UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL

TESIS

Distribución potencial y escenarios de cambio climático de los pinos piñoneros de San Luís Potosí.

Para obtener el título de

Licenciado en Ingeniería Forestal

PRESENTA

Bernardo Tadeo Sánchez Ruiz

Director

Dr. Sergio Hernández León

Codirector

Dr. José González Ávalos

Comité Asesor

Mtra. Adriana Hernández Lazcano

Lic. Rafael Canales Pérez

Dr. Oscar Arce Cervantes

Dr. Jorge Alberto Flores Cano

Tulancingo de Bravo, Hidalgo, abril del 2025.

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Agropecuarias
Institute of Agricultural Sciences
Área Académica de Ciencias Agrícolas y Forestales
Academic Area of Agricultural and Forestry Sciences

ICAP-PEIF/004/2025

Mtra. Ojuky del Rocío Islas Maldonado
Directora de Administración Escolar
P r e s e n t e

Por este conducto informo que el jurado asignado a él pasante de la Licenciatura de Ingeniería Forestal **Bernardo Tadeo Sánchez Ruíz**, con número de cuenta **282365,** ha autorizado a impresión de tesis titulada **Distribución potencial y escenarios de cambio climático de los pinos piñoneros de San Luis Potosí.** Esto después de que el alumno realizó las correcciones acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del jurado:

Presidente: Dr. Oscar Arce Cervantes
Secretario: Mtra. Adriana Hernández Lazcano
Vocal: Lic. Rafael Canales Pérez
Suplente 1: Dr. Sergio Hernández León
Suplente 2: Dr. José González Ávalos
Suplente 3: Dr. Jorge Alberto Flores Cano

ATENTAMENTE
"Amor, Orden y Progreso"
Tulancingo de Bravo, Hidalgo, a 09 de mayo del 2025.

Dr. José González Ávalos
Coordinador del Programa Educativo de Ingeniería Forestal

Dr. Armando Peláez Acero
Director del ICAP

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi madre, Gabriela Ruiz López por formarme como persona, por brindarme todas las herramientas para poder finalizar una carrera universitaria, por su apoyo y por todo el amor que me ha brindado a lo largo de mi vida.

A mi hermano, Víctor Manuel Sánchez Ruiz, por ser mi compañero de vida, compartir muchos momentos juntos y por acompañarme, amarme y apoyarme incondicionalmente.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento al Dr. Sergio Hernández León por brindarme la confianza de realizar este trabajo de investigación con él como mi director de tesis, por guiarme y darme su apoyo durante todo el proceso que esta misma conlleva y enriquecer mi conocimiento y herramientas durante la elaboración de este trabajo.

De igual manera agradezco al Ing. Rafael Canales Pérez por compartir conmigo sus conocimientos, su apoyo continuo y disponibilidad para la resolución de diferentes situaciones que en conjunto logramos superar.

Agradezco a cada uno de los integrantes de mi comité tutorial de esta tesis, por su tiempo y sus aportaciones tanto en mi formación universitaria como en este trabajo de investigación; gracias por cada clase, cada lección y cada aportación que tuvieron durante mi paso por la universidad.

Por último, agradezco el apoyo de mi madre, mi hermano y mi familia en general por apoyarme en esta etapa de estudios universitarios, ya que, sin ellos, no hubiera sido posible concluir con esta etapa de mi vida escolar/educativa.

ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS iv

ÍNDICE DE FIGURAS vi

RESUMEN viii

Abstract ix

I. INTRODUCCIÓN 1

II. OBJETIVOS 2

2.1. Objetivo general 2

2.2. Objetivos específicos 2

III. MARCO TEÓRICO 3

3.1.1. Conceptos 3

3.1.2. Nicho ecológico 3

3.1.3 Distribución potencial 4

3.1.4 Diagrama BAM 4

3.1.5. Variables bioclimáticas 4

3.1.6. Escenarios de cambio climático 6

IV. Materiales y métodos 9

V. Descripciòn de las especies 12

5.1. *Pinus cembroides* Zucc. 12

5.1.1. Descripción morfológica. 12

5.1.2. Hábitat. 12

5.1.3. Distribución 12

5.2. *Pinus discolor* D. K. Bailey *et* Hawksw. 13
5.2.1. Descripción morfológica 13
5.2.2. Hábitat 13
5.2.3. Distribución 13
5.3. *Pinus johannis* Rob.-Pass. 13
5.3.1. Descripción morfológica 13
5.3.2. Hábitat 13
5.3.3. Distribución 13
5.4. *Pinus nelsonni* Shaw. 14
5.4.1. Descripción morfológica 14
5.4.2. Hábitat 14
5.4.3. Distribución 14
5.5. *Pinus pinceana* Gordon 14
5.5.1. Descripción morfológica 14
5.5.2. Hábitat 14
5.5.3. Distribución 15
VI. RESULTADOS 16
6.1. *Pinus johannis.* 18
6.1.1. Registros de presencia 18
6.1.2. Distribución potencial 19
6.1.3. Escenarios de cambio climático 20
6.2. *Pinus discolor.* 25
6.2.1. Registros de presencia 25
6.2.2. Distribución potencial 26
6.2.3. Escenarios de cambio climático 26

6.3. *Pinus nelsonii.* 32
6.3.1. Registros de presencia 32
6.3.2. Distribución potencial 33
6.3.3. Escenarios de cambio climático 33
6.4. *Pinus pinceana.* 39
6.4.1. Registros de presencia 39
6.4.2. Distribución potencial 40
6.4.3. Escenarios de cambio climático 40
6.5. *Pinus cembroides* 46
6.5.1. Registros de presencia 46
6.5.2. Distribución potencial 47
6.5.3. Escenarios de cambio climático 47
VII. DISCUSIÓN 53
VIII. CONCLUSIONES 56
XIII. REFERENCIAS 57

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Variables bioclimáticas de Chelsa. 5

Cuadro 2. Componentes considerados en los escenarios de cambio climático GFDL-ESM4. 7

Cuadro 3. Componentes considerados en los escenarios de cambio climático UKESM1. 8

Cuadro 4. Número total y calibradas de ocurrencias por especie en San Luis Potosí. ..16

Cuadro 5. Diferencia porcentual entre municipios con ocurrencias y municipios con características idóneas para distribución potencial de especies. 16

Cuadro 6. Resultados promedio obtenidos de la distribución según escenarios de cambio climático. 17

Cuadro 7. Porcentaje promedio de aportación de variables bioclimáticas en las cinco especies de pinos piñoneros. 18

Cuadro 8. Descripción de las variables climáticas con mayor aportación al modelo de *Pinus johannis.* 19

Cuadro 9. Superficie de distribución para San Luis Potosí de *P. johannis* con los escenarios de cambio climático con proyección 2041-2070. 20

Cuadro 10. Descripción de las variables climáticas con mayor aportación al modelo de Pinus discolor. 25

Cuadro 11. Superficie de distribución para San Luis Potosí de *P. discolor* con los escenarios de cambio climático con proyección 2041-2070. 26

Cuadro 12. Descripción de las variables climáticas con mayor aportación al modelo de *Pinus nelsonii.* 32

Cuadro 13. Superficie de distribución para San Luis Potosí de *P. nelsonii* con los escenarios de cambio climático con proyección 2041-2070. 33

Cuadro 14. Descripción de las variables climáticas con mayor aportación al modelo de *Pinus pinceana.* 39

Cuadro 15. Superficie de distribución para San Luis Potosí de *P. pinceana* con los escenarios de cambio climático con proyección 2041-2070. 40

Cuadro 16. Descripción de las variables climáticas con mayor aportación al modelo de *Pinus cembroides.* 46

Cuadro 17. Superficie de distribución para San Luis Potosí de *P. cembroides* con los escenarios de cambio climático con proyección 2041-2070. 48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de registros seleccionados para el modelado de la distribución potencial de *P. johannis* en S.L.P. El área en azul representa el área de calibración. 21

Figura 2. Distribución potencial de *P. johannis.* 22

Figura 3. Distribución potencial de *P. johannis* en SLP. 23

Figura 4. Escenarios de cambio climático GFDL-ESM4 y UKESM1 de la especie *P. johannis* en San Luis Potosí. 24

Figura 5. Mapa de registros seleccionados para el modelado de la distribución potencial de *P. discolor* en S.L.P. El área en azul representa el área de calibración. 28

Figura 6. Distribución potencial de *P. discolor*. 29

Figura 7. Distribución potencial de *P. discolor* en SLP. 30

Figura 8. Escenarios de cambio climático GFDL-ESM4 y UKESM1 de la especie *P. discolor* en San Luis Potosí. 31

Figura 9. Mapa de registros seleccionados para el modelado de la distribución potencial de *P. nelsonii* en S.L.P. El área en azul representa el área de calibración. 35

Figura 10. Distribución potencial *P. nelsonii*. 36

Figura 11. Distribución potencial de *P. nelsonii* en SLP. 37

Figura 12. Escenarios de cambio climático GFDL-ESM4 y UKESM1 de la especie *P. nelsonii* en San Luis Potosí. 38

Figura 13. Mapa de registros seleccionados para el modelado de la distribución potencial de *P. pinceana* en S.L.P. el área en azul representa el área de calibración. 42

Figura 14. Distribución potencial de *P. pinceana.* 43

Figura 15. Distribución potencial de *P. pinceana* en San Luis Potosí. 44

Figura 16. Escenarios de cambio climático GFDL-ESM4 y UKESM1 de la especie *P. pinceana* en San Luis Potosí. 45

Figura 17. Mapa de registros seleccionados para el modelado de la distribución potencial de *P. cembroides* en S.L.P. El área en azul representa el área de calibración. 49

Figura 18. Distribución potencial de *P. cembroides*. 50

Figura 19. Distribución potencial de *P. cembroides* en SLP. 51

Figura 20. Escenarios de cambio climático GFDL-ESM4 y UKESM1 de la especie *P. cembroides* en San Luis Potosí. 52

RESUMEN

Las especies de pino piñonero son una importante fuente de ingresos en todo el país, mucha gente los conoce y los consume, ya sea directamente o en platos típicos; los objetivos de esta investigación fueron generar mapas de la distribución potencial de poblaciones de pino piñonero en el estado de San Luís Potosí, México, utilizando registros obtenidos de bases de datos en línea, para generar modelos en R y R Studio ®, que permitan visualizar su distribución conocida y potencial así como estimar su área de ocupación dada la importancia ecológica y económica de la especie, estos mapas constituirán la base orientadora para la planificación del trabajo de campo en el futuro y permitirán diseñar planes de aprovechamiento forestal.

En San Luis Potosí se encuentran las siguientes especies de piño piñonero, (*Pinus cembroides* Zucc., *P. discolor* D. K. Bailey *et* Hawksw, *P. johannis* Rob. -Pass., *P. nelsonni* Shaw y *P. pinceana* Gordon) las cuales cuentan con registros en línea.

En esta investigación se procesaron y analizaron por medio de R y R Studio® para estimar su distribución potencial y futura tomando en cuenta escenarios de cambio climático.

Se obtuvieron los nombres de los municipios con potencial de distribución de dos de las cinco especies de pinos piñoneros que se encuentran de manera natural en San Luis Potosí, de acuerdo con las variables bioclimáticas y los registros documentados hasta el momento.

En los mapas obtenidos en esta investigación es posible observar las zonas de San Luis Potosí donde existen los factores bioclimáticos para la propagación y desarrollo de las especies, donde se puede llevar a cabo trabajo de campo para buscar cada uno de los pinos piñoneros con la finalidad de obtener nuevos registros y con ello facilitar su manejo y aprovechamiento.

Se detectaron los municipios con distribución potencial para las especies de pinos piñoneros, en los cuales es posible documentar nuevas observaciones, así como las áreas con condiciones óptimas donde será posible la implementación de mayor número de plantaciones que cuenten con las características requeridas resultando en una mayor

supervivencia y adaptación a los factores bioclimáticos de las regiones donde se llevarán a cabo.

ABSTRACT

Pinion pine species are an important source of income throughout the country, many people know it and consume it, either directly or in typical dishes; the objectives of this research were to generate maps of the potential distribution of populations of pinyon trees in the state of San Luís Potosí, Mexico, using records obtained from online databases, to generate models in R and R Studio ®, which allow us to know their known and potential distribution as well as to estimate their area of occupancy given the ecological and economic importance of the species, these maps will constitute the guiding basis for planning field work in the future and will allow the design of forestry exploitation plans, correlating the pedological variable in the distribution to reveal the percentage of contribution that this variable has in the final model.

In San Luis Potosí we find the stone pine species (*Pinus cembroides* Zucc., *P. discolor* D. K. Bailey *et* Hawksw, *P. johannis* Rob.-Pass., *P. nelsonni* Shaw and *P. pinceana* Gordon) which have records online.

In this research they were processed and analyzed using R and R studio to estimate their current distribution, potential distribution and distribution taking into account climate change scenarios.

The names of the municipalities with potential distribution of two of the five species of stone pines that are found naturally in San Luis Potosí were obtained, according to the bioclimatic variables and the records documented to date.

In the maps obtained in this research it is possible to observe the areas in San Luis Potosí where bioclimatic factors exist for its propagation and development, where field work can be carried out to search for each of the species with the purpose of obtaining new records. and facilitate its management and use.

Municipalities with potential distribution for stone pine species were detected, in which it is possible to document new observations. Also, in areas with optimal conditions, it will be

possible to implement a greater number of plantations that have the required characteristics, including better survival and adaptation. to the bioclimatic factors of the regions where they will be carried out.

I. INTRODUCCIÓN

México está dentro de los diez países con mayor superficie de bosques primarios y también existen registros de todos los tipos de vegetación conocidos; el país cuenta con la mayor biodiversidad y variedad de ecosistemas, siendo el hábitat y sustento de distintos pueblos, comunidades y especies de flora y fauna; otorgando infinidad de bienes y servicios ambientales que favorecen a todos los individuos dentro y fuera de los ecosistemas naturales (SEMARNAT, 2021).

Uno de los ecosistemas más importantes en México lo conforman los bosques de pino, comunidades conformadas en su mayoría por árboles grandes del género pinus en zonas montañosas con clima templado a frío. México cuenta con 43 de estas especies de pinos (Gernandt y Pérez-de la Rosa, 2014), que son alrededor del 42.48% de las 113 especies que existen en todo el mundo (Jin *et al*., 2021). Las cuales son de beneficio al medio ambiente, en los ciclos biogeoquímicos del ecosistema, los regímenes del fuego y brindan hábitat y alimento a la fauna silvestre del país, produciendo también recursos tales como la madera para la fabricación de muebles, resinas para la producción de brea y aceites, además de la producción de piñones fuente de alimento, entre otros (SEMARNAT, 2018).

En el estado de San Luis Potosí se distribuyen de manera natural cinco especies de pinos piñoneros las cuales presentan una problemática de distribución aislada y en zonas de difícil acceso, cabe destacar que dos de ellas en estatus de peligro de extinción (*Pinus nelsonii* y *P. pinceana*) (SEMARNAT, 2010).

Los modelados de nicho ecológico son de suma importancia para combatir la degradación y transformación de los ecosistemas ya que en ellos encontramos una herramienta para el estudio y entendimiento de los patrones de biodiversidad (Mota Vargas *et al*.,2020).

Estos modelos utilizan diferentes factores tales como los registros de presencia de la especie a estudiar, las ausencias, variables bioclimáticas y las unidades de modelado; teniendo estos factores se realiza el modelado de nicho ecológico y distribución potencial para obtener las imágenes y resultados requeridos para su uso a favor de

la conservación y prevención de la perdida de la biodiversidad (Mota Vargas *et al*., 2020).

Por lo anterior el objetivo de este trabajo es obtener datos teóricos para el conocimiento de su distribución potencial para dar manejo y aprovechamiento a las cinco especies presentes en el estado, favorecer su reproducción y obtener el conocimiento para reconocer zonas donde estas especies puedan ser introducidas y como una base para tener nuevos registros sobre la ubicación de las mismas.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Generar mapas de distribución actual y potencial de los pinos piñoneros de San Luís Potosí, por medio de registros documentados en línea para conocer su área de distribución que sirva para proponer estrategias de conservación y planes de manejo a nivel estatal, considerando su distribución futura bajo escenarios de cambio climático.

2.2. Objetivos específicos

- Generar mapas de distribución potencial para cada una de las especies de piñonero, por medio del softwareR, R Studio ®y ArcMap, para estimar su área de distribución potencial y proponer trabajo de campo futuro.
- Analizar la distribución futura tomando en cuenta escenarios de cambio climático para localizar las zonas más susceptibles a la pérdida de distribución y promover su protección.

III. MARCO TEÓRICO

Los recursos forestales son de suma importancia tanto ambiental como económicamente a nivel nacional e internacional, ya que nos otorgan diversos productos maderables, no maderables y servicios ambientales (Jin *et al*., 2021).

En el mundo existen más de 100 especies de pinos, en México contamos con alrededor del 42.48% de estas y la mayoría de estas son endémicas del territorio mexicano (Jin *et al*., 2021). Los pinos son un género con tolerancia a condiciones extremas de clima, tanto a la sequía como al frío extremo y son muy importantes como plantas pioneras, lo que implica que pueden establecerse en suelos muy pobres y ayudan a su reacondicionamiento (Santillán, 2021).

En el estado de San Luis Potosí se encuentran las cinco especies de pinos piñoneros son *Pinus pinceana* y *P. cembroides* los que cuentan con mayor número de registros para el estado, la primera especie se encuentra en la categoría de riesgo en peligro de extinción (Nom-059-SEMARNAT-2010).

Actualmente existen diversas paqueterías informáticas que pueden contribuir a su conservación y rescate; El paquete R es un conjunto de funciones integradas de software tanto para manipulación de datos, cálculo y visualización gráfica que utiliza lenguaje de informática y estadística, proporciona una amplia variedad de herramientas para el análisis de datos lineales, no lineales, análisis en serie, algoritmos de clasificación, entre otros; permitiendo a los usuarios generar sus propias fórmulas y funciones (Vargas *et al*; 2021).

3.1.1. Conceptos

3.1.2. Nicho ecológico

Un nicho ecológico es el lugar de una especie en una biogeocenosis, determinada por el potencial biótico y todos los factores ambientales a los que esta se adapta para su distribución y óptimo desarrollo, tomando en cuenta el espacio físico que ocupa, así como su papel dentro de la comunidad y relación con factores externos (Mota Vargas *et al*., 2020).

