 m	0.14	14
500 m	0.09	9
100 m	0.03	3

Figura 16. Ponderación de alternativas de distancia a muestreo de peces. Elaboración propia.

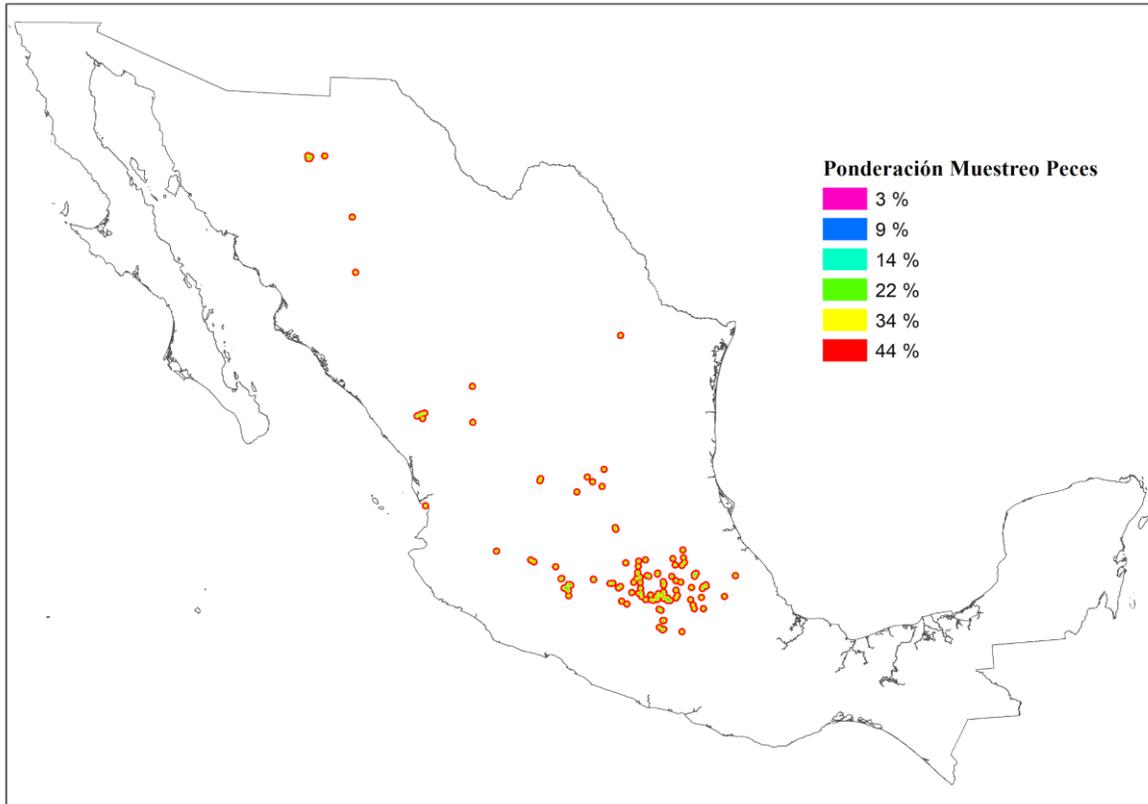


Figura 17. Mapa de ponderación de alternativas de distancia a muestreo de peces. Elaboración propia.

### 3.3.4 ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS.

Un área Natural Protegida (ANP), es una porción de territorio ya sea acuático o terrestre cuyo fin es conservar la biodiversidad representativa del ecosistema o llevar a cabo un aprovechamiento de sus recursos naturales de manera sustentable preservando la flora y fauna del ecosistema. La alternativa más óptima es que la reserva de ajolotes se ubique en una ANP ya establecida para facilitar la conservación de los ajolotes y su ecosistema de no ser así se haría más complicada el establecimiento de una reserva natural.

SEMARNAT junto con la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, generaron una capa de información geoespacial con la ubicación de las ANP existentes en el país, la edición más reciente de esta información fue la que se utilizó en este trabajo, para este criterio no existen alternativas, por lo tanto, no hubo ninguna ponderación y solo se consideró la ubicación de las ANP, ver figura 18.

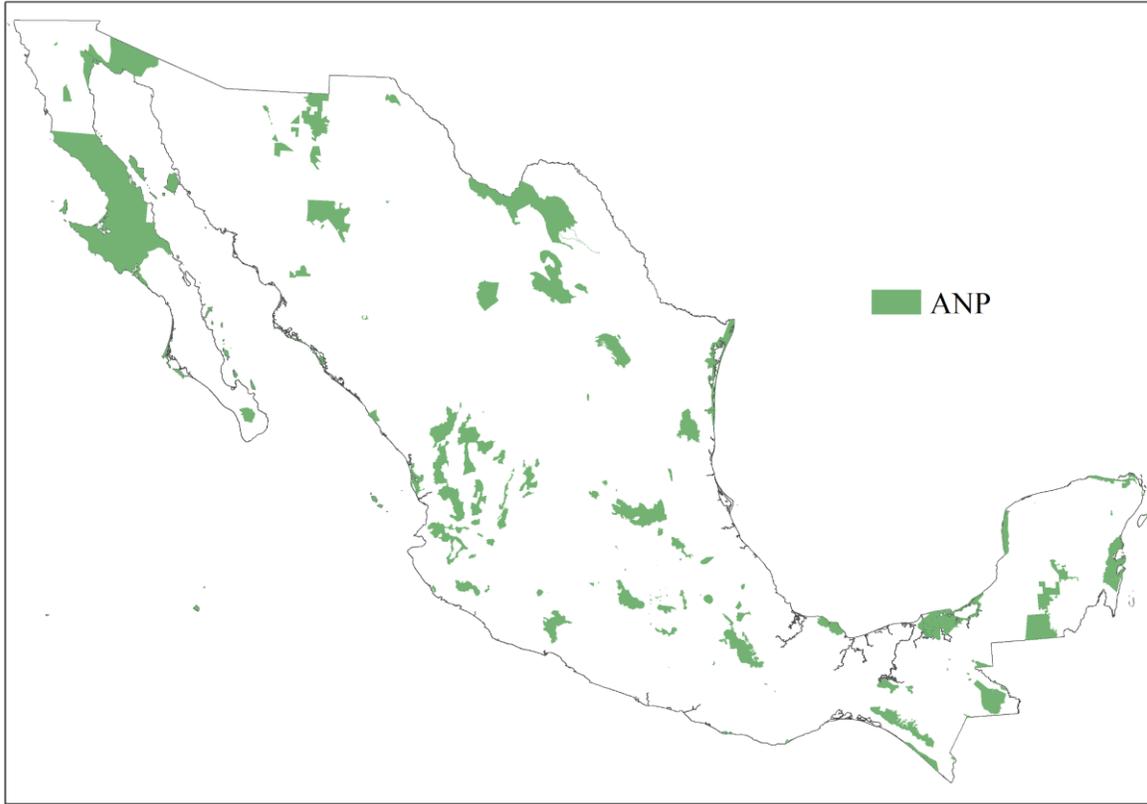


Figura 18. Mapa con la ubicación de las ANP terrestres en México. Elaboración propia.