El nicho ecológico cuenta con tres componentes: el nicho espacial, nicho trófico y nicho ecológico, obteniendo de esta manera las zonas con características bióticas y abióticas donde la existencia de esta especie es favorable tanto para la comunidad donde se ubica como para el desarrollo mismo de la especie (Mota Vargas *et al*., 2020).

3.1.3 Distribución potencial

La distribución potencial indica las zonas donde podría haber poblaciones de nuestras especies, tomando en cuenta todos los factores abióticos. En caso de no haber poblaciones, muestra donde sería óptimo llevar a cabo la implementación de estas especies y que debido a las características presentes en la zona se desarrollarían sin ningún problema, siendo estos resultados importantes en cuestiones de aprovechamiento o establecimiento de especies en peligro de extinción para favorecer su recuperación (Mota Vargas *et al*., 2020).

3.1.4 Diagrama BAM

El diagrama BAM (Biotic-Abiotic-Movement) es una representación abstracta del espacio geográfico (G) en el que se encuentran tres regiones:

La región “A” que es la región o el área donde se encuentran las condiciones ambientales para la supervivencia y reproducción de la especie; la región “B” donde se encuentran las características en el ambiente biótico adecuado para una especie y por último la región o área “M” que es donde las regiones “A” y “B” convergen para crear el área donde la especie se puede establecer y reproducir dadas las características climáticas y bióticas adecuadas (Townsend, *et al*., 2005).

3.1.5. Variables bioclimáticas

Las variables bioclimáticas tomadas en cuenta son las que se utilizan principalmente para llevar a cabo el análisis de distribución potencial que son las variables bioclimáticas Chelsa mostradas en el cuadro 1 (Karger, *et al*., 2017).

Cuadro 1. Variables bioclimáticas de Chelsa.

Abreviatura	Nombre	Definición
bio 1	Temperatura media anual del aire	Temperatura media diaria anual del aire promediada a lo largo de 1 año
bio 2	Temperatura media diurna del aire	Rango medio diurno de temperaturas promediadas a lo largo de 1 año
bio 3	Isotermia	Relación entre la variación diurna y la variación anual de las temperaturas
bio 4	Estacionalidad de las temperaturas	Desviación típica de las temperaturas medias mensuales
bio 5	Temperatura media diaria máxima del aire del mes más cálido	La temperatura más alta de cualquier temperatura máxima media diaria mensual
bio 6	Temperatura mínima media diaria del aire del mes más frío	La temperatura más baja de cualquier temperatura máxima media diaria mensual
bio 7	Rango anual de temperatura del aire	Diferencia entre la temperatura máxima del mes más cálido y la temperatura mínima del mes más frío
bio 8	Temperaturas medias diarias del aire del trimestre más húmedo	Se determina el trimestre más lluvioso del año (al mes más próximo)
bio 9	Temperaturas medias diarias del aire del trimestre más seco	Se determina el trimestre más seco del año (al mes más próximo)
bio10	Temperaturas medias diarias del aire del trimestre más cálido	Se determina el trimestre más cálido del año (al mes más próximo)
bio 11	Temperaturas medias diarias del aire del trimestre más frío	Se determina el trimestre más frío del año (al mes más próximo)
bio 12	Cantidad de precipitación anual	Importe acumulado de las precipitaciones en 1 año

bio 13	Cantidad de precipitación del mes más lluvioso	La precipitación del mes más húmedo

Continuación cuadro 1.

Abreviatura	Nombre	Definición
bio 14	Cantidad de precipitación del mes más seco	La precipitación del mes más seco.
bio 15	Estacionalidad de las precipitaciones	El coeficiente de variación es la desviación típica de las estimaciones mensuales de precipitaciones expresada en porcentaje de la media de dichas estimaciones (es decir, la media anual).
bio 16	Precipitación media mensual del trimestre más húmedo	Se determina el trimestre más lluvioso del año (al mes más próximo)
bio 17	Precipitación media mensual del trimestre más seco	Se determina el trimestre más seco del año (al mes más próximo)
bio 18	Cantidad media de precipitación mensual del trimestre más cálido	Se determina el trimestre más cálido del año (al mes más próximo)
bio 19	Precipitación media mensual del trimestre más frío	Se determina el trimestre más frío del año (al mes más próximo)

3.1.6. Escenarios de cambio climático

Para los análisis efectuados en este estudio se utilizaron dos modelos del sistema terrestre: GFDL-ESM4 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) y UKESM1. (The UK Earth System Modelling). El primero mencionado, el GFDL-ESM4, lleva a cabo una simulación entre los componentes carbono-química-clima y reúne las características de su modelo predecesor CM4 (Resolución oceánica para el clima físico), complementándolo con las características en aerosoles y sus emisiones precursoras, vegetación del ecosistema terrestre y competencia del dosel e incendios de varios días; con estas características, el modelo GFDL-ESM4, captura las características antes mencionadas con mayor fidelidad al ciclo tierra-atmósfera-océano enfocándose en la química y exhaustividad del ecosistema (Adcroft, *et al*., 2019).

A continuación, en el cuadro 2 se enlistan los componentes que el modelo GFDL-ESM4 considera para el modelado:

Cuadro 2. Componentes considerados en los escenarios de cambio climático GFDL-ESM4.

Componentes	Descripción
1	Dinámica atmosférica y física
2	Cuadrícula vertical
3	Arrastre de ondas gravitacionales convectivas
4	Escala de velocidad de caída de hielo
5	Escala de erosión de las nubes de Tiedke
6	Aerosoles atmosféricos y química
7	Química del ozono
8	Emisiones de polvo
9	Sulfato
10	Emisiones de sal marina
11	Deposición de aerosoles
12	Océano
13	Resolución horizontal
14	Remolinos de mesoescala
15	Parametrización de remolinos de capas mixtas
16	Biogeoquímica
17	Penetración de ondas cortas
18	Intercambio de CO_2 atmosférico
19	Otros intercambios atmosféricos
20	Tierra
21	Nieve/suelo/hidrología
22	Conductancia estomática
23	Carbono del suelo
24	Ecosistema terrestre
25	Fuego
26	Polvo

Por su parte, el modelo UKESM es el modelo del sistema terrestre del Reino Unido, el cual se basa en representaciones mejoradas de procesos en la atmósfera, el océano y la tierra. Este cuenta con los siguientes parámetros de simulación:

Biogeoquímica terrestre: JULES (Joint UK Land Environment Simulator; Clark *et al*., 2011), con desarrollos en fisiología vegetal y tipos funcionales (Harper *et al*., 2018), uso de la tierra y la introducción del ciclo del nitrógeno.

Biogeoquímica oceánica: MEDUSA (modelo de dinámica de ecosistemas, uso de nutrientes, secuestro y acidificación; Yool *et al*., 2013), con la adición de un submodelo de diagnóstico para la concentración de DMS en agua de mar superficial (Anderson *et al*., 2001) para respaldar las emisiones interactivas de DMS a la atmósfera.

Composición atmosférica: UKCA (modelo de química y aerosoles del Reino Unido; Archibald *et al*., 2019; Mulcahy *et al*., 2018) con química estratosférica-troposférica unificada y acoplamiento estrecho entre química y aerosoles.

A continuación, en el cuadro 3 se enlistan los componentes que el modelo UKESM1 toma en cuenta para los procesos de predicción de distribución y cambio climático:

Cuadro 3. Componentes considerados en los escenarios de cambio climático UKESM1.

Componentes	Descripción
1	Tierra-océano-atmósfera
2	Tierra
3	Química-radiación
4	Química-vapor de agua
5	Nubes de radiación y aerosoles
6	Química-aerosol
7	Química de las nubes
8	Vegetación-química-aerosol
9	Vegetación-aerosol-océano
10	Aerosol-oceánico

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se llevó a cabo para identificar las zonas donde se puedan desarrollar las especies de manera óptima según los factores bioclimáticos, documentando su localización para explorar dichas mismas zonas para su manejo, aprovechamiento y conservación.

El estudio se realizó mediante registros en diversas fuentes recopiladas en Global Biodiversity Information Facility (GBIF) utilizando sistemas de información geográfica (Arcmap 10.8.1) y R en su versión 4.3.2; GBIF cuenta con la mayor cantidad de registros de cada una de las especies estudiadas. Los parámetros de observaciones humanas y espécimen preservado fueron seleccionados para su descarga y procesamiento en el formato *Darwincore* con la finalidad de tener la mayor información posible sobre dichas observaciones.

La limpieza inicial de datos se realizó con base en la información proveniente de la página web “Conifers.org” y el libro “A Handbook of the World’s Conifers” del autor Farjon (2010), descartando sinonimias de las especies y tomando en cuenta la distribución que indica cada autor; con el método de Cobos *et al.* (2018) se realizó la selección de los registros eliminando los registros con las siguientes características:

- Registros fuera de los límites ambientales de distribución.
- Registros que no cuentan con precisión decimal.
- Registros con datos faltantes.
- Registros repetidos.
- Registros fuera del área de estudio.
- Registros con coordenadas 0,0.

Para la obtención de modelos se llevó a cabo una limpieza de datos mediante la herramienta CoordinateCleaner dentro del software R Core Team (2021). CoordinateCleaner es una herramienta o paquete utilizado para la limpieza automática de registros de ocurrencias de colecciones biológicas, realizando pruebas y excluyendo registros que se encuentren dentro de océanos, museos y zonas urbanas, al igual que

elimina registros con información incompleta y repetida en coordenada (Ziska *et al*., 2019).

Para el análisis y procesamiento de los registros obtenidos se utilizaron los softwares R Core Team en su versión 4.3.2 (2021) y R Studio ®, de los cuales se obtuvieron las ocurrencias calibradas, la zona M y los modelos de distribución potencial y a futuro de las especies. Las herramientas y comandos que se utilizaron dentro de R Core Team para este proceso fueron biomod2, Spthin, CoordinateCleaner, Terra, Wallace y fuzzySim.

El paquete biomod2 permite la ejecución de hasta 10 modelos en un conjunto de datos del tipo presencia/ausencia para combinarlo en modelos conjuntos y proyectarlos de la misma manera, tomando en cuenta la relación especie-medio ambiente (Thuiller *et al*., 2009).

Spthin es un paquete utilizado en R para el adelgazamiento de registros abordando los problemas relacionados con los sesgos de muestreo espacial eliminando la menor cantidad de registros y dejando en las bases de datos el número óptimo de registros para su procesamiento (Boria *et al.,* 2015*).*

Terra es un paquete utilizado en R que lleva a cabo el análisis de métodos para información espacial con puntos, polígonos, vectores, líneas y documentos tipo ráster; predice e interpola para generar modelos de predicción espacial de los datos (Hijmans *et al*., 2022); el siguiente paquete utilizado es Wallace, una herramienta ligada a la ecología y a las ciencias ambientales y se enfoca al modelado de nicho y distribución geográfica de especies (Kass *et al*., 2018).

FuzzySim permite usar una variedad de métodos para convertir datos de presencia/ausencia de múltiples especies en superficies continuas y difusas para realizar una comparativa de distribuciones y especies definiendo rangos geográficos putativos (Barbosa *et al*., 2015).

La edición de los mapas se llevó a cabo con el paquete informático ArcMap 10.8, obteniendo así los mapas necesarios para la descripción y la demostración gráfica de los resultados obtenidos para su posterior análisis y redacción.

Como métodos de análisis fueron utilizadas las variables climáticas obtenidas de Chelsa, se realizó el análisis tres veces por cada especie, seleccionando en cada una las variables que más afectan, para así tener resultados en cuanto a las variables que más afectaron el desarrollo y distribución de las especies.

Las variables bioclimáticas de Chelsa, las cuales se utilizaron en este proyecto de investigación son un conjunto de datos climáticos a escala global de muy alta resolución los cuales se refinan y actualizan de manera constante e incluyen mapas climáticos para varios periodos de tiempo (Karger *et al*., 2017).

V. DESCRIPCIÒN DE LAS ESPECIES

Las descripciones de las especies se basaron en el libro *Pinus pinaceae* de los autores Aljos Farjon y Brian T. Styles (1997).

5.1. *Pinus cembroides* Zucc.

5.1.1. Descripción morfológica.

Árbol pequeño de tronco corto, recto o torcido, de hasta 10-15 metros en altura y 60-80 cm de dap (diámetro a la altura del pecho).

Su copa es redondeada y abierta en individuos maduros de color verde oscuro, pálido a veces amarillento las hojas en grupos de 2 a 3 entre 2.5 o 10 cm de longitud, su corteza externa es de color café rojiza

Con conos solitarios, generalmente más anchos que largos, irregulares.

5.1.2. Hábitat.

Podemos encontrar de manera común esta especie en estribaciones y mesetas semiáridas, en una zona de vegetación entre semidesértica y pinares mesófilos. Altitudes desde los 1350 a 2800 msnm (metros sobre el nivel del mar).

Suelos generalmente muy delgados y rocosos.

5.1.3. Distribución

Es uno de los pinos con mayor distribución en México, forma masas puras en la sierra madre occidental.

Esta especie la podemos encontrar en Aguascalientes, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Sonora, Nuevo León, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas.

5.2. *Pinus discolor* D. K. Bailey *et* Hawksw.

5.2.1. Descripción morfológica

Crece en altura hasta los 15 m, normalmente con más de un tronco principal, de copa densa y redonda.

De 2 a 4 acículas por fascículo de 3 a 5 cm de longitud.

Conos color anaranjado-café en su madurez de 3.5 cm de ancho y 2 a 3 cm de largo cuando están cerrados.

5.2.2. Hábitat

Crece en laderas de cerros y lomeríos con pendientes secas y rocosas y al pie de las montañas entre los 1350 y los 2800 msnm, en climas secos hasta templados subhúmedos con precipitación de hasta 800 mm anuales.

5.2.3. Distribución

Esta especie está distribuida en los estados de Chihuahua, Durango, Nuevo México, San Luis Potosí, Sonora y Sur de Arizona.

5.3. *Pinus johannis* Rob.-Pass.

5.3.1. Descripción morfológica

Es un arbusto o árbol pequeño con acículas en fascículos de 3 raro de 2,3 o 5, con estomas únicamente en las dos caras blanquecinas internas.

Los conos en su madurez son color café de entre 4-5 cm de largo y 2-3 de ancho.

5.3.2. Hábitat

Se encuentra en altitudes moderadas a altas, de 1600 a 3000 msnm en condiciones climáticas frescas y secas.

5.3.3. Distribución

Se encuentra disperso en el noreste de México, en San Luis Potosí y en el suroeste de Estados Unidos.

5.4. *Pinus nelsonni* Shaw.

5.4.1. Descripción morfológica

Árbol pequeño de tronco recto, algunas veces con ramas desde abajo, ramas casi erectas o extendidas, de hasta 5 a 10 m de alto y 15 a 30 cm de dap.

Fascículos de 3 acículas, no se separan hasta poco antes de que el fascículo caiga, de 4 a 10 cm de longitud y 0.7 a 0.8 cm de ancho, conos cilíndricos, de 6-12 cm de largo, 4-5 cm de ancho, verdes al madurar a un marrón rojizo brillante, llevados hacia abajo del tallo sobre pedúnculos robustos curvados hacia abajo de 3-7 cm de largo y 7-10 mm de espesor.

5.4.2. Hábitat

Mesas semiáridas de la Sierra Madre Oriental, por encima de la vegetación desértica y por debajo del ¨Cinturón de pinos piñoneros¨, principalmente en afloramientos de piedra caliza con suelos pocos profundos

5.4.3. Distribución

Oeste de San Luis Potosí, Sur de Nuevo León y Tamaulipas.

5.5. *Pinus pinceana* Gordon.

5.5.1. Descripción morfológica

Arbusto grande o árbol pequeño, de tronco corto, frecuentemente se ramifica desde cerca del suelo, de 2 a 3 veces más ancho que alto, de 6 a 12 m de altura y de 20 a 30 cm de dap.

En fascículos de 3 y raramente de 4, 5 a 12 cm de longitud y 0.8 a 1.2 mm de ancho, conos colgantes sobre pedúnculos delgados de 1-3 cm de largo y 3 mm de espesor; cilíndrico, de 6-11 cm de largo, 4-5 cm de ancho, verde que madura naranja brillante y se abre a 5-7 cm de ancho.

5.5.2. Hábitat

Montañas semiáridas, frecuentemente en pendientes calcáreas y barrancas.

5.5.3. Distribución

Esta especie se encuentra dispersa en Coahuila, Hidalgo, Querétaro, Norte de Zacatecas y San Luis Potosí.

VI. RESULTADOS

Se obtuvieron 1548 registros para las cinco especies de pinos piñoneros que se distribuyen en el estado de San Luis Potosí en la base de datos sobre biodiversidad GBIF, *Pinus cembroides* fue la especie con más registros, representando el 60.4% del total (935) y la especie con menos registros fue *P. johannis* con el 2.7% (43). En el cuadro 4 es posible observar el número total de registros dentro del estado de San Luis Potosí y los utilizados en el modelo después de la calibración por especie.

Cuadro 4. Ocurrencias por especie en San Luis Potosí totales y calibradas.

Especie	Ocurrencias	Ocurrencias calibradas
P. johannis	43	16
P. discolor	142	58
P. nelsonii	154	26
P. pinceana	274	69
P. cembroides	935	373

Pinus cembroides es la especie con mayor distribución, 14 municipios presentaron ocurrencias calibradas, las cuales representan el 38.89% dr los 36 municipios con características idóneas para su distribución; por otro lado la especie con menor número de observaciones calibradas, *P. johannis* tres municipios presentaron ocurrencias calibradas, las cuales representan el 18.75% de los 16 municipios donde se podría distribuir esta especie de acuerdo a sus características climáticas (cuadro 5).

Cuadro 5. Diferencia porcentual entre municipios con ocurrencias y municipios con características idóneas para distribución potencial de especies.

Especie	Ocurrencias calibradas	Municipios con ocurrencias calibradas	Municipios con características climáticas idóneas	Porcentaje
P. johannis	16	3	16	18.75%
P. discolor	58	3	26	11.54%

Continuación cuadro 5.