### 3.4 DEFINICIÓN Y GENERACIÓN DE RESTRICCIONES.

#### 3.4.1 CUERPOS / CORRIENTES DE AGUA.

El ajolote es una especie completamente acuática, por lo tanto, es indispensable que la reserva de ajolotes se encuentre en un cuerpo o corriente de agua.

De las cartas topográficas de INEGI, se extrajo los cuerpos de agua, las corrientes de agua, los arroyos, canales y manantiales. Se agruparon por tipo de entidad.

<b>POLÍGONO</b>	<b>LÍNEA</b>	<b>PUNTO</b>
Cuerpos de agua	Corrientes de agua	Manantiales
	Arroyos	
	Canales	

Tabla 10. Tipo de entidades de cuerpos y corrientes de agua. Elaboración propia.

A los manantiales que son entidades tipo punto se les aplicó un buffer de 13 metros simulando la superficie de los manantiales y las corrientes, arroyos y canales se les aplicó un buffer de 100 metros también para simular la superficie de estos. Estas medidas fueron definidas arbitrariamente debido a que no se encontraron los materiales necesarios como imágenes satelitales con la resolución suficiente o trabajo de campo para asignarle a cada cuerpo o corriente de agua su tamaño real.

Como todos los cuerpos y corrientes de agua ya tienen un área se juntaron en una sola capa, esta es una capa de restricciones porque es obligatorio que la reserva natural de ajolotes se ubique en un cuerpo o corriente de agua.

### 3.5 PONDERACIÓN DE CRITERIOS.

Una vez que se estableció la estructura jerárquica se puede realizar la matriz de comparaciones pareadas, la cual establece un grado de importancia de cada criterio respecto a los demás.

<i>Matriz de comparaciones pareadas</i>				
CRITERIO	Temperatura	USV	Peces	ANP
Temperatura	1.00	5.00	5.00	9.00
USV	0.20	1.00	2.00	7.00
Peces	0.20	0.33	1.00	5.00
ANP	0.11	0.14	0.20	1.00
$\Sigma$	1.51	6.48	8.20	22.00

Figura 19. Matriz de comparaciones pareadas. Elaboración propia.

Se estableció que el criterio de más importancia es el valor de la temperatura, seguido del tipo de uso de suelo y vegetación, después continúa el muestreo de peces que amenazan a los ajolotes y al final se encuentra la ubicación de las Áreas Naturales Protegidas, esta ponderación se realizó de manera arbitraria con base en la investigación realizada sobre la extinción del ajolote.

Se obtuvo la matriz de comparaciones pareadas normalizada y el vector característico o eigenvector correspondiente.

<i>Matriz de comparaciones pareadas normalizada</i>					
CRITERIO	Temperatura	USV	Peces	ANP	EIGENVECTOR
Temperatura	0.66	0.77	0.61	0.41	2.45
USV	0.13	0.15	0.24	0.32	0.85
Peces	0.13	0.05	0.12	0.23	0.53
ANP	0.07	0.02	0.02	0.05	0.17

Figura 20. Matriz de comparaciones pareadas normalizada. Elaboración propia.

El peso que tiene cada uno de los criterios sobre la toma de decisión final se obtuvo calculando el promedio del valor del eigenvector.

CRITERIO	Peso	%
Temperatura	0.61	61
USV	0.21	21
Peces	0.13	13
ANP	0.04	5

Figura 21. Ponderación para cada criterio. Elaboración propia.

Para comprobar que existe un nivel adecuado de consistencia entre las comparaciones pareadas se calculó la porción de consistencia PC, la cual debe tener un valor menor que 0.10 lo cual indica un nivel razonable de consistencia en los juicios de las comparaciones pareadas.

$$PC = 0.054$$

Lo cual comprobó que si existe una consistencia en los juicios de las comparaciones pareadas y se puede continuar con la metodología. En un software especializado en procesamiento de información geográfica se utilizó la herramienta de suma ponderada donde se ingresaron las capas correspondientes a cada criterio y la herramienta multiplicó cada capa por su peso dado y después se combinaron estas capas ponderadas para crear un análisis integrado de las áreas factibles para ubicar una reserva natural de ajolotes.

## 4. RESULTADOS.

Como resultado de la suma ponderada se obtuvo una cobertura ráster con diferentes niveles de factibilidad para ubicar la reserva natural de ajolotes, esta cobertura abarca varios estados del país, ver figura 22.

ESTADO	MUNICIPIO	ANP
Sonora	Nácori Chico	Campo Verde
Chihuahua	Madera	
	Casas Grandes	
Nuevo León	Juárez	Cerro de la Silla
	Guadalupe	
Durango	Súchil	C.A.D.N.R 043
	Nombre de Dios	
San Luis Potosí	Zaragoza	Sierra de Álvarez
Hidalgo	Metztitlán	Barranca de Metztitlán
	San Agustín Metzquititlán	
Hidalgo	Atotonilco el Grande Huasca de Ocampo	Barranca de Metztitlán
Hidalgo	Mineral del Chico	El Chico
	Pachuca de Soto	
	Mineral del Monte	
	Omitlán de Juárez	
Estado de México	Ixtapan del Oro	Mariposa Monarca y Z.P.F.T.C.C de los ríos Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostoc y Temascaltepec
	Santo Tomás	
	Valle de Bravo	
	Amanalco	
	Donato Guerra	
	Villa de Allende	
Estado de México	Villa Victoria	Bosencheve y Z.P.F.T.C.C de los ríos Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostoc y Temascaltepec
	Villa de Allende	
Estado de México	San José del Rincón	Mariposa Monarca
Michoacán de Ocampo	Zitácuaro	
	Ocampo	
	Angangueo	
	Senguio	
Estado de México	Toluca	
Estado de México	Metepc	Ciénegas del Lerma
	San Mateo Atenco	
	Lerma	
	Ocoyoacan	
Estado de México	Naucalpan de Juárez	Los Remedios
Estado de México	Ocuilan	Lagunas de Zempoala y Corredor Biológico Chichinautzin
	Xalatlaco	
Morelos	Cuernavaca	
	Tepoztlán	
	Huitzilac	
CDMX	Tlalpan	
Estado de México	Ixtapaluca	Iztaccihuatl - Popocatepetl
	Texcoco	
Morelos	Amacuzac	Sierra de Huautla
	Puente de Ixtla	
	Jojutla	
	Tlaquiltenango	
Tlaxcala	Contla de Juan Cuamatzi	
	Chiautempan	

Tabla 11. Listado de estados donde se ubican los resultados de zonas factibles para ubicar una reserva de ajolotes.  
Elaboración propia.



Figura 22. Mapa de resultados de zonas factibles para la localización de una reserva natural de ajolotes en México. Elaboración propia.

Los resultados de las zonas factibles para ubicar la reserva natural de ajolotes se interceptaron con la capa de restricciones para localizar esas zonas factibles que se encuentran delimitadas por un cuerpo o corriente de agua debido a que los ajolotes son animales acuáticos, ver figura 23.

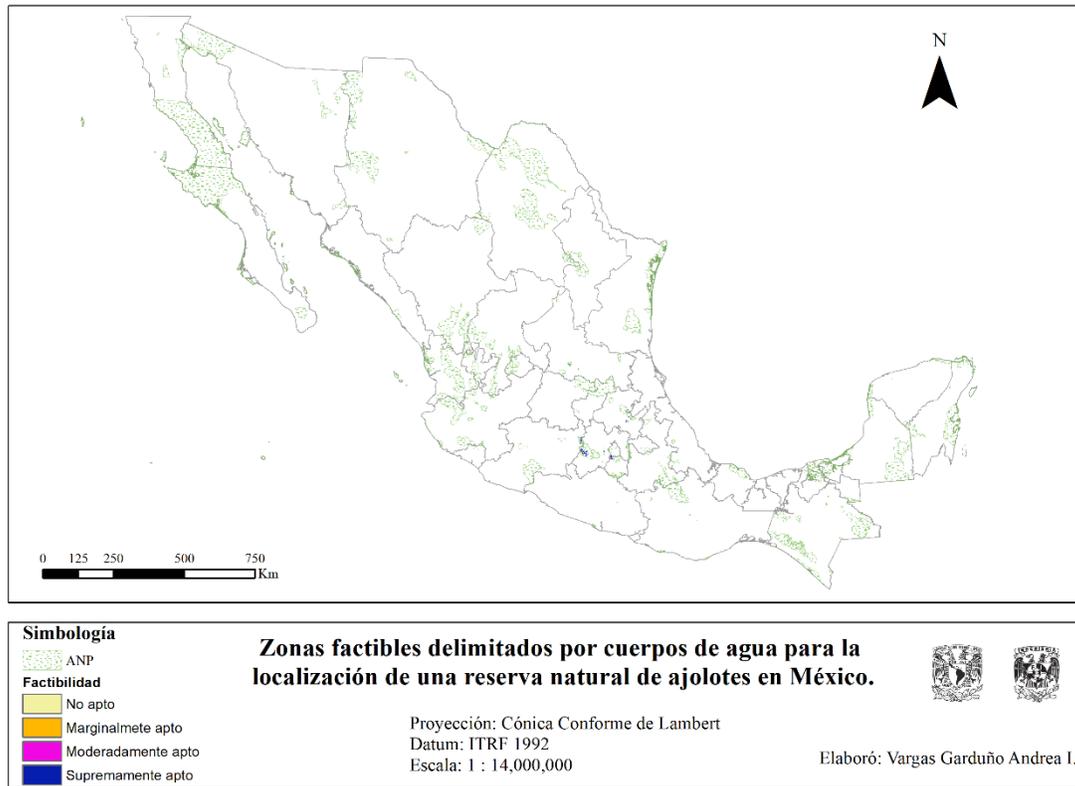


Figura 23. Mapa de resultados de zonas factibles delimitadas por cuerpos de agua para la localización de una reserva natural de ajolotes en México. Elaboración propia.

Las zonas resultantes factibles por estados se pueden observar en la sección de anexos de la figura 25 a la 30.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Se cumplen los objetivos definidos al inicio de este trabajo, localizando zonas a lo largo del territorio mexicano, las cuales cumplen con las características que en este trabajo se abordaron para ubicar una reserva natural de ajolotes, estas zonas se localizaron aplicando en conjunto el análisis multi-criterio y los sistemas de información geográfica.

Se recomienda realizar trabajo de campo previo para tener información más exacta, como recabar la temperatura en sitio, las dimensiones de los cuerpos de agua y muestreos de especies. También se recomienda usar la información geoespacial más reciente existente.

Al realizar un análisis espacial idóneo para tener un manejo más apropiado de la información es recomendable trabajar las capas de información en formato ráster y que tengan la misma resolución para no crear conflicto al momento de superponer las capas ráster.

Para obtener mejores resultados y con una mayor precisión se recomienda tener las capas ráster de los datos con una mayor resolución.

El método de análisis jerárquico desarrollado por Saaty para el análisis multi-criterio integrado con los sistemas de información geográfica demostró ser una notable metodología para solucionar problemas de localización en virtud de que se pueden considerar factores intangibles, al uso de información georreferenciada, y a que el análisis jerárquico permite integrar y evaluar diferentes alternativas según la importancia de cada uno y con todo esto obtener muy buenos resultados además de ser de fácil realización y comprensión.

Los resultados mostraron en su mayoría que las zonas más factibles para la ubicación de una reserva de ajolotes se encuentran gran parte dentro de un área natural protegida lo cual hace más fácil la colocación de la reserva natural de ajolotes debido a que no han sido alteradas significativamente por la actividad humana.

Es necesario generar una conciencia en la población para hacer un uso más responsable de los recursos naturales porque estamos terminando de manera directa e indirecta con nuestros ecosistemas y esto afecta a muchas especies de flora y fauna. En este caso el ajolote es un animal endémico de México que a punto de la extinción debido a que los humanos estamos terminando e invadiendo con su hábitat natural.

Hace falta generar y desarrollar más información sobre la población de los ajolotes a través del tiempo para así ver la evolución de esta especie, también fomentar proyectos o actividades que apoyen la conservación de los ajolotes.

La topografía, los sistemas de información geográfica y la percepción remota son ramas de la Ingeniería Geomática que pueden contribuir para facilitar la obtención de datos, mejorar los estudios y dar solución a problemas biológicos y ambientales.

ANEXOS.