Especie	Ocurrencias calibradas	Municipios con ocurrencias calibradas	Municipios con características climáticas idóneas	Porcentaje
P. nelsonii	26	2	23	8.70%
P. pinceana	69	3	31	9.68%
P. cembroides	373	14	36	38.89%

En el cuadro 5 se observa que el porcentaje de municipios con ocurrencias calibradas y el de los municipios con características climáticas para la distribución idónea de las especies es menor a 40% siendo el mayor porcentaje 38.89% de *P. cembroides* y el mínimo de 8.70 de *P. nelsonii*; promediando apenas un 17.51% respecto a los municipios con características idóneas entre las cinco especies y los municipios que tienen ocurrencias calibradas para los modelados.

Los resultados promedio obtenidos de la distribución según escenarios de cambio climático se pueden observar en el cuadro 6 ordenados de mayor a menor según su porcentaje promedio de cambio de hábitat adecuado.

Cuadro 6. Resultados promedio obtenidos de la distribución según escenarios de cambio climático.

Especie	Porcentaje promedio de cambio de hábitat adecuado
P. nelsonii	0.22%
P. cembroides	-57.20%
P. pinceana	-61.15%
P. discolor	-89.78%
P. johannis	-95.73%

Al finalizar el análisis y la comparación de resultados, se observa que la especie que tendrá mayor cambio de hábitat adecuado será *P. johannis* con una pérdida promedio de 7,384.88 km^2 siendo un 97.56% de su distribución potencial actual.

En el cuadro 7 se muestra el porcentaje promedio de aportación de las variables bioclimáticas de Chelsa que se tomaron como principales para el modelado de los escenarios de las cinco especies.

Cuadro 7. Porcentaje promedio de aportación de variables bioclimáticas en las cinco especies de pinos piñoneros.

Variable Bioclimática	Descripción	Porcentaje
bio1	Temperatura media anual	35.32%
bio3	Isotermancia	29.06%
bio15	Estacionalidad de la precipitación	25.70%
bio12	Cantidad de precipitación anual	21.78%
bio5	Temperatura media diaria máxima del aire del mes más cálido	21.16%
bio2	Rango de temperatura media diurna del aire	16.63%
bio19	Precipitación media mensual del trimestre más frío	11.76%
bio14	Precipitación del mes más seco	8.52%
bio6	Temperatura mínima media diaria del aire del mes más frío	7.26%
bio7	Rango anual de temperatura del aire	2.25%

6.1. *Pinus johannis.*

6.1.1. Registros de presencia

Se obtuvieron un total de 43 georreferencias, de las cuales se seleccionaron 16 por medio de la calibración de la especie *P. johannis* con las que se generaron los diferentes

modelos necesarios para el cálculo y representación de la distribución potencial y escenarios de cambio climático.

Las ocurrencias calibradas se encontraron en los estados de: Coahuila de Zaragoza, Zacatecas, Nuevo León y San Luis Potosí, en cuanto a municipios dentro de San Luis Potosí las ocurrencias se observan en Charcas y San Luis Potosí (Figura 1).

En el Cuadro 8 se describen las variables que más influencian el modelo de distribución potencial de la especie al analizar con los diferentes algoritmos (GLM, GBM, GAM, RF y Maxnet). De mayor a menor según su aportación al modelado de la distribución potencial son: bio1, bio15, bio12, bio2 y bio13.

Cuadro 8. Descripción de las variables climáticas con mayor aportación al modelo de *Pinus johannis.*

Variable Bioclimática	Descripción	Porcentaje
bio1	Temperatura media anual	86.47%
bio15	Estacionalidad de la precipitación	47.13%
bio12	Precipitación anual	17.29%
bio2	Rango de temperatura media diurna del aire	11.98%
bio3	Isotermancia	6.67%

6.1.2. Distribución potencial

La distribución potencial para *P. johannis* se ve representada por los colores rojo y amarillo (grado de idoneidad Alto y Bueno respectivamente) en ciertas regiones de los estados de Coahuila de Zaragoza, Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León, Querétaro de Arteaga, San Luis Potosí, Tamaulipas y Zacatecas que cuentan con las características bioclimáticas idóneas para que la especie se pueda distribuir (Figura 2).

Los municipios del estado de San Luis Potosí con alta idoneidad de distribución potencial de la especie son: Ahualulco, Armadillo de los Infante, Catorce, Cerro de San Pedro, Charcas, Guadalcázar, Mexquitic de Carmona, Moctezuma, San Luis Potosí, Santo Domingo, Venado, Villa de Arriaga, Villa de Guadalupe, Villa de Reyes, Villa Hidalgo y Zaragoza (figura 3).

6.1.3. Escenarios de cambio climático

Como resultados de los análisis y tomando como base los resultados obtenidos del procesamiento de los diferentes modelos climáticos globales (UKESM y GDFL) y los caminos o escenarios socioeconómicos compartidos SSP370 y SSP585 se encontró que para la especie *P.johannis* para el año 2070 habrá un pérdida en su distribución potencial actual según se muestra en el cuadro 9 y Figura 4.

Cuadro 9. Superficie de distribución para San Luis Potosí de *P. johannis* con los escenarios de cambio climático con proyección 2041-2070.

Escenarios	Presente (km^2)	Pérdida (km^2)	Sin cambios (km^2)	Ganancia (km^2)	Pérdida (%)	Ganancia (%)	Cambio de hábitat adecuado (%)
GFDL-ESM4_SSP370	7569.47	7033.06	536.41	0	92.91%	0	-92.91%
GFDL-ESM4_SSP585	7569.47	7220.13	349.34	0	95.38%	0	-95.38%
UKESM1-0-LLSSP370	7569.47	7348.73	220.73	0	97.08%	0	-97.08%
UKESM1-0-LLSSP585	7569.47	7384.88	184.59	0	97.56%	0	-97.56%
Promedio		7246.70	322.76		95.73%		-95.73%

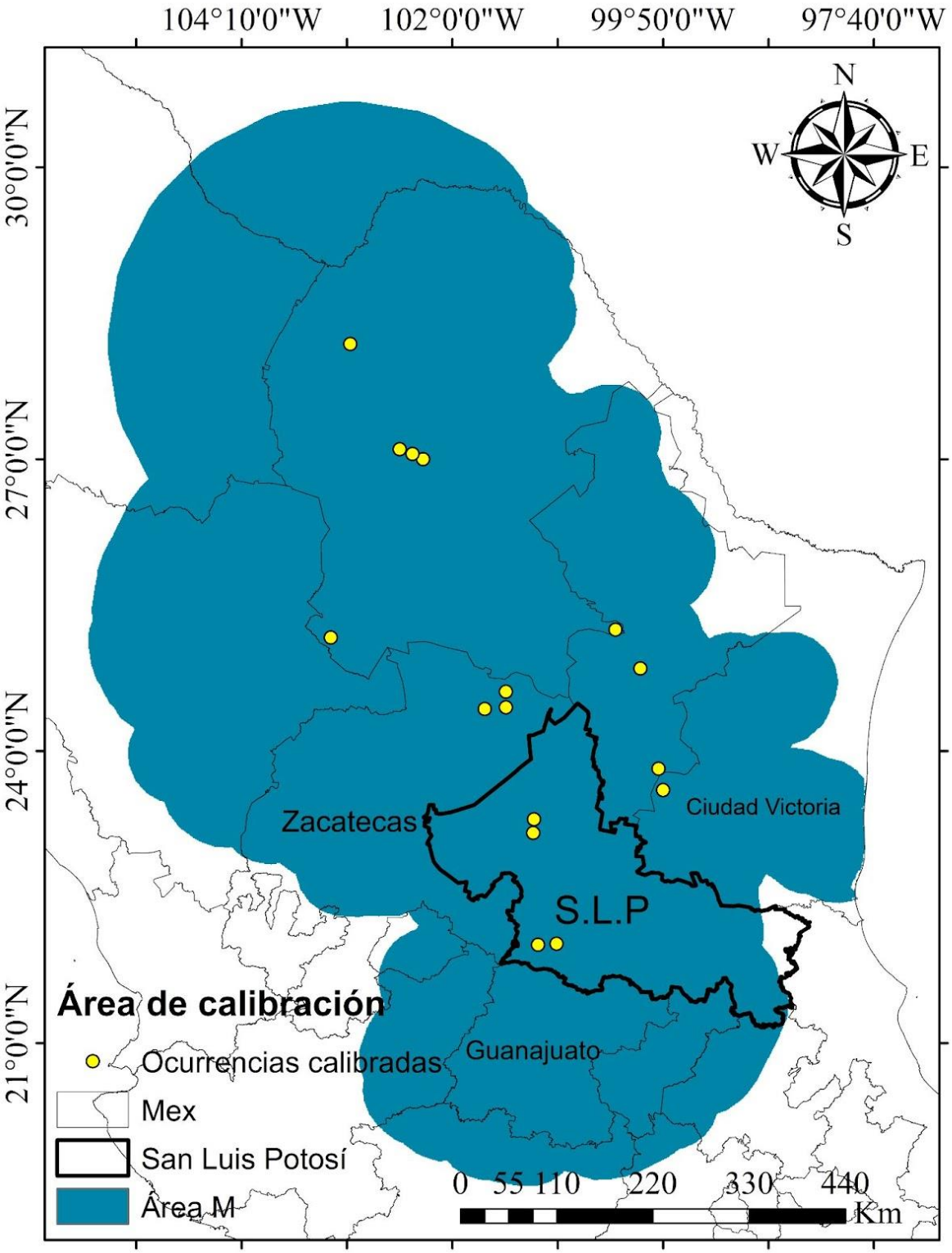

Figura 1. Mapa de registros seleccionados para el modelado de la distribución potencial de *P. johannis* en S.L.P. El área en azul representa el área de calibración.

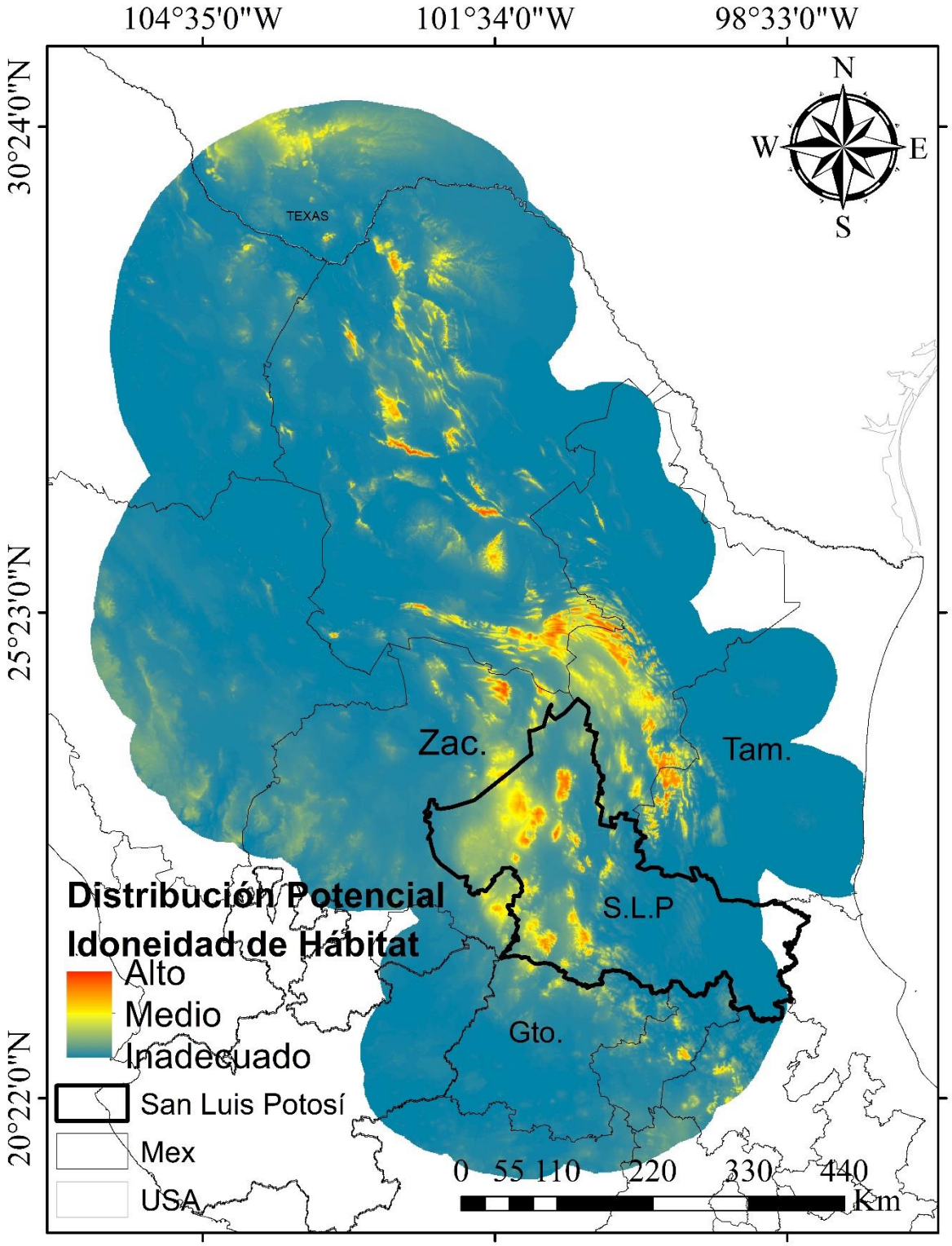

Figura 2. Distribución potencial de *P. johannis*.

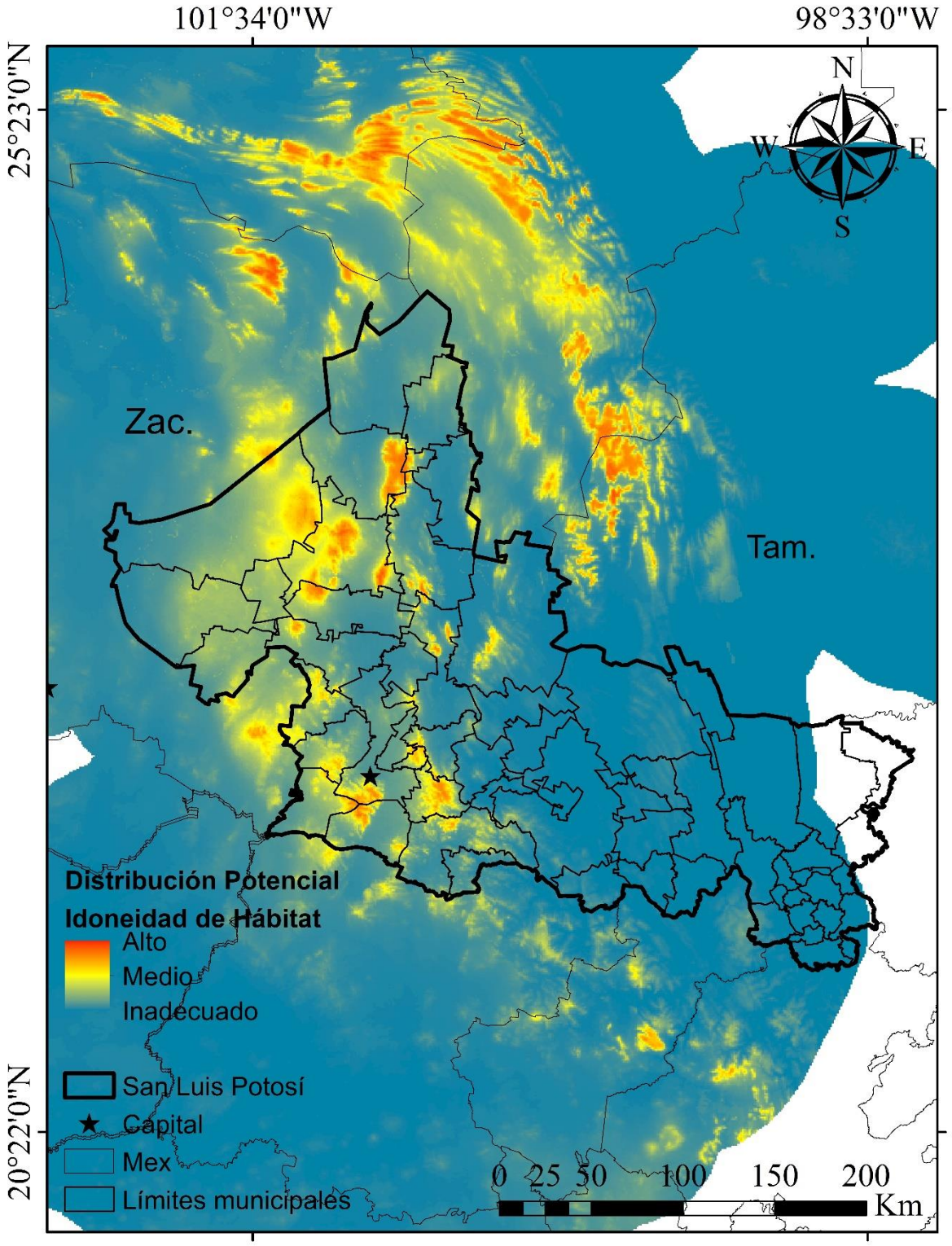

Figura 3. Distribución potencial de *P. johannis* en SLP.