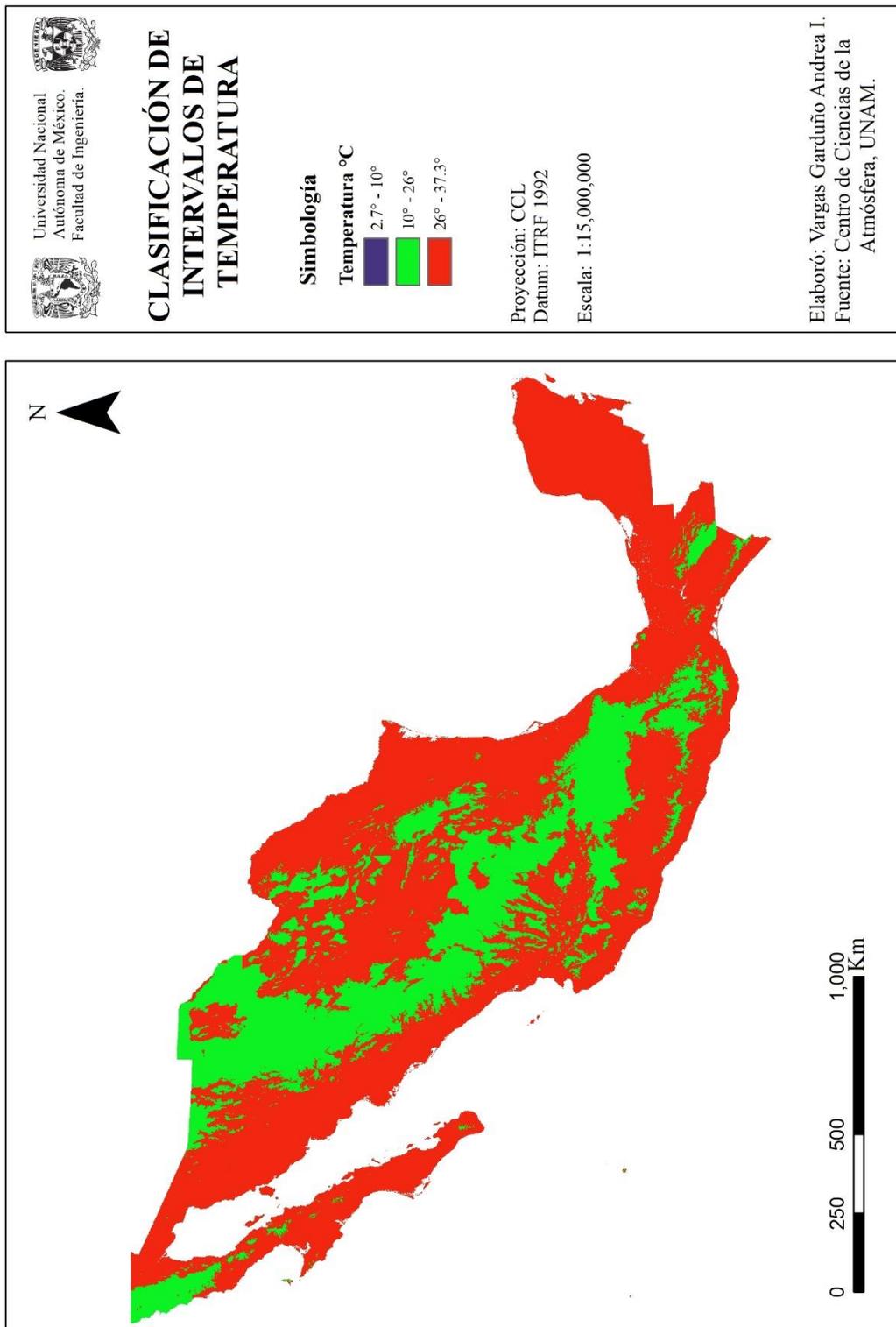


Figura 24. Mapa "Clasificación de intervalos de temperatura". Elaboración propia.