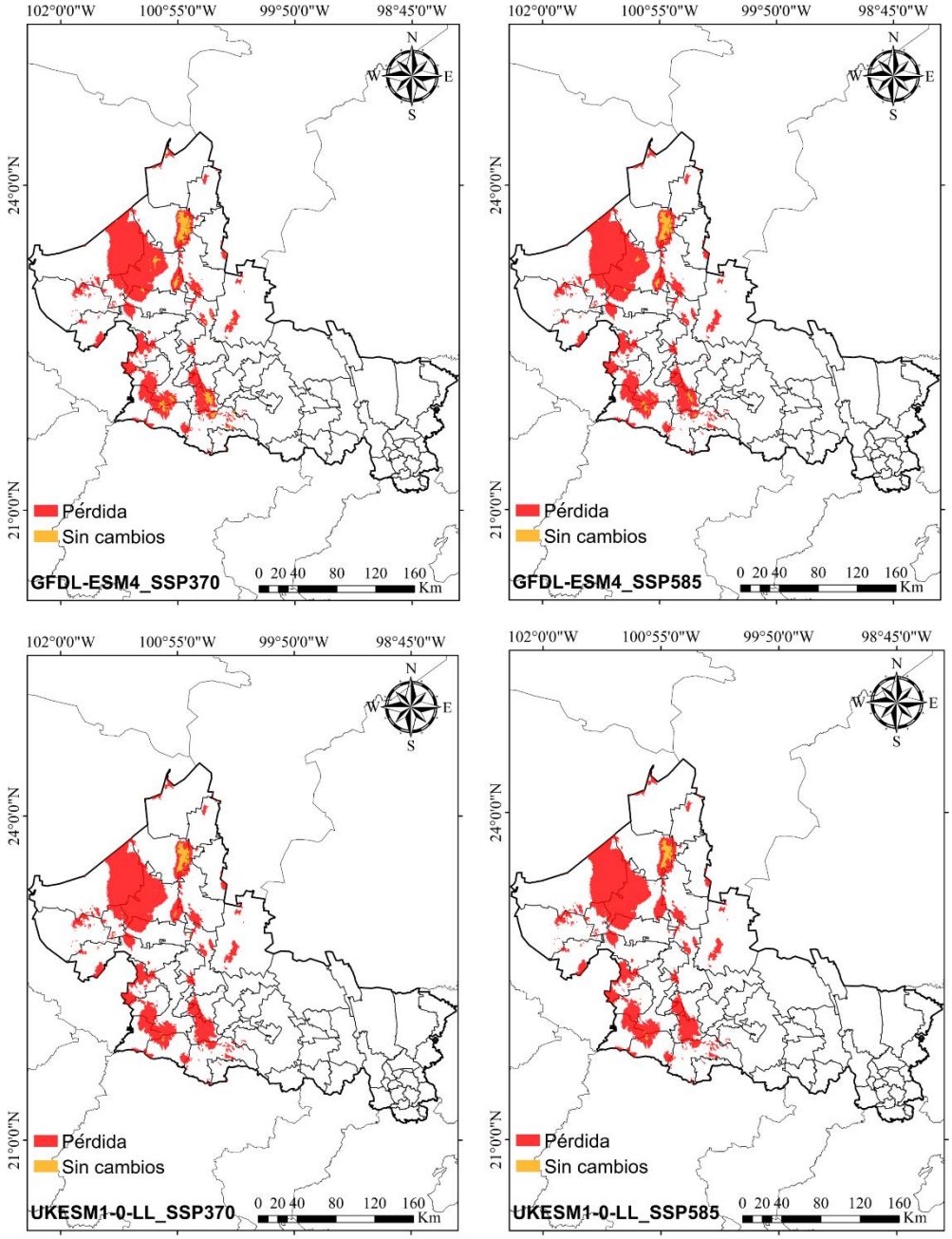

Figura 4. Escenarios de cambio climático GFDL-ESM4 y UKESM1 de la especie *P. johannis* en San Luis Potosí.

6.2. *Pinus discolor.*

6.2.1. Registros de presencia

Se obtuvieron un total de 142 georreferencias, de las cuales se seleccionaron 58 por medio de la calibración de la especie *P. discolor* con las que se generaron los diferentes modelos de la distribución potencial y escenarios de cambio climático.

Las ocurrencias calibradas se encontraron en los estados de: Chihuahua, Coahuila de Zaragoza, Durango, Nuevo León, San Luis Potosí, Sonora y Zacatecas dentro de México y en USA se encuentran en Arizona y Nuevo México (Figura 5). En cuanto a municipios dentro de San Luis Potosí las ocurrencias se observan en Villa de Arriaga, Villa de Reyes y San Luis Potosí.

En el cuadro 10 se describen las variables que más influencian el modelo de distribución potencial de la especie al analizar con los diferentes algoritmos (GLM, GBM, GAM, RF y Maxnet). De mayor a menor según su aportación al modelado de la distribución potencial son: bio1, bio2, bio3, bio5, bio12, bio14, bio15 y bio19.

Cuadro 10. Descripción de las variables climáticas con mayor aportación al modelo de *Pinus discolor.*

Variable bioclimática	Descripción	Porcentaje
bio5	temperatura media diaria máxima del aire del mes más cálido	50.42%
bio19	precipitación media mensual del trimestre más frío	41.00%
bio1	Temperatura media anual	36.33%
bio12	Precipitación anual	37.21%
bio15	Estacionalidad de la precipitación	30.51%
bio14	cantidad de precipitación del mes más seco	26.78%
bio3	Isotermancia	34.47%
bio2	rango de temperatura media diurna del aire	13.22%

6.2.2. Distribución potencial

La distribución potencial para *P. discolor* se ve representada por los colores rojo y amarillo (grado de idoneidad Alto y Bueno respectivamente) en ciertas regiones de los estados de Chihuahua, Coahuila de Zaragoza, Durango, Estado de México, Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León, Querétaro de Arteaga, San Luis Potosí, Sonora, Tamaulipas y Zacatecas que cuentan con las características bioclimáticas idóneas para que la especie se pueda distribuir (Figura 5).

Los municipios del estado de San Luis Potosí con alta idoneidad de distribución potencial de la especie son: Ahualulco, Armadillo de los Infante, Catorce, Cerro de San Pedro, Charcas, Ciudad del maíz, Guadalcázar, Matehuala, Mexquitic de Carmona, Moctezuma, Rioverde, Salinas, San Ciro de Acosta, San Luis Potosí, San Nicolás Tolentino, Santo Domingo, Soledad de Graciano Sánchez, Tierra nueva, Venado, Villa de Guadalupe, Villa de Arista, Villa de Arriaga, Villa de la Paz, Villa de Ramos, Villa Hidalgo y Zaragoza.

6.2.3. Escenarios de cambio climático

Como resultados de los análisis y tomando como base los resultados obtenidos del procesamiento de los diferentes modelos climáticos globales (UKESM y GDFL) y los caminos o escenarios socioeconómicos compartidos SSP370 y SSP585 se encontró que para la especie *P.discolor* para el año 2070 habrá una pérdida en su distribución potencial actual según se muestra en el Cuadro 11 y se pueden observar los mapas en la Figura 8.

Cuadro 11. Superficie de distribución para San Luis Potosí de *P. discolor* con los escenarios de cambio climático con proyección 2041-2070.

Escenarios	Presente (km^2)	Pérdida (km^2)	Sin cambios (km^2)	Ganancia (km^2)	Pérdida (%)	Ganancia (%)	Cambio de hábitat adecuado (%)
GFDL-ESM4_SSP370	9.512,44	8438.46	1073.98	206.03	88.71%	2,17%	-86.54%
GFDL-ESM4_SSP585	9.512,43	8555.51	956.92	162.35	89.94%	1.71%	-88.23%
UKESM1-0-LLSSP370	9.512,44	9176.11	336.33	871.03	96.46%	9.16%	-87.31%

UKESM1-0-LLSSP585	9.512,44	9349.89	162.55	119.82	98.29%	1.26%	-97.03%
Promedio	**-**	**8879.992**	**632.445**	**339.807**	**93.35%**	**3.57%**	**-89.78%**

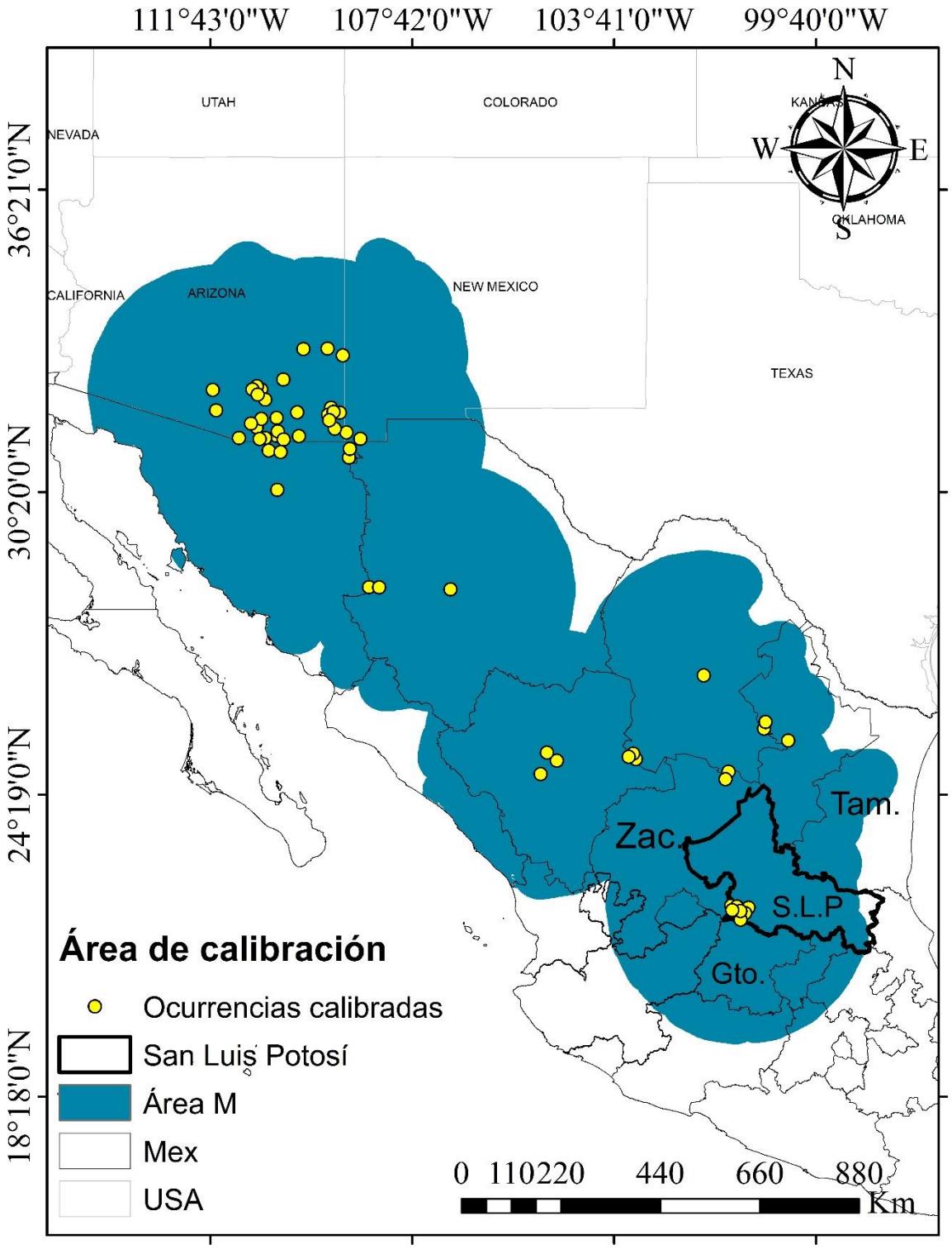

Figura 5. Mapa de registros seleccionados para el modelado de la distribución potencial de *P. discolor* en S.L.P. El área en azul representa el área de calibración.

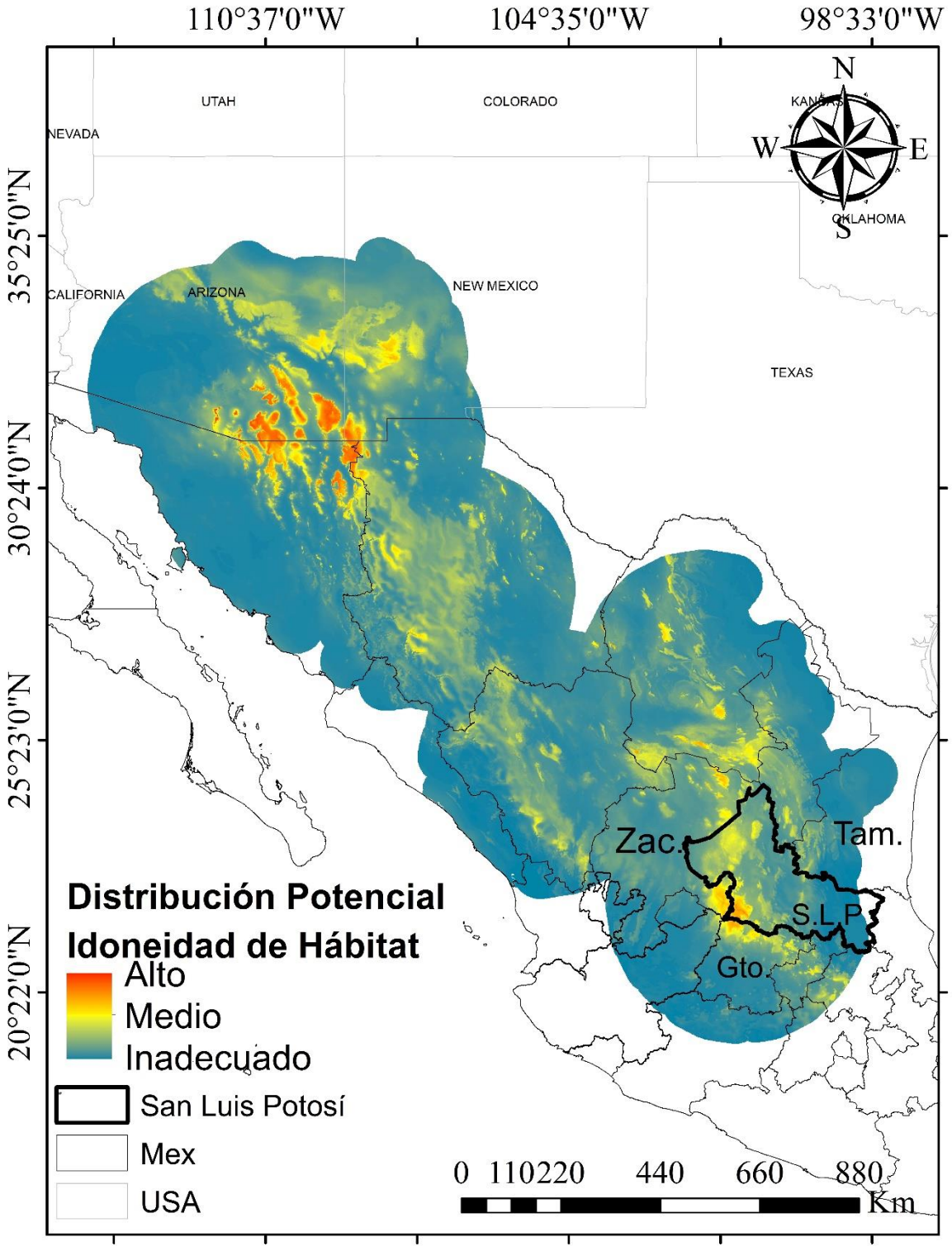

Figura 6. Distribución potencial de *P. discolor*.

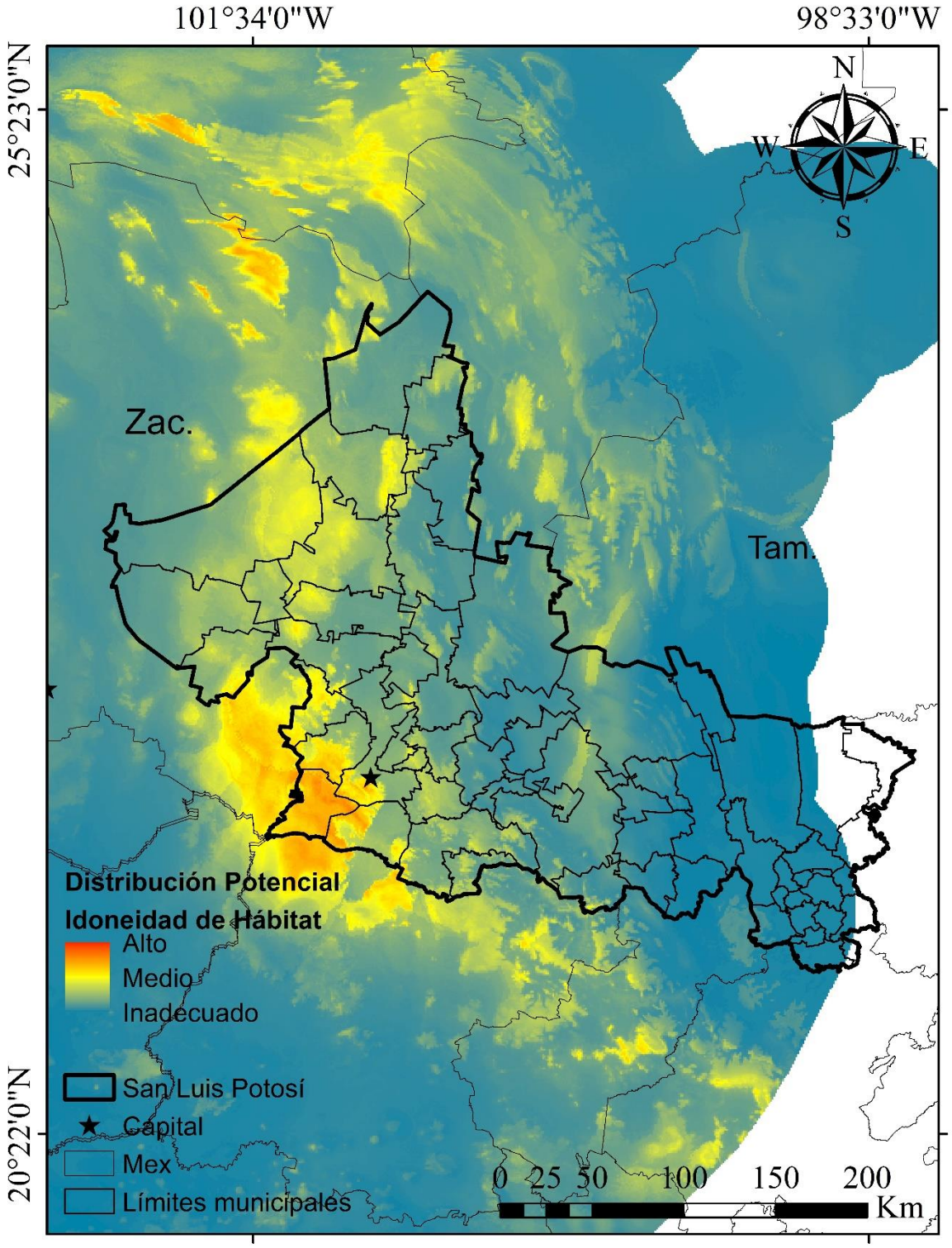

Figura 7. Distribución potencial de *P. discolor* en SLP.