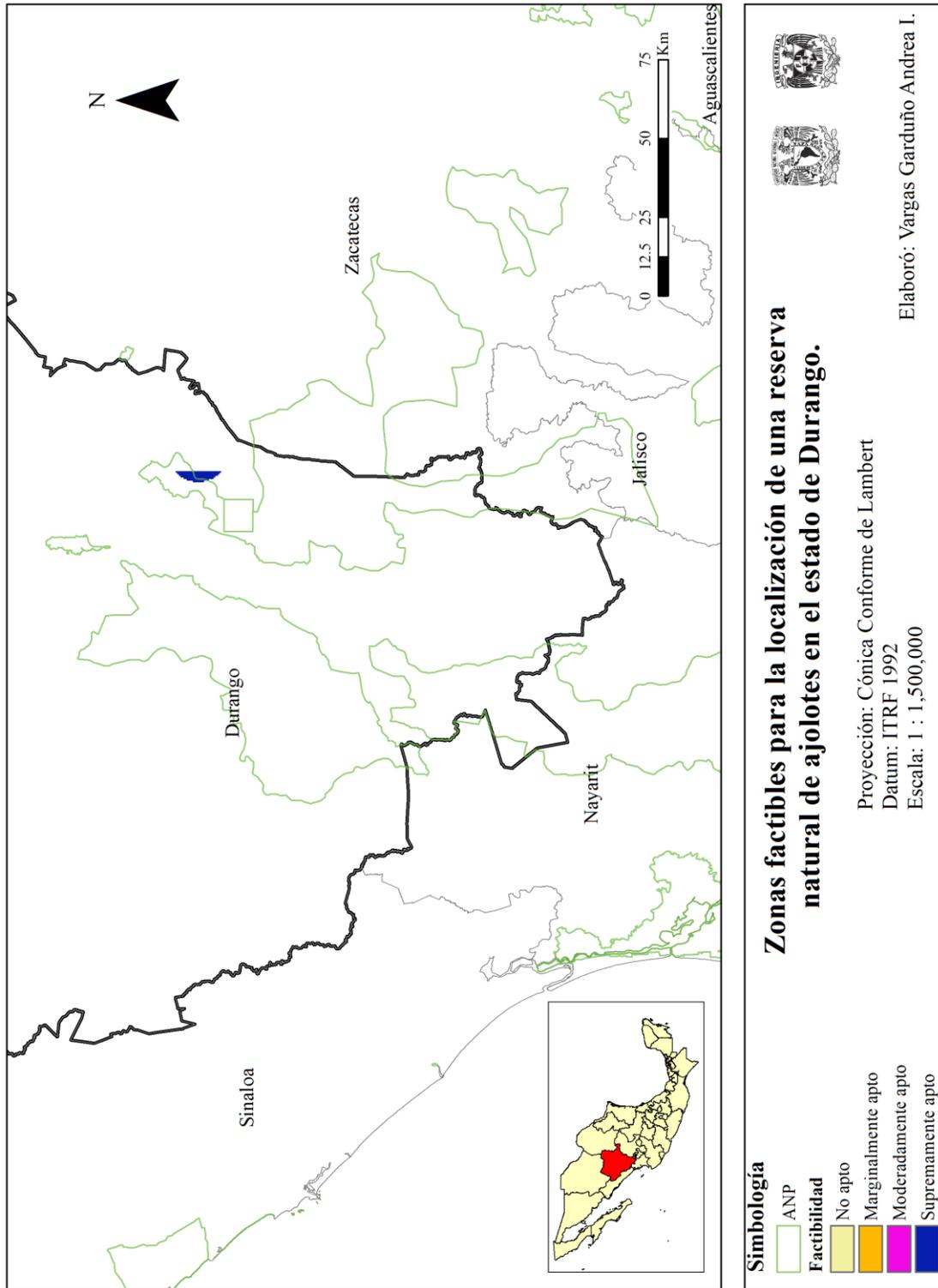


Figura 25. Mapa "Zonas factibles para la localización de una reserva natural de ajolotes en el estado de Durango".  
Elaboración propia.

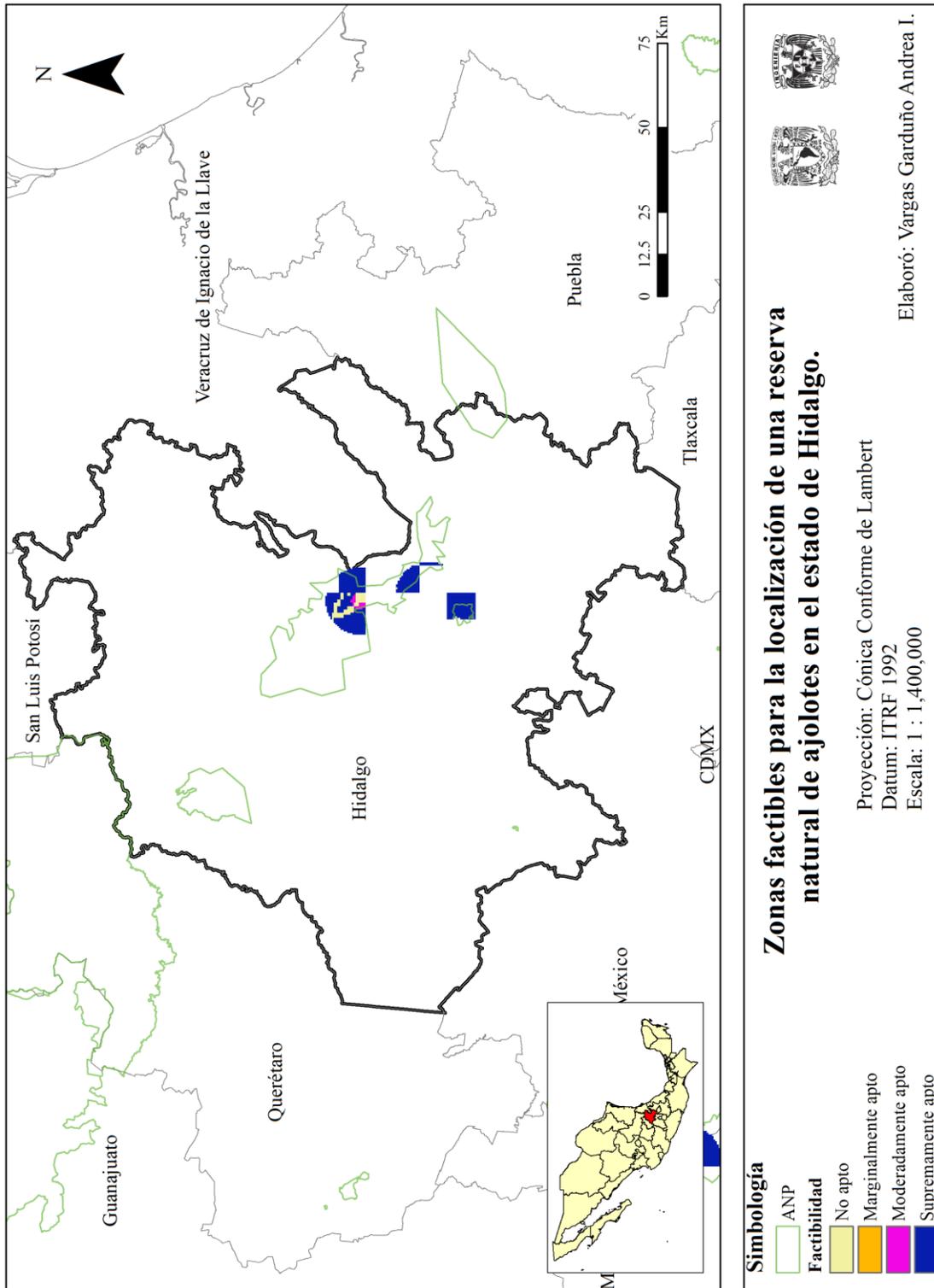


Figura 26. Mapa "Zonas factibles para la localización de una reserva natural de ajolotes en el estado de Hidalgo".  
 Elaboración propia.

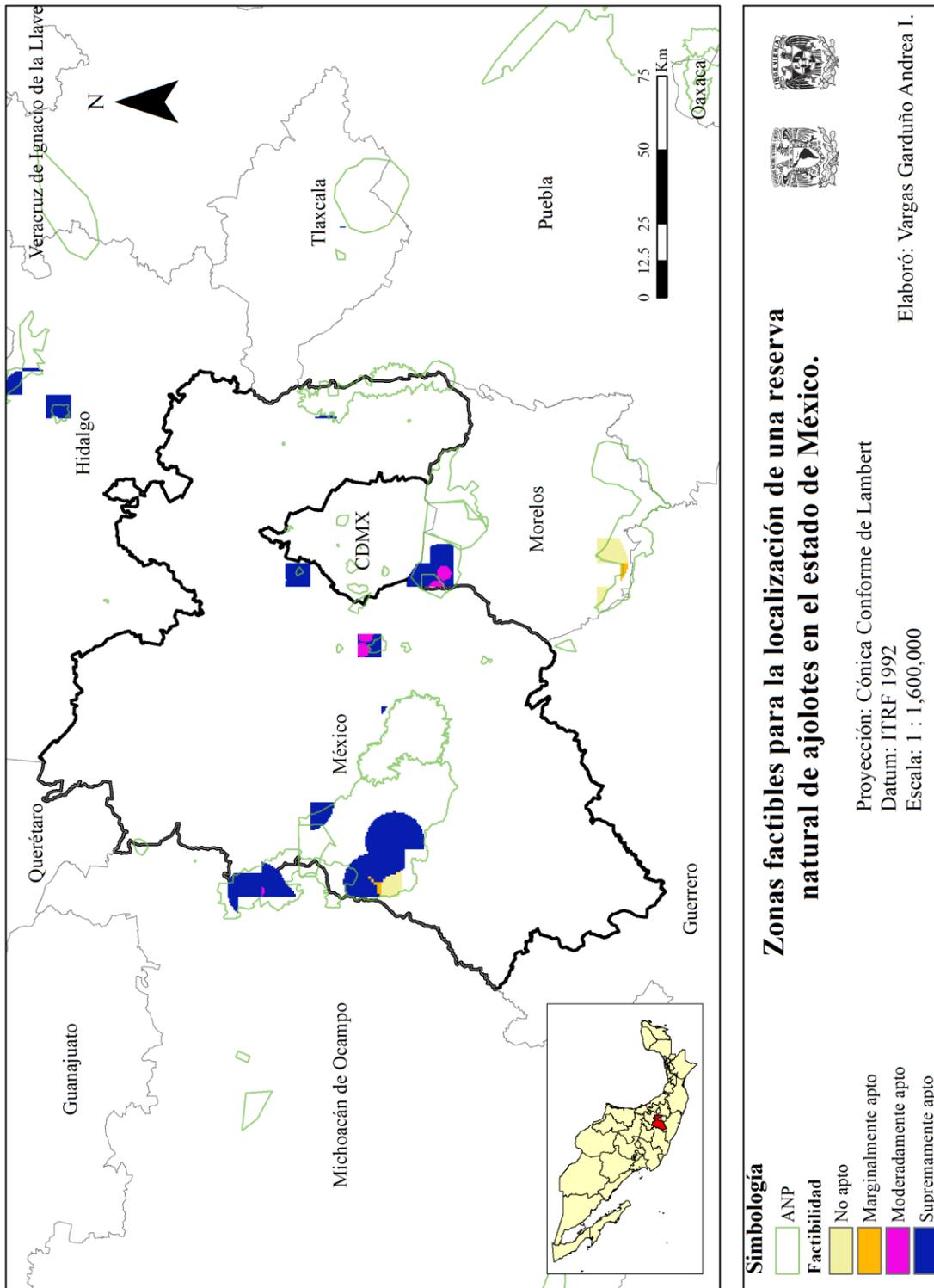


Figura 27. Mapa "Zonas factibles para la localización de una reserva natural de ajolotes en el estado de México".  
 Elaboración propia.

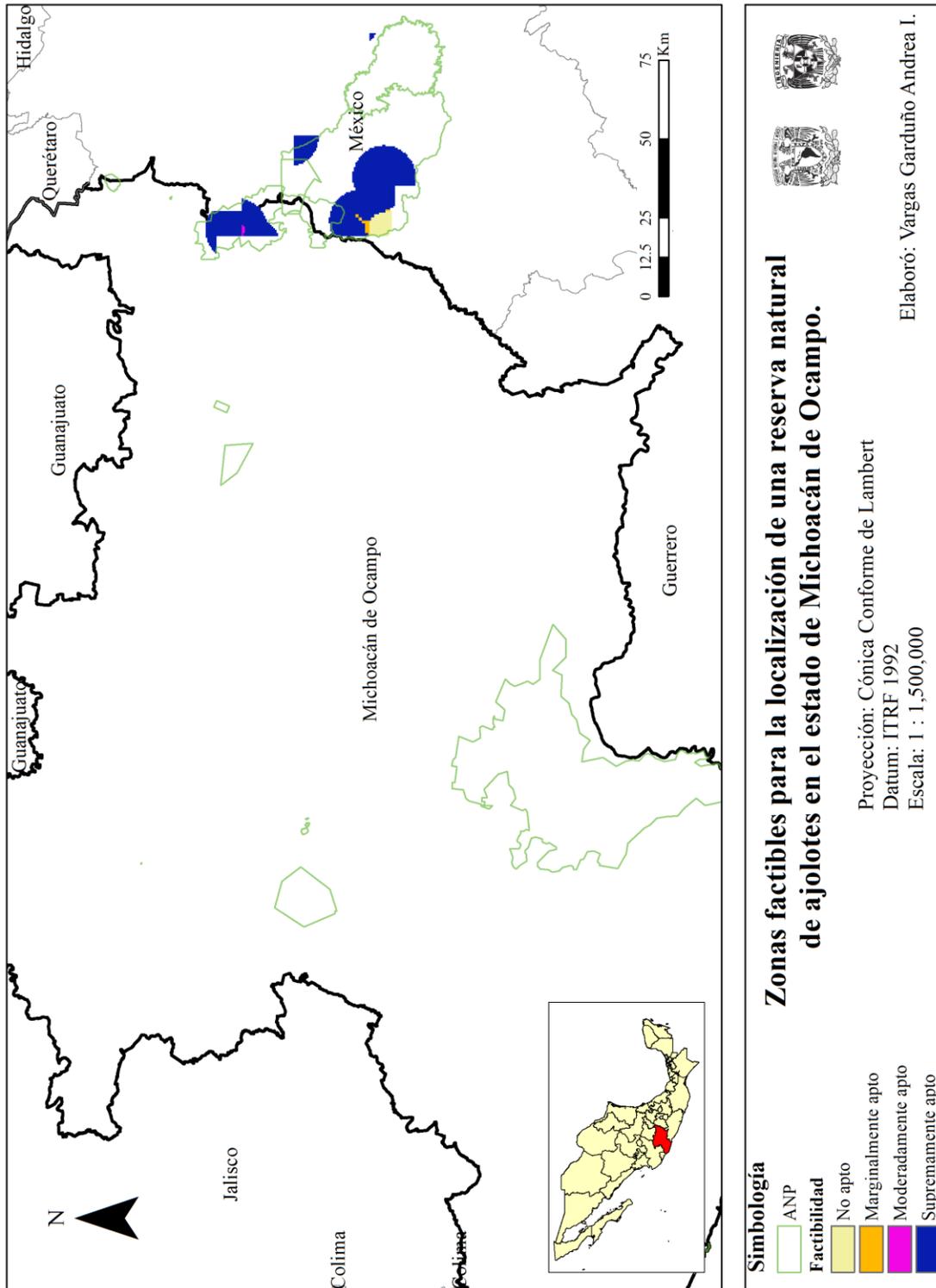


Figura 28. Mapa "Zonas factibles para la localización de una reserva natural de ajolotes en el estado de Michoacán de Ocampo". Elaboración propia.