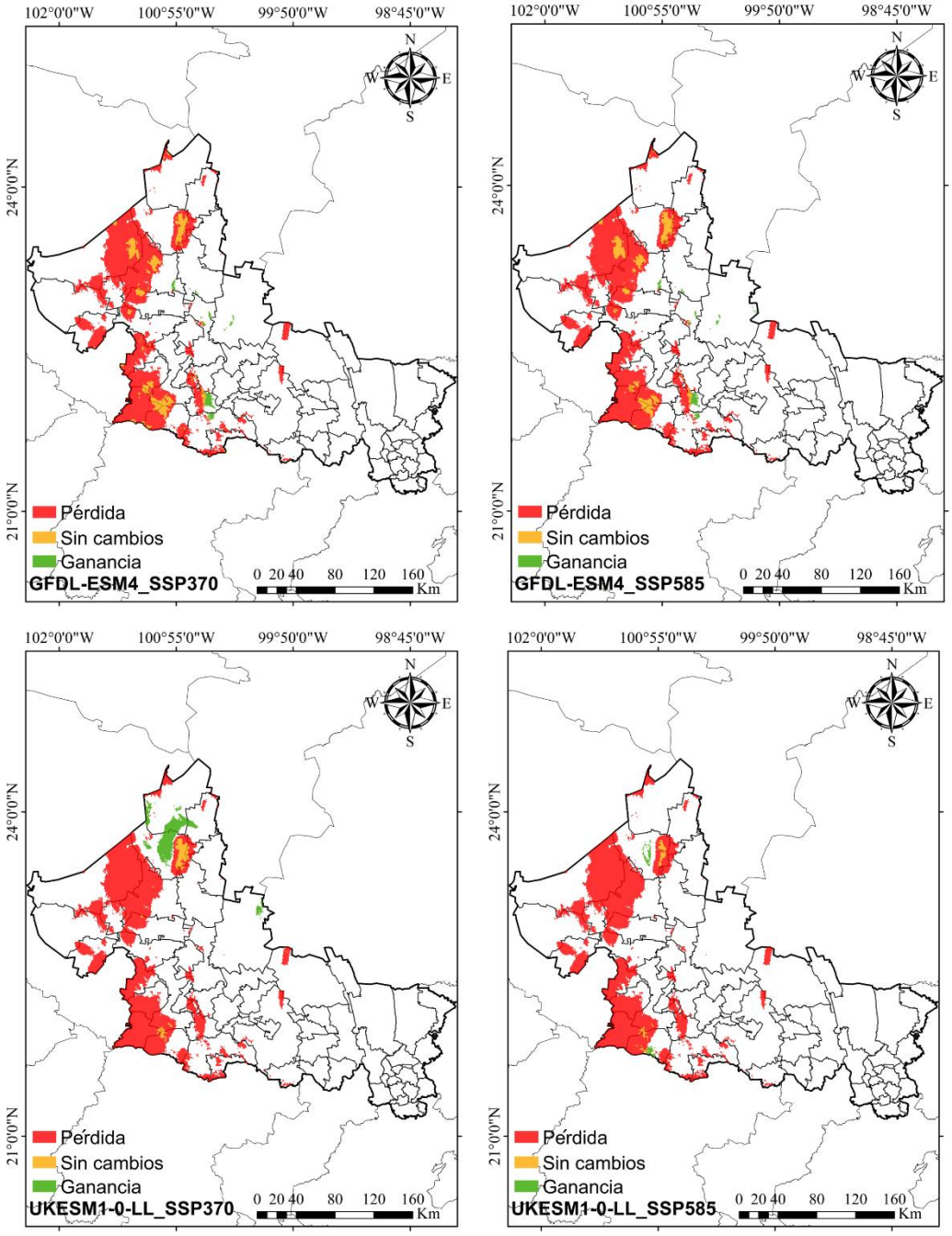

Figura 8. Escenarios de cambio climático GFDL-ESM4 y UKESM1 de la especie *P. discolor* en San Luis Potosí.

6.3. *Pinus nelsonii.*

6.3.1. Registros de presencia

Se obtuvieron un total de 154 georreferencias, de las cuales se seleccionaron 26 por medio de la calibración para la especie *P. nelsonii* con las que se generaron los diferentes modelos necesarios para el cálculo y representación de la distribución potencial y escenarios de cambio climático.

Las ocurrencias calibradas se encontraron en los estados de: Coahuila de Zaragoza, Estado de México, Nuevo León, San Luis Potosí y Tamaulipas (Figura 9). En cuanto a municipios dentro de San Luis Potosí las ocurrencias se observan en Villa Hidalgo y Guadalcázar.

En el cuadro 12 se describen las variables que más influencian el modelo de distribución potencial de la especie al analizar con los diferentes algoritmos (GLM, GBM, GAM, RF y Maxnet). De mayor a menor según su aportación al modelado de la distribución potencial son: bio1, bio2, bio3, bio7, bio12, bio14 y bio15.

Cuadro 12. Descripción de las variables climáticas con mayor aportación al modelo de *Pinus nelsonii.*

Variable Bioclimática	Descripción	Promedio
bio1	Temperatura media anual	9.17%
bio2	Rango de temperatura media diurna del aire	19.45%
bio3	Isotermancia	34.63%
bio7	Rango anual de temperatura del aire	11,26%
bio12	Precipitación anual	25.02%
bio14	Precipitación del mes más seco	15.84%

Continuación cuadro 12.

Variable Bioclimática	Descripción	Promedio
bio15	Estacionalidad de la precipitación	66.98%

6.3.2. Distribución potencial

La distribución potencial para *P. nelsonii* se ve representada por los colores rojo y amarillo (grado de idoneidad Alto y Bueno respectivamente) en ciertas regiones de los estados de Coahuila de Zaragoza, Hidalgo, Nuevo León, Puebla, Querétaro de Arteaga, San Luis Potosí, Tamaulipas, Tlaxcala y Zacatecas que cuentan con las características bioclimáticas idóneas para que la especie se pueda distribuir (Figura 10).

Los municipios del estado de San Luis Potosí con alta idoneidad de distribución potencial de la especie son: Ahualulco, Armadillo de los Infantes, Catorce, Cedral, Cerritos, Charcas, Ciudad del Maíz, Guadalcázar, Matehuala, Mexquitic de Carmona, Moctezuma, Rioverde, San Luis Potosí, San Nicolás Tolentino, Santa María del Río, Santo Domingo, Tierra Nueva, Venado, Villa de Guadalupe, Villa de la Paz, Villa Hidalgo, Villa Juárez y Zaragoza (Figura 11).

6.3.3. Escenarios de cambio climático

Como resultados de los análisis y tomando como base los resultados obtenidos del procesamiento de los diferentes modelos climáticos globales (UKESM y GDFL) y los caminos o escenarios socioeconómicos compartidos SSP370 y SSP585 se encontró que para la especie *P. nelsonii* para el año 2070 habrá una pérdida en su distribución potencial actual según se muestra en el cuadro 13 y la Figura 12

Cuadro 13. Superficie de distribución para San Luis Potosí de *P. nelsonii* con los escenarios de cambio climático con proyección 2041-2070.

Escenarios	Presente (km^2)	Pérdida (km^2)	Sin cambios (km^2)	Ganancia (km^2)	Pérdida (%)	Ganancia (%)	Cambio de hábitat adecuado (%)
GFDL-ESM4_SSP370	16095.36	6444.24	9651.12	1134	40.04%	7.05%	-32.99%
GFDL-ESM4_SSP585	16095.36	3107.56	12987.8	5109,98	19.31%	31.75%	12.44%

Continuación Cuadro 13.

Escenarios	Presente (km^2)	Pérdida (km^2)	Sin cambios (km^2)	Ganancia (km^2)	Pérdida (%)	Ganancia (%)	Cambio de hábitat adecuado (%)
UKESM1-0-LLSSP370	16095.36	8195.71	7899.65	1218.29	50.92%	7.57%	-43.35%
UKESM1-0-LLSSP585	16095.36	1395.53	14699.83	11823.02	8.67%	73.46%	64.79%
Promedio		**4785.76**	**11309.6**	**4821.3225**	**29.73%**	**29.95%**	**0.22%**

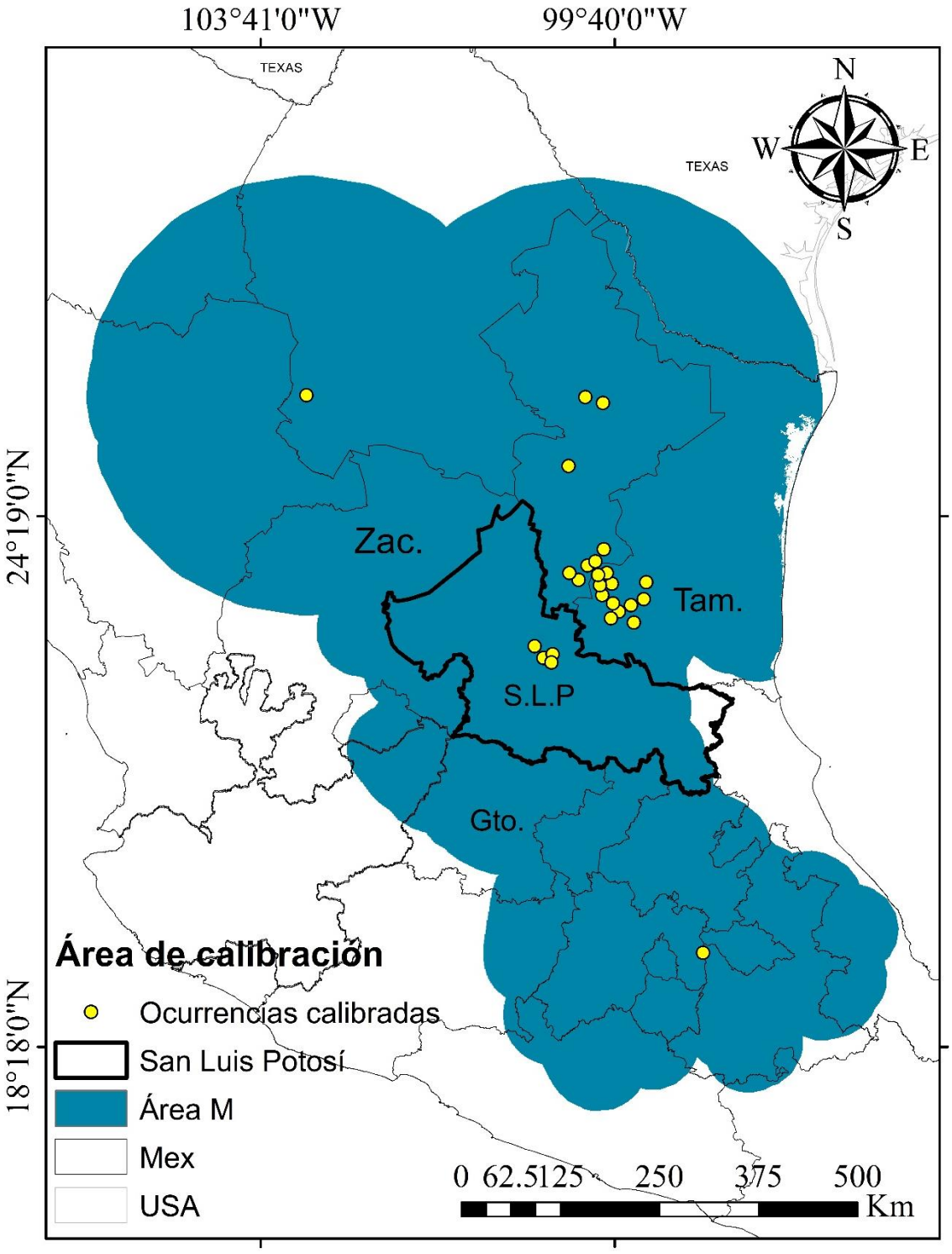

Figura 9. Mapa de registros seleccionados para el modelado de la distribución potencial de *P. nelsonii* en S.L.P. El área en azul representa el área de calibración.

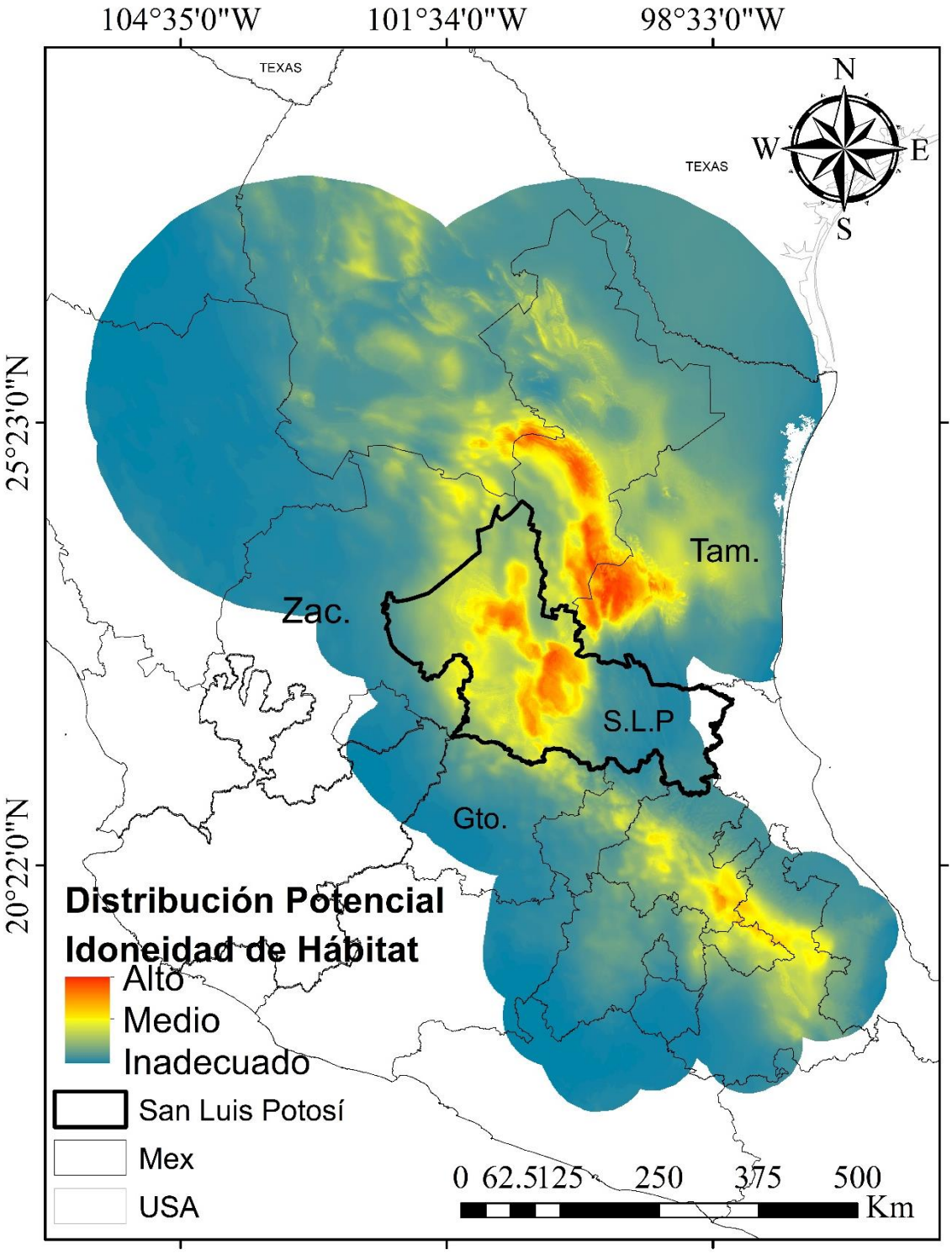

Figura 10. Distribución potencial *P. nelsonii*.

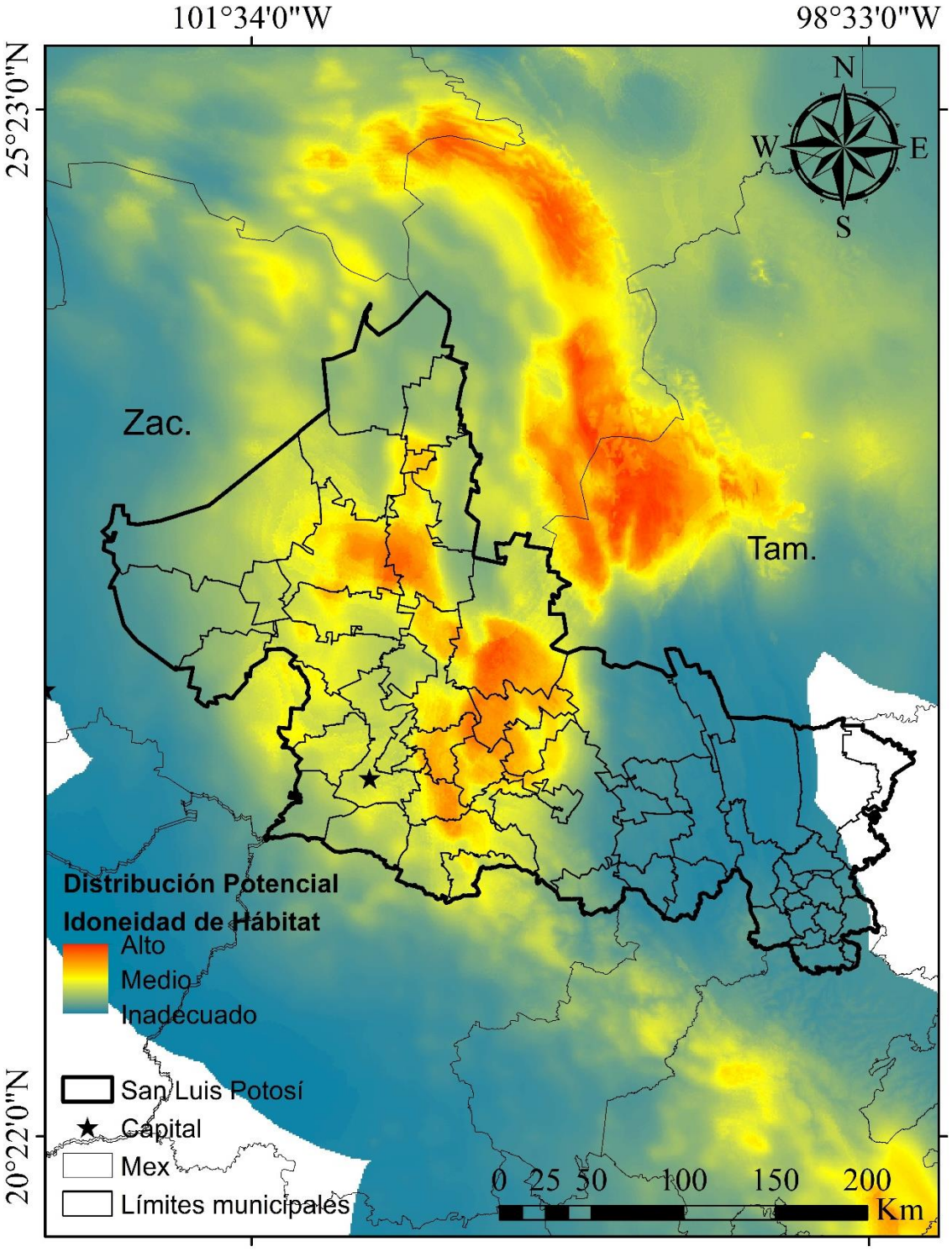

Figura 11. Distribución potencial de *P. nelsonii* en SLP.