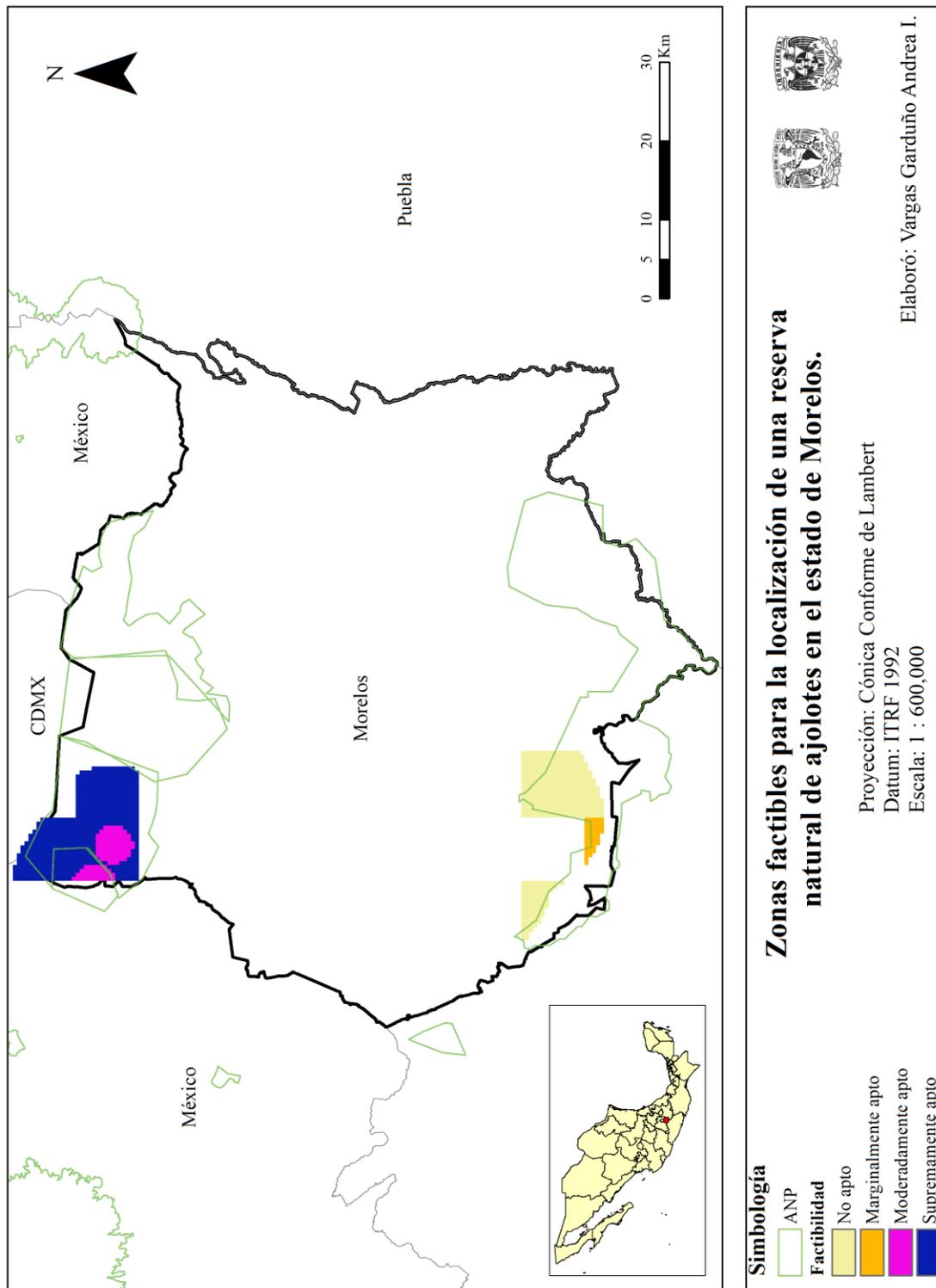


Figura 29. Mapa "Zonas factibles para la localización de una reserva natural de ajolotes en el estado de Morelos".  
 Elaboración propia.