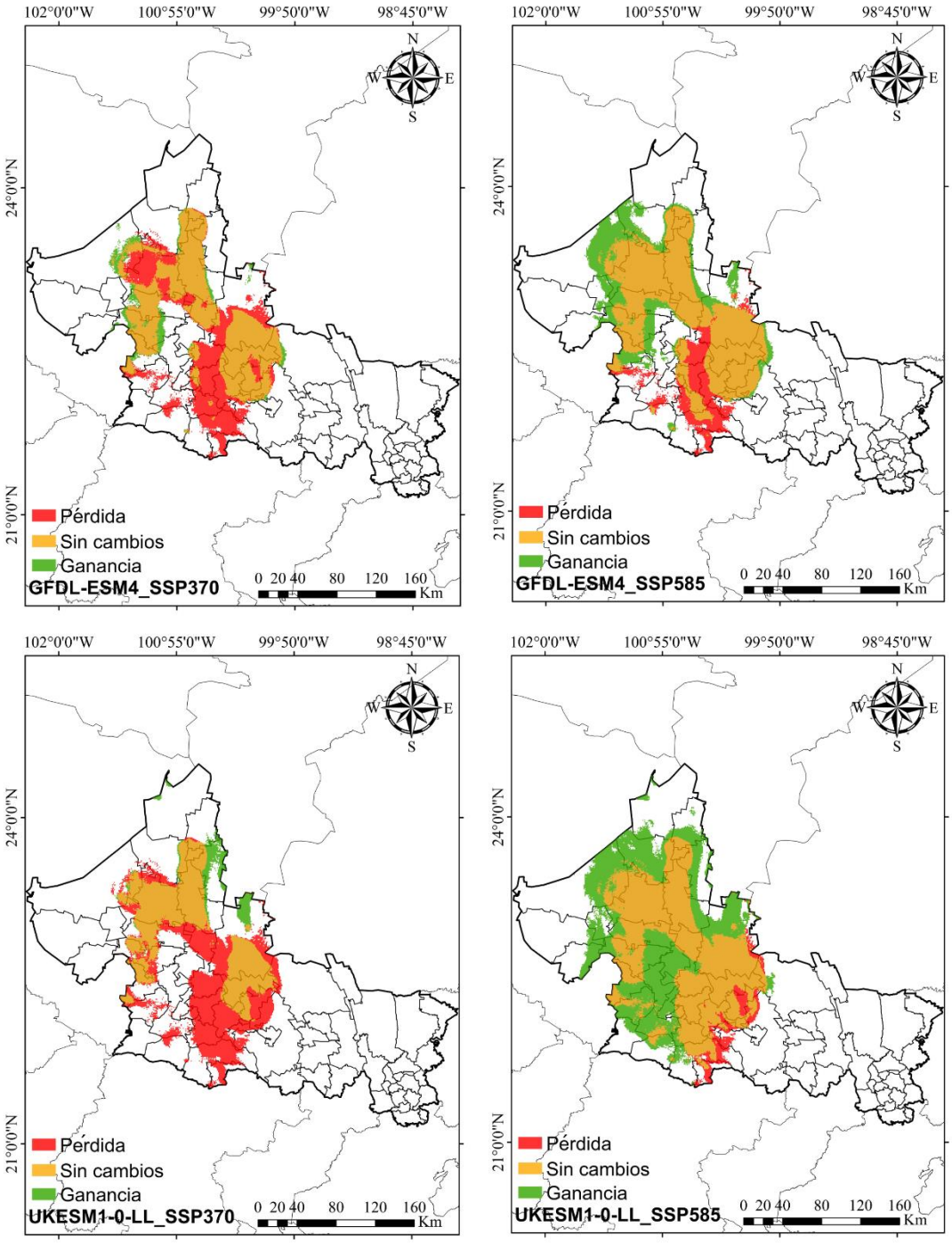

Figura 12. Escenarios de cambio climático GFDL-ESM4 y UKESM1 de la especie *P. nelsonii* en San Luis Potosí.

6.4. *Pinus pinceana.*

6.4.1. Registros de presencia

Se obtuvieron un total de 274 georreferencias, de las cuales se seleccionaron 69 por medio de la calibración para la especie *P. pinceana* con las que se generaron los diferentes modelos necesarios para el cálculo y representación de la distribución potencial y escenarios de cambio climático.

Las ocurrencias calibradas se encontraron en los estados de: Coahuila de Zaragoza, Hidalgo, Querétaro de Arteaga, San Luis Potosí y Zacatecas Figura 13. En cuanto a municipios dentro de San Luis Potosí las ocurrencias se observan en Cedral, Guadalcázar, Rioverde y Villa Hidalgo.

En el cuadro 14 se describen las variables que más influencian el modelo de distribución potencial de la especie al analizar con los diferentes algoritmos (GLM, GBM, GAM, RF y Maxnet). De mayor a menor según su aportación al modelado de la distribución potencial son: bio3, bio15, bio6, bio2 y bio1.

Cuadro 14. Descripción de las variables climáticas con mayor aportación al modelo de *Pinus pinceana.*

Variable Bioclimática	Descripción	Porcentajes
bio3	Isotermancia	57.51%
bio15	Estacionalidad de la precipitación	39.57%
bio6	Temperatura mínima media diaria del aire del mes más frío	36.30%
bio2	Rango de temperatura media diurna del aire	38.49%
bio1	Temperatura media anual	22.20%

6.4.2. Distribución potencial

La distribución potencial para *P. pinceana* se ve representada por los colores rojo y amarillo (grado de idoneidad Alto y Bueno respectivamente) en ciertas regiones de los estados de Chihuahua, Coahuila de Zaragoza, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León, Puebla, Querétaro de Arteaga, San Luis Potosí, Tamaulipas, Veracruz y Zacatecas que cuentan con las características bioclimáticas idóneas para que la especie se pueda distribuir (Figura 14).

Los municipios del estado de San Luis Potosí con alta idoneidad de distribución potencial de la especie son: Ahualulco, Armadillo de los Infante, Catorce, Cedral, Cerritos, Charcas, Ciudad Fernández, Guadalcázar, Matehuala, Mexquitic de Carmona, Moctezuma, Rioverde, Salinas, San Ciro de Acosta, San Luis Potosí, San Nicolas Tolentino, Santa María del Río, Santo Domingo, Soledad de Graciano Sánchez, Tierra Nueva, Vanegas, Venado, Villa de Arista, Villa de Arriaga, Villa de Guadalupe, Villa de Ramos, Villa de Reyes, Villa Hidalgo, Villa Juárez, Villa de la Paz y Zaragoza (Figura 15).

6.4.3. Escenarios de cambio climático

Como resultados de los análisis y tomando como base los resultados obtenidos del procesamiento de los diferentes modelos climáticos globales (UKESM y GDFL) y los caminos o escenarios socioeconómicos compartidos SSP370 y SSP585 se encontró que para la especie *P. pinceana* para el año 2070 habrá una pérdida en su distribución potencial actual según se muestra en el cuadro 15 y en la Figura 16

Cuadro 15. Superficie de distribución para San Luis Potosí de *P. pinceana* con los escenarios de cambio climático con proyección 2041-2070.

Escenarios	Presente (km^2)	Pérdida (km^2)	Sin cambios (km^2)	Ganancia (km^2)	Pérdida (%)	Ganancia (%)	Cambio de hábitat adecuado (%)
GFDL-ESM4_SSP370	19098	17107.82	1990.18	995.47	89.58%	5.21%	-84.37%
GFDL-ESM4_SSP585	19098	18079.83	1018.17	166.57	94.67%	0.87%	-93.80%
UKESM1-0-LLSSP370	19098	8189.29	10908.7	2026.25	42.88%	10.61%	-32.27%
UKESM1-0-LLSSP585	19098	10925.79	8172.21	4400.35	57.21%	23.04%	-34.17%

Continuacion cuadro 15.

Escenarios	Presente (km2)	Pérdida (km2)	Sin cambios (km2)	Ganancia (km2)	Pérdida (%)	Ganancia (%)	Cambio de hábitat adecuado (%)
Promedio		**13575.68**	**5.522.315**	**1897.16**	**71.08%**	**9.93%**	**-61.15%**

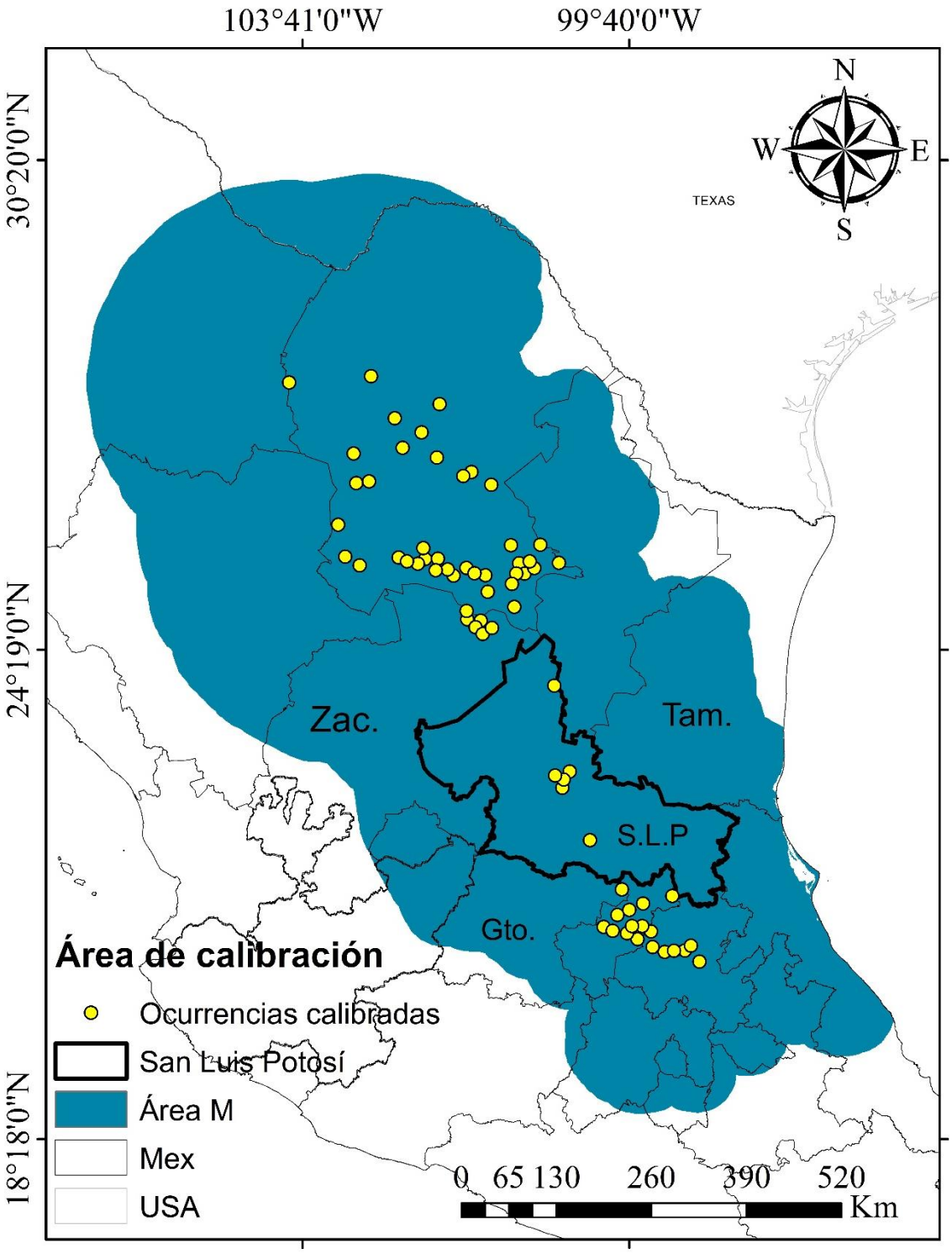

Figura 13. Mapa de registros seleccionados para el modelado de la distribución potencial de *P. pinceana* en S.L.P. el área en azul representa el área de calibración.

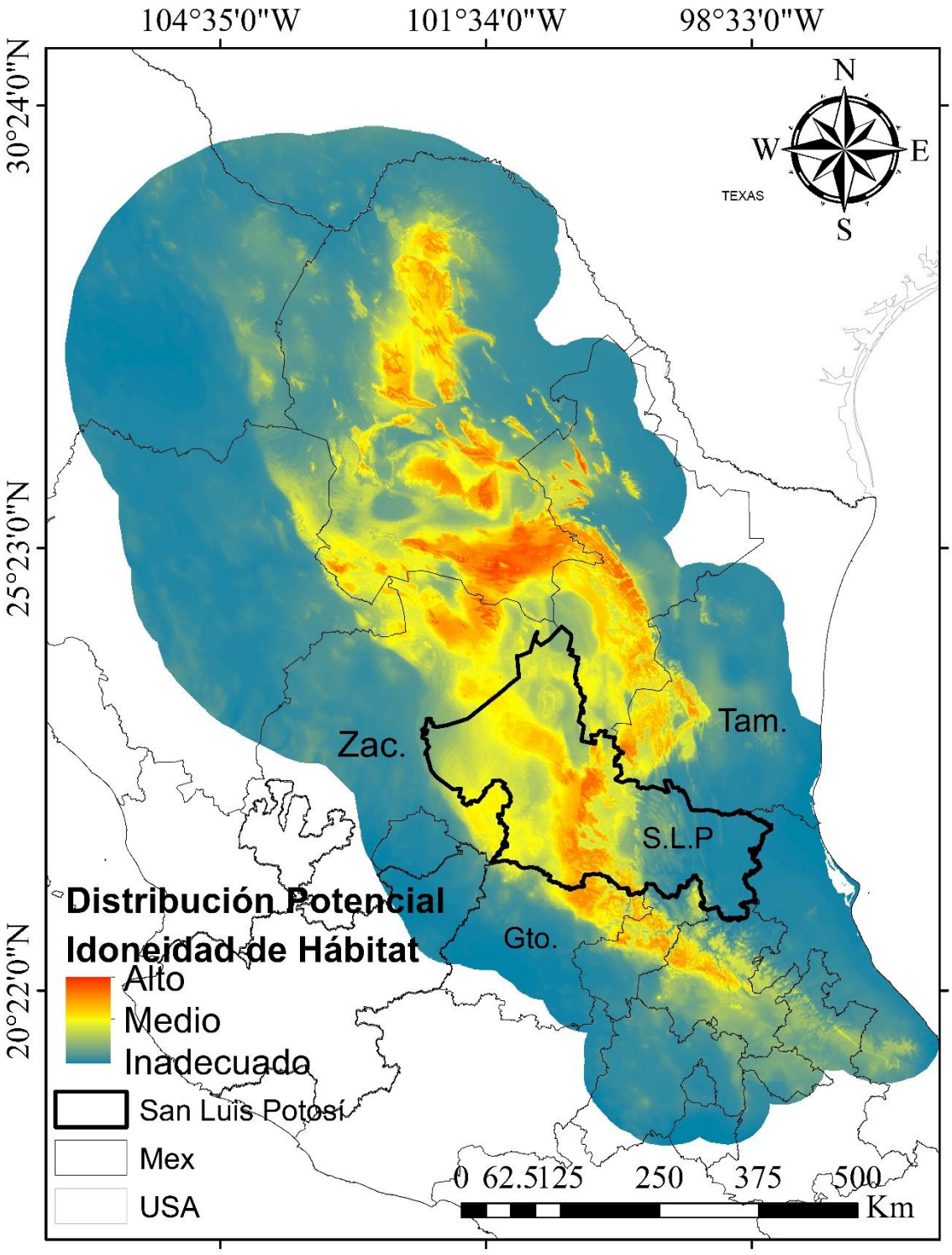

Figura 14. Distribución potencial de *P. pinceana.*

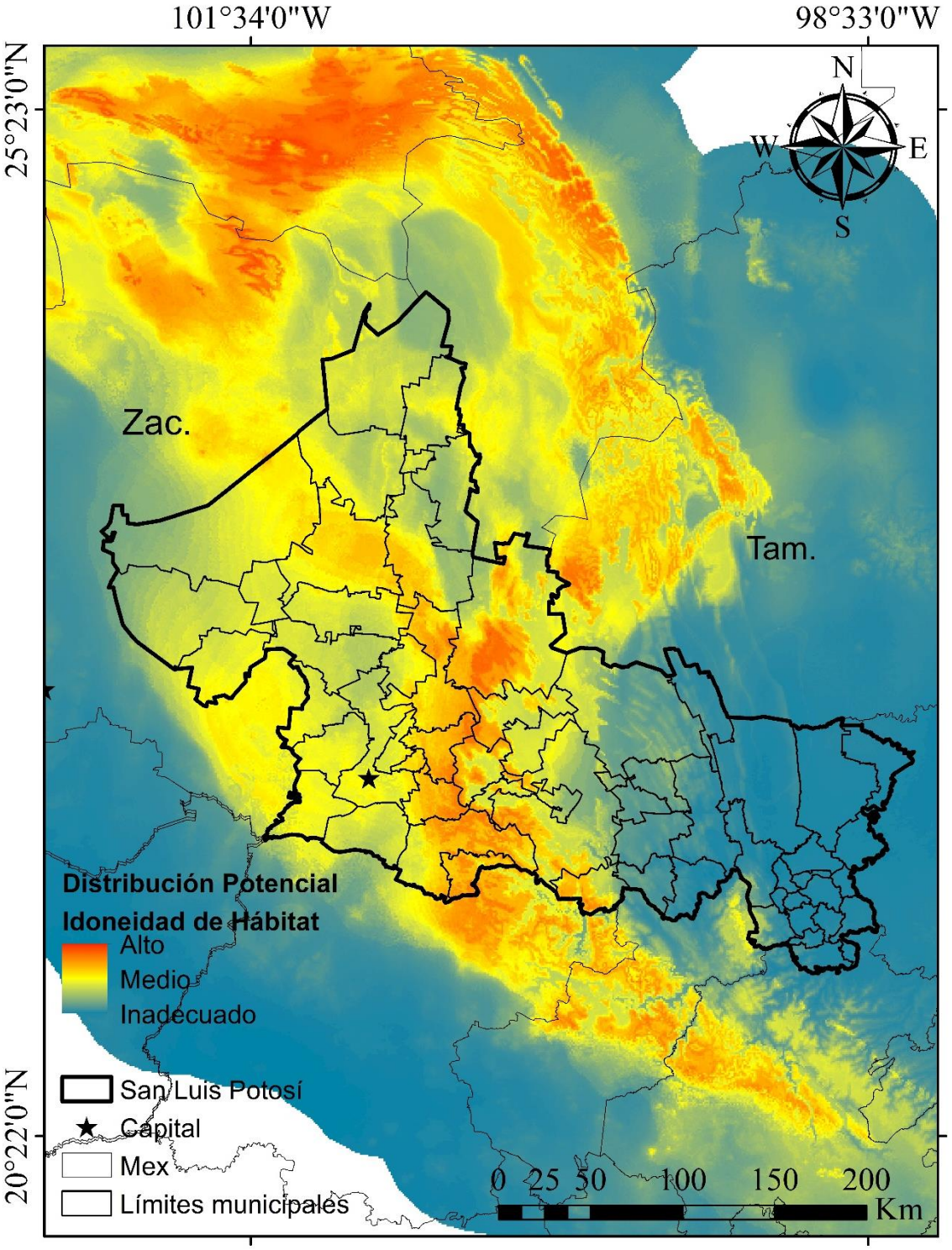

Figura 15. Distribución potencial de *P. pinceana* en San Luis Potosí.

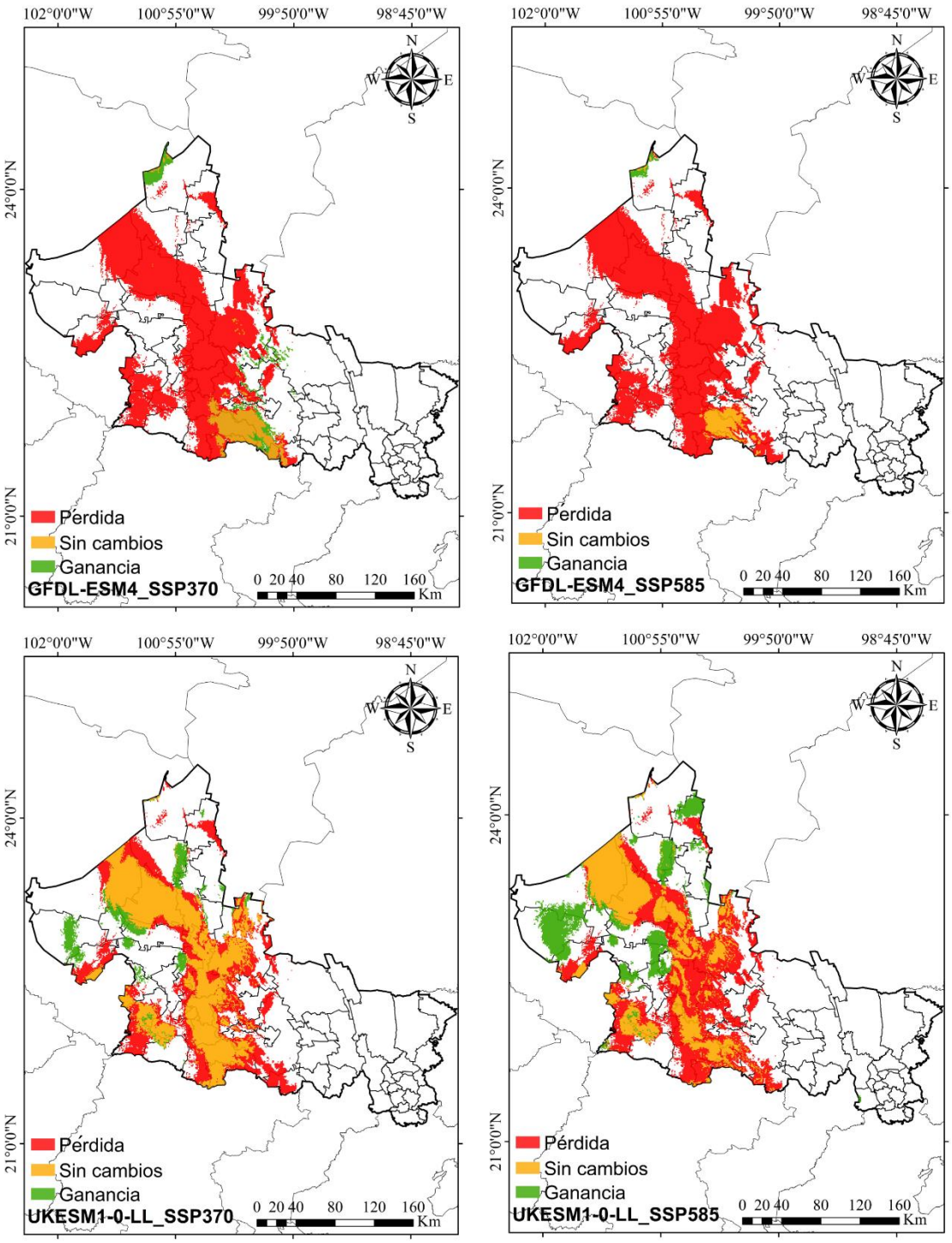

Figura 16. Escenarios de cambio climático GFDL-ESM4 y UKESM1 de la especie *P. pinceana* en San Luis Potosí.

6.5. *Pinus cembroides*

6.5.1. Registros de presencia

Se obtuvieron un total de 935 georreferencias, de las cuales se seleccionaron 373 medio de la calibración para la especie *P. cembroides* con las que se generaron los diferentes modelos necesarios para el cálculo y representación de la distribución potencial y escenarios de cambio climático.

Las ocurrencias calibradas se encontraron en los estados de: Aguascalientes, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Durango, Estado de México, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Nuevo León, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Sonora, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz, Zacatecas y en Estados Unidos se encontraron en Arizona, Nuevo México y Texas (Figura 17). En cuanto a municipios dentro de San Luis Potosí las ocurrencias se observan en Catorce, Cerro de San Pedro, Guadalcázar, Mexquitic de Carmona, Salinas, San Luis Potosí, Santa María del Río, Villa de Arriaga, Villa de Guadalupe, Villa de Reyes, Villa Hidalgo, Villa Juárez y Zaragoza.

En el cuadro 16 se describen las variables que más influencian el modelo de distribución potencial de la especie al analizar con los diferentes algoritmos (GLM, GBM, GAM, RF y Maxnet). De mayor a menor según su aportación al modelado de la distribución potencial son: bio5, bio12, bio1, bio19, bio3 y bio15.

Cuadro 16. Descripción de las variables climáticas con mayor aportación al modelo de *Pinus cembroides.*

Variable Bioclimática	Descripción	Porcentaje
bio5	Temperatura media diaria máxima del aire del mes más cálido	55,39%
bio12	Cantidad de precipitación anual	29,38%
bio1	Temperatura media anual	22,44%
bio19	Precipitación media mensual del trimestre más frío	17,79%
bio3	Isotermancia	12,00%
bio15	Estacionalidad de la precipitación	11,28%

6.5.2. Distribución potencial

La distribución potencial para *P. cembroides* se ve representada por los colores rojo y amarillo (grado de idoneidad Alto y Bueno respectivamente) en ciertas regiones de los estados de Baja California Sur, Coahuila de Zaragoza, Hidalgo, Nuevo León, Puebla, Querétaro de Arteaga, San Luis Potosí, Tamaulipas, Tlaxcala y Zacatecas que cuentan con las características bioclimáticas idóneas para que la especie se pueda distribuir (Figura 18).

Los municipios del estado de San Luis Potosí con alta idoneidad de distribución potencial de la especie son: Ahualulco, Alaquines, Armadillo de los Infante, Cárdenas, Catorce, Cedral, Cerritos, Charcas, Ciudad del Maíz, Ciudad Fernández, Guadalcázar, Lagunillas, Matehuala, Mexquitic de Carmona, Moctezuma, Rayón, Rioverde, Salinas, San Ciro de Acosta, San Luis Potosí, San Nicolas Tolentino, Santa María del Río, Santo Domingo, Soledad de Graciano Sánchez, Tierra Nueva, Vanegas, Venado, Villa de Arista, Villa de Arriaga, Villa de Guadalupe, Villa de la Paz, Villa de Ramos, Villa de Reyes, Villa Hidalgo, Villa Juárez y Zaragoza (Figura 19).

6.5.3. Escenarios de cambio climático

Como resultados de los análisis y tomando como base los resultados obtenidos del procesamiento de los diferentes modelos climáticos globales (UKESM y GDFL) y los caminos o escenarios socioeconómicos compartidos SSP370 y SSP585 se encontró que para la especie *P. cembroides* para el año 2070 habrá una pérdida en su distribución potencial actual según se muestra en el cuadro 17 y la Figura 20.

Cuadro 17. Superficie de distribución para San Luis Potosí de *P. cembroides* con los escenarios de cambio climático con proyección 2041-2070.

Escenarios	Presente (km)	Pérdida (km)	Sin cambios (km)	Ganancia (km)	Pérdida (%)	Ganancia (%)	Cambio de hábitat adecuado (%)
GFDL-ESM4_SSP370	41.605,96	25439,76	16166,2	87,79	61,14	0,21	-60,93
GFDL-ESM4_SSP585	41.605,96	25187,04	16418,92	166,57	60,54	0,40	-60,14
UKESM1-0-LLSSP370	41.605,96	25154,6	16451,36	0	60,46	0,00	-60,46
UKESM1-0-LLSSP585	41.605,96	19374,98	22230,98	0	46,57	0,00	-46,57
Promedio		**23789,095**	**17816,865**	**63,59**	**57,18**	**0,15**	**-57,02**

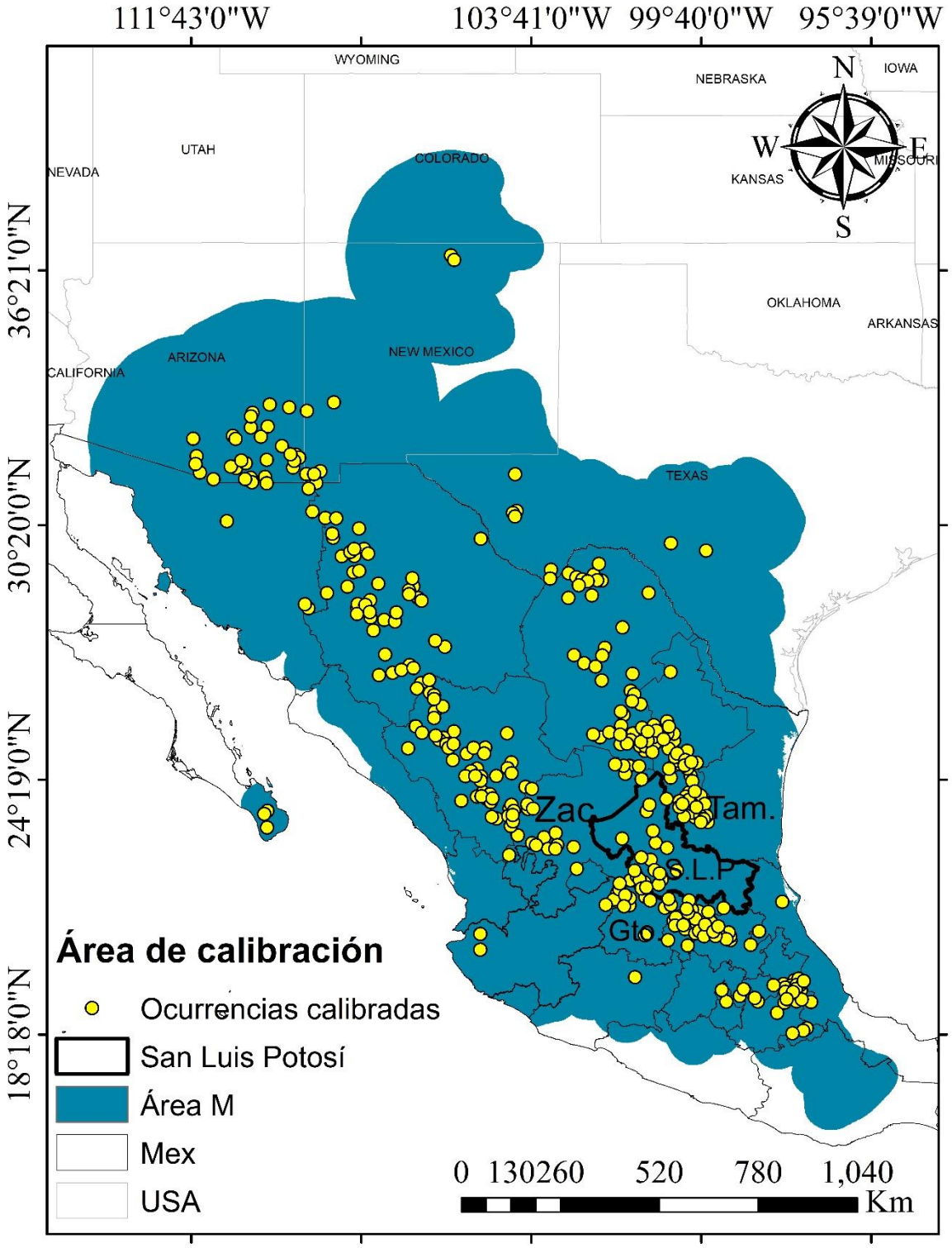

Figura 17. Mapa de registros seleccionados para el modelado de la distribución potencial de *P. cembroides* en S.L.P. El área en azul representa el área de calibración.

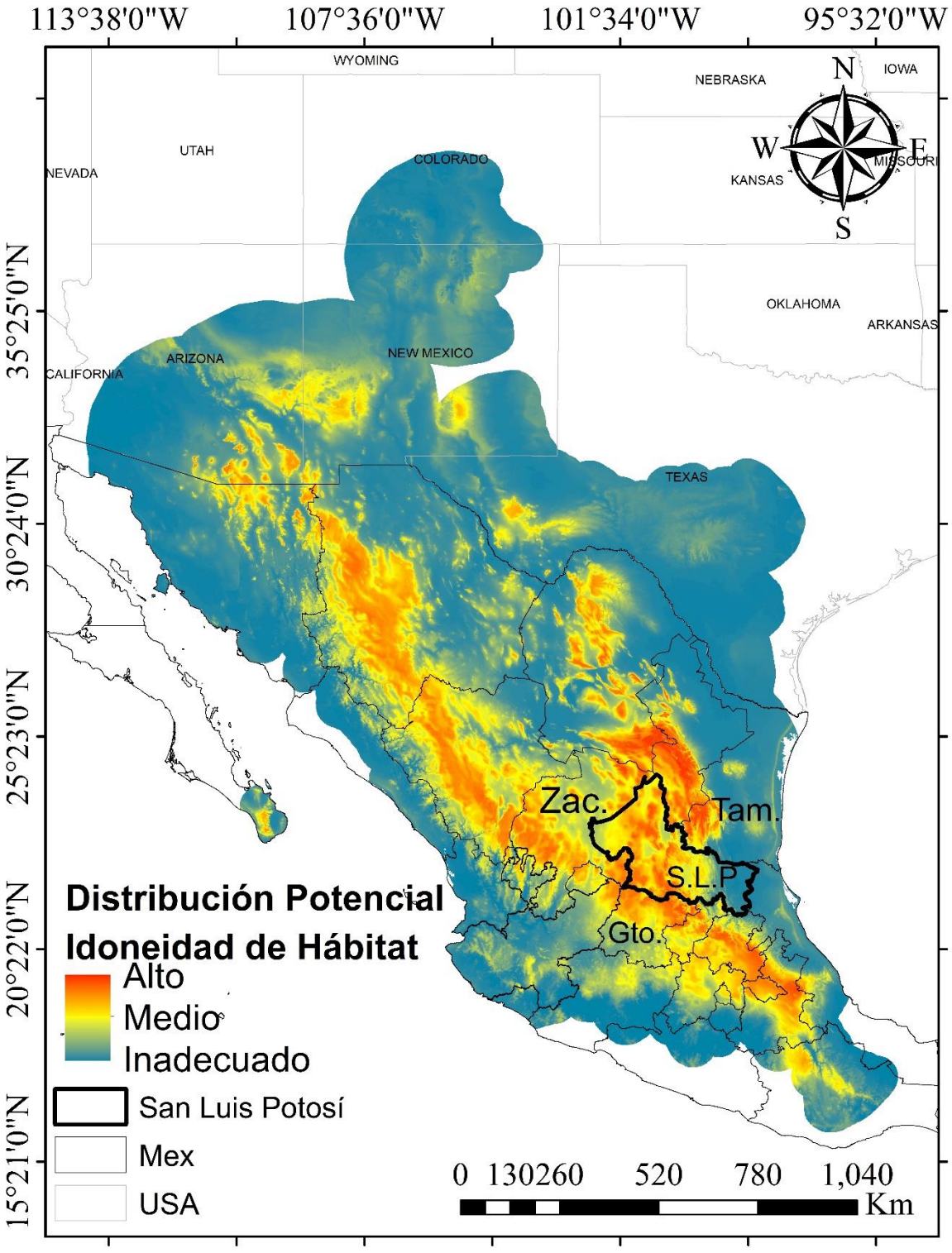

Figura 18. Distribución potencial de *P. cembroides*.