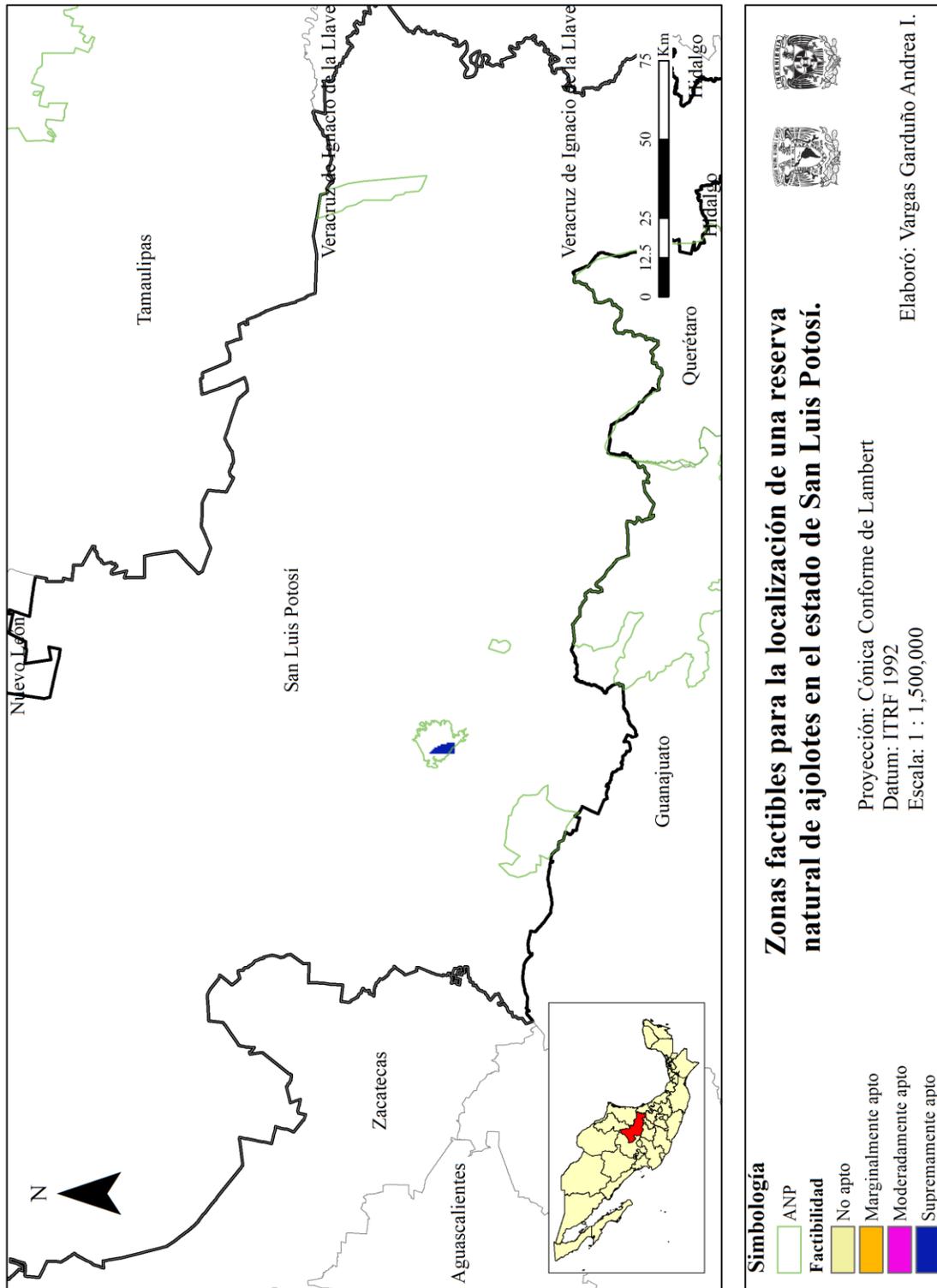


Figura 30. Mapa "Zonas factibles para la localización de una reserva natural de ajolotes en el estado de San Luis Potosí".  
 Elaboración propia.



## BIBLIOGRAFÍA.

- Acciona. (s.f.). *¿Qué es el cambio climático y cómo nos afecta?* Obtenido de <https://www.acciona.com/es/cambio-climatico/>
- CONABIO. (s.f.). *Fragmentación: Biodiversidad mexicana.* Obtenido de <https://www.biodiversidad.gob.mx/corredor/fragmentacion.html>
- CONABIO. (2011). *Fichas de especies prioritarias. Ajolote Mexicano (Ambystoma mexicanum).* Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. Ciudad de México.
- Da Silva , C., & Cardozo, O. (2015). Evaluación multi-criterio y sistemas de información geográfica aplicados a la definición de espacios potenciales para uso del suelo residencial en resistencia. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 23-40.
- de la Garza, M. (2014). El carácter sagrado del xoloitzcuintli entre los nahuas y los mayas. *Arqueología mexicana*, 58-63.
- ESRI. (s.f.). *Análisis Multi-criterio.* Obtenido de <https://www.arcgis.com/apps/Cascade/index.html?appid=5874bf9388024486bd33e734c6db60b9>
- García Lozano, M. (2016). *Eutrofización: una visión general.* Obtenido de CienciAcierta.: <http://www.cienciacierta.uadec.mx/2016/09/26/eutrofizacion-una-vision-general/>
- Gerárd, B., & Toskano Hurtado. (s.f.). *El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores .* Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1870345315300269>
- Harper, D. (1992). *Eutrophication of Freshwaters: Principles, problems and restoration.* Nueva York: Springer Netherlands.
- INEGI. (s.f.). *Sistema de Información Geográfica.* Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/internet/sistemainformaciongeografica.pdf>
- Mena González, H., & Servín Zamora, E. (2014). Laboratorio de Restauración ecológica IB UNAM Manual básico para el cuidado en cautiverio del axolote de Xochimilco (Ambystoma mexicanum).
- Mendoza Almeralla Cinthya, B. P. (2015). La quitridiomycosis en los anfibios de México: una revisión. *Revista Mexicana de Biodiversidad.*, 238-248.
- Olaya, A. V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica.* Obtenido de [https://www.icog.es/TyT/files/Libro\\_SIG.pdf](https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf)

- Ososrio Gómez, J., & Orejuela Cabrera, J. (2008). . El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio, ejemplo de aplicación. *Scientia et Technica*, 247-252.
- Paz, F., Casiano, M., Cruz, C. O., Argumedo, J., Flores , R., & Ochoa, S. (2011). *Manual de Referencia para el Muestreo*. Ciudad de México.
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. (12 de Septiembre de 2016). *Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010*. Obtenido de <https://www.gob.mx/profepa/documentos/norma-oficial-mexicana-nom-059-semarnat-2010>
- Saaty, L. T. (1980). *The analytic hierarchy process*. Nueva York: McGraw Hill.
- Saaty, L. T. (1982). *Decision Making for leaders*. RWS Publications.
- Saaty, L. T. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 9-26.
- Saaty, L. T. (2001). *The seven pillars of the analytic hierarchy process*. . University of Pittsburgh. : Pittsburgh. .
- Sánchez Guerrero, G. (s.f.). *Técnicas participativas para la planeación*. Obtenido de <https://eloisacadenas.files.wordpress.com/2017/03/sc3a1nchez-guerrero-tecnicas-participativas-para-la-planeacion.pdf>
- Sarría, F. (s.f.). *Sistemas de Información Geográfica*. Obtenido de <https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf>
- SEMARNAT. . (2018). *Programa de Acción para la Conservación de las Especies Ambystoma spp, SEMARNAT/CONANP*. Ciudad de México.
- Teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG)*. (s.f.). Obtenido de [http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad2/td\\_sig.htm](http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad2/td_sig.htm)
- Vía García , V., Muñoz Municio, M., & Martín Castro, B. (s.f.). *SIG Y Evaluación Multi-criterio en la valoración de la vegetación y flora de las áreas no protegidas de la comunidad de Madrid*. . Obtenido de [http://tig.age-geografia.es//docs/XII\\_2/096%20-%20Via%20Garcia%20et%20al.pdf](http://tig.age-geografia.es//docs/XII_2/096%20-%20Via%20Garcia%20et%20al.pdf)
- Vredenburg, M., Familiar López, J. E., Frías Álvarez, V. T., Longcore, E., González Bernal, G., & Santos Barrera. (2008). Chytridiomycosis survey in wild and captive Mexican amphibians. *Eco Health*, 18-26.
- Zapata Gutierrez, M., & Solís Juárez, L. (2013). Axolotl: el auténtico mounstro del Lago de Xochimilco. *Kuxulkab'*, 41-46.