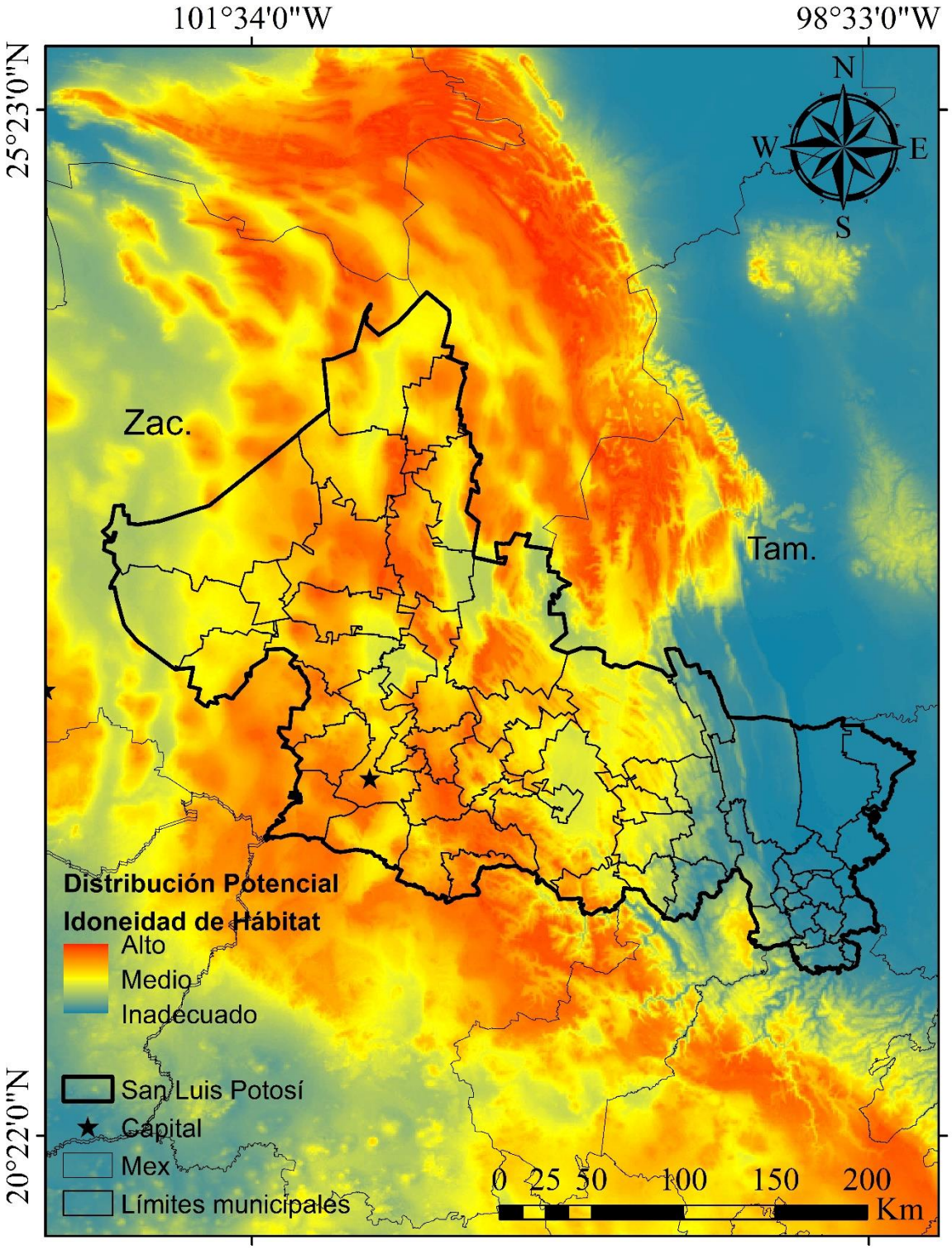

Figura 19. Distribución potencial de *P. cembroides* en SLP.

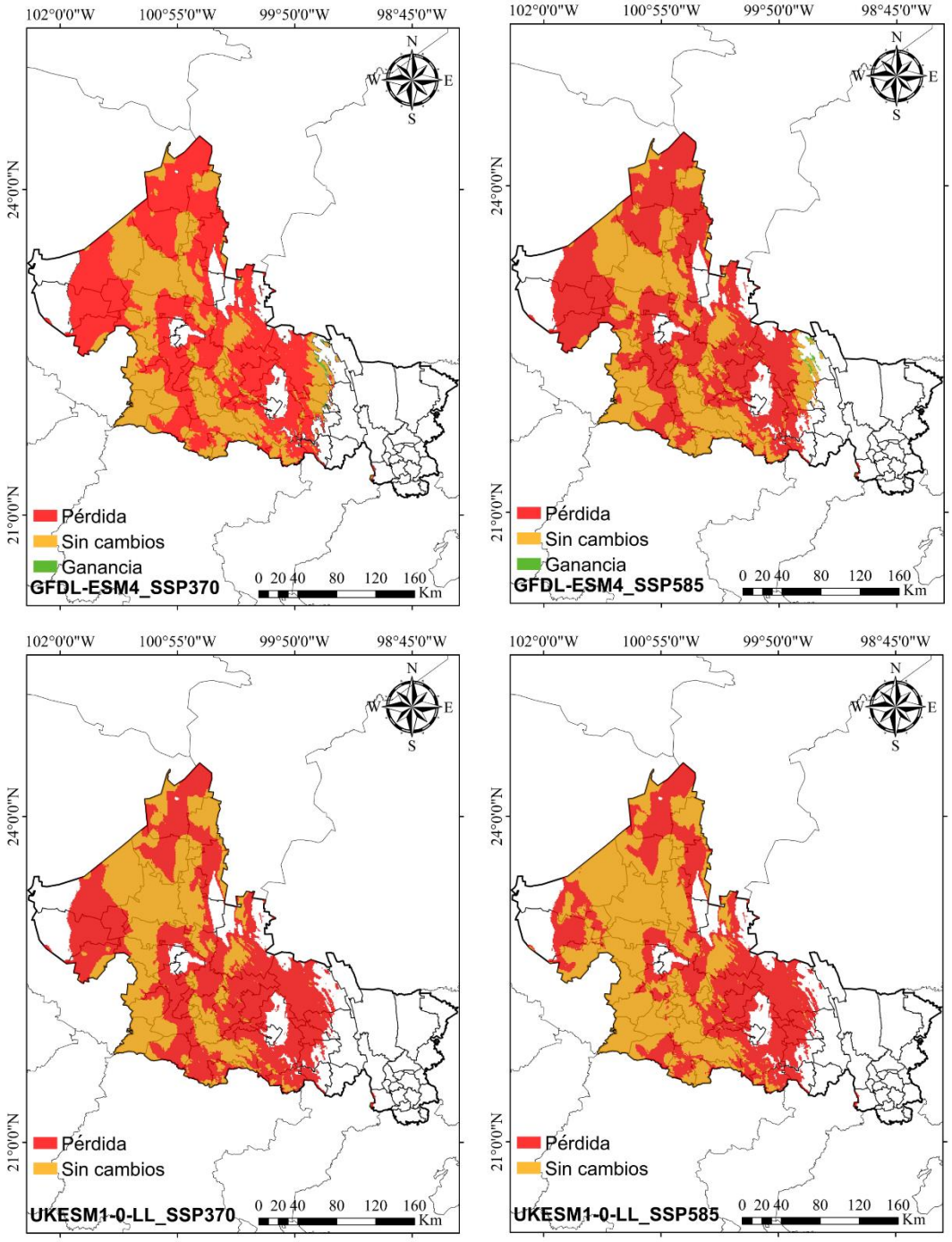

Figura 20. Escenarios de cambio climático GFDL-ESM4 y UKESM1 de la especie *P. cembroides* en San Luis Potosí.

VII. DISCUSIÓN

Actualmente existen trabajos de investigación en los que se estudia la distribución potencial en la República Mexicana de *Pinus cembroides, , P. johannis, P. nelsonii y P. pinceana y,* el trabajo de investigación titulado “Distribución potencial de 20 especies de pinos en México” de Aceves-Rangel *et al*., (2018). Sin embargo, los análisis de este trabajo se realizaron utilizando las variables bioclimáticas de Chelsa y los programas R y R Studio ®, además de enfocar los procesos al estado de San Luis Potosí. Esto genera modelos más específicos para dicho estado.

Para la especie *Pinus johannis* actualmente no existen registros de distribución potencial y ahí radica la importancia de este trabajo de investigación. Los resultados obtenidos indican el área de distribución potencial para promover la conservación a partir de reforestaciones y/o plantaciones comerciales dentro del estado, dando prioridad a las especies *P. nelsonii* y *P. pinceana,* las cuales se encuentran en la categoría de riesgo en peligro de extinción (P) y *P. johannis* en la categoría de Sujeta a protección especial (Pr), según la NOM-059-SEMARNAT-2010, dichas especies requieren acciones de protección y conservación; especialmente *P. johannis* que experimenta una reducción drástica de acuerdo a las proyecciones bajo escenarios de cambio climático.

El bosque de *P. cembroides* se considera como un tipo de vegetación aparte en San Luis Potosí, por presentar una fisionomía y composición florística definida, respondiendo a diferentes condiciones ecológicas a las que exigen las comunidades a otras especies del género *Pinus* (Rzendowski, 1961).

Según Rzendowski en su tesis doctoral titulada ‘’Vegetación del estado de San Luis Potosí´´ el bosque de *P. cembroides* o piñonares ocupan aproximadamente el 1% de la superficie total de San Luis Potosí y se localiza en tres áreas principales: zona San José Albuquerque (Santa maría del rio y de Zaragoza), en la sierra de San Miguelito (municipios de San Luis Potosí, Villa Arriaga y Villa de Reyes) y en la parte Suroeste de la sierra de Catorce (municipio de Catorce); Al igual que en áreas limitadas en los municipios de Ahualulco, Charcas y Mezquitic. Los bosques de pinos piñoneros de San Luis Potosí son escasamente explotados debido a que no alcanzan suficiente talla para

que se les aproveche de manera maderable y sus semillas (piñones) son colectadas con cierta intensidad, pero de manera irregular (Rzendowski, 1961).

P. cembroides es la especie con mayor alcance de distribución potencial con 41,605.96 km^2 siendo el 68.05% de la superficie total del estado; y que a pesar de no ser una especie en alguna categoría de riesgo se deben tomar en cuenta las áreas potenciales para su desarrollo óptimo por su importancia económica.

Las variables bioclimáticas de Chelsa con mayor peso que son comunes a estas especies son: la temperatura media anual, el rango de temperatura media diurna del aire, la isotermia y la estacionalidad de la precipitación; en el estudio titulado “Distribución potencial de los piñoneros (*Pinus cembroides* Zucc., *Pinus nelsonii* Shaw y *Pinus culminicola* Andresen & Beaman) en el noreste de México” de Hernández y Méndez (2016), mencionan que las principales variables bioclimáticas fueron la temperatura media del cuarto anual más seco, la temperatura máxima del mes más cálido, la temperatura mínima del cuarto anual más frío y la temperatura media del cuarto anual más frío y a pesar de que su estudio se realizó con las variables de WorldClim la temperatura media anual coincide en ambos estudios como relevante para los modelados de distribución potencial, al igual que dos factores que son la isotermancia y la estacionalidad de la precipitación como factores clave al momento de elegir áreas para la distribución de las especies de pinos piñoneros estudiados en esta investigación.

Los mapas de cambio climático son los primeros que se realizan para las cinco especies de pinos piñoneros para el estado, los mapas demuestran una pérdida promedio significativa en todas las especies excepto para *P. nelsonii*, especie que presenta una ganancia mínima dentro del estado del 0.22%. respecto a su distribución potencial actual de 16,095.36 km^2.

En el trabajo de investigación titulado “Modelado de la distribución actual y bajo cambio climático de pinos piñoneros endémicos de México” Pérez Miranda *et al.* (2019), un estudio realizado a 20 especies de pinos piñoneros en la república mexicana, llegando a las conclusiones de pérdida en las especies *P. pinceana*, *P. johannis* siendo las más sensibles en lo que respecta a los escenarios de cambio climático GFDL-CM3 y observando un incremento de distribución óptima en la especie *P. nelsonii*, siendo así

posible obtener un estudio a menor escala que sustenta lo dicho por Pérez Miranda *et al*., (2019).

Según el estudio realizado por Parra-Álvarez *et al*., (2022), “Caracterización estructural y clasificación de los bosques piñoneros de San Luis Potosí, México” las cinco especies mencionadas son las predominantes en el estado de San Luis Potosí de las cuales tres se encuentran en estatus según la NOM-059-SEMARNAT-2010, dado que cada una de las especies se desarrollan de manera óptima en diferentes situaciones bioclimáticas y de relieve en el terreno, por lo que se recomienda optar por tomar en cuenta los estudios realizados en esta investigación y realizar reforestaciones en zonas con características favorables para cada una de las especies por separado, aprovechando los pagos por servicios forestales para la conservación de zonas donde actualmente se encuentran las especies así como futuras plantaciones dando prioridad a las especies *P. johannis, P. nelsonii y P. pinceana*.

VIII. CONCLUSIONES

De este trabajo de investigación, se obtuvieron mapas de distribución potencial y mapas de escenarios de cambio climático; con los primeros mencionados se recomienda realizar recorridos para corroborar la presencia de estas cinco especies en los municipios que cuentan con características idóneas para su distribución con lo cual se registraran más observaciones lo que fortalecerá a futuro el conocimiento que se tiene de estas especies.

Los mapas de escenarios de cambio climático demuestran una pérdida importante en cada una de las especies a excepción de *P. nelsonii*, indicando de esta manera las especies más susceptibles a pérdida según los escenarios de cambio climático UKESM1 y GFDL-M4; al igual que las zonas donde se perderán las características para su distribución.

Actualmente el número de municipios con registros de las cinco especies representa en promedio el 17.51% del total de municipios con características idóneas de distribución, por lo cual se recomienda realizar trabajo de campo en el 82.49% de municipios restante, para aumentar los registros en línea.

Las especies con mayor pérdida en este análisis son las categorizadas dentro de la NOM-059-SEMARNAT, *P*. *johannis* y *P. pinceana,* por el contrario *P. nelsonii* que igual está dentro de la NOM-059-SEMARNAT es la única especie que genera ganancia dentro del estado según los escenarios de cambio climático.

Para las especies *P. cembroides, P. discolor, P. johannis y P. pinceana* se recomienda llevar a cabo acciones de conservación en las zonas con distribución potencial, generar acciones preventivas en las áreas donde se predice pérdida y promover zonas de protección para las especies en peligro de extinción según la NOM-059-SEMARNAT.

En cuanto a la especie *P. nelsonii* se deben tomar acciones de conservación y prevención de pérdida de hábitat óptimo para la especie, al igual que realizar forestación y migración asistida a las zonas con distribución potencial, así como a las áreas que cuentan con ganancia de condiciones óptimas para el desarrollo de la especie.

XIII. REFERENCIAS

Adler, RF, Huffman, GJ, Chang, A., Ferraro, R., Xie, P., Janowiak, J., Rudolf, B., Schneider, U., Curtis, S., Bolvin, D., Gruber, A., Susskind, J. y Arkin, P. (2003). Análisis mensual de la precipitación del Proyecto de climatología de precipitación global ({GPCP}) versión 2 (1979-presente). *Journal of* Hydrometeorology, 4, 1147-1167.

Aiello-Lammens, M. E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B., y Anderson, R. P. (2015). spThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, *38*(5), 541-545.

Baumbach, L., Hickler, T., Yousefpour, R., y Hanewinkel, M. (2023). High economic costs of reduced carbon sinks and declining biome stability in Central American forests. *Nature Communications*, *14*(1), 2043.

Cobos, M. E., Jiménez, L., Nuñez-Penichet, C., Romero-Álvarez, D., y Simões, M. (2018). Sample data and training modules for cleaning biodiversity information. Biodiversity Informatics, 13, 49-50.

Dunne, J. P., Horowitz, L. W., Adcroft, A. J., Ginoux, P., Held, I. M., John, J. G., ... y Zhao, M. (2020). The GFDL Earth System Model version 4.1 (GFDL-ESM 4.1): Overall coupled model description and simulation characteristics. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *12*(11), e2019MS002015.

Farjon, A., y Styles, B. T. (1997). *Pinus* (*PINACEAE*).

Farjon, A. (2010). *A Handbook of the World's Conifers: Revised and Updated Edition*. Brill.

García-Aranda, M. A., Méndez-González, J., y Hernández-Arizmendi, J. Y. (2018). Distribución potencial de *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii* y *Pinus culminicola* en el Noreste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *5*(13), 3-13.

Gernandt, D. S., y Pérez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de *Pinophyta* (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *85*, 126-133.

Hernández Arizmendi, J. Y., y Méndez-González, J. (2016). Distribución potencial de los piñoneros (*Pinus cembroides* Zucc., *Pinus nelsonii* Shaw y *Pinus culminicola* Andresen & Beaman) en el noreste de México.

Hernández, O. G., Artigas, R. C., González, J. M. S., & García, L. V. (2018). Modelos predictivos en Biogeografía: aplicación para la modelización de nichos ecológicos en Geografía Física. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, (78), 88-126.

Jiménez, J. U. (2019). Introducción a R y RStudio.

Karger D.N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R.W., Zimmermann, N.E,, Linder, H.P., Kessler, M.. Data from: Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Dryad Digital Repository.*

Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., ... & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, *4*(1), 1-20.

Karger, D.N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R.W., Zimmermann, N.E., Linder, P., Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the Earth land surface areas. *Scientific Data*. 4 170122. https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122

Mota Vargas, C., Encarnación Luévano, A., Ortega Andrade, H. M., Prieto Torres, D. A., Peña Peniche, A., y Rojas Soto, O. R. (2020). Una breve introducción a los modelos de nicho ecológico. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Mota Vargas, C., Encarnación Luévano, A., Ortega Andrade, H. M., Prieto Torres, D. A., y Peña Peniche, A. (2020). Repositorio Digital Ikiam.: Una breve introducción a los modelos de nicho ecológico. Repositorio Digital Ikiam. Retrieved September 12, 2023, from https://repositorio.ikiam.edu.ec/jspui/handle/RD_IKIAM/340

Parra Álvarez, J. (2021). *Caracterización, clasificación y ordenación de los bosques de pino piñonero del estado de San Luis Potosí* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma Chapingo).

Parra-Álvarez, J., Granados-Sánchez, D., Granados-Victorino, R. L., y Villanueva-Morales, A. (2023). Caracterización estructural y clasificación de los bosques piñoneros de San Luis Potosí, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, *29*(1), 61-98.

Pérez Miranda, R., Romero Sánchez, M. E., González Hernández, A., Rosales Mata, S., Moreno Sánchez, F., y Arriola Padilla, V. J. (2019). Modelado de la distribución actual y

bajo cambio climático de pinos piñoneros endémicos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *10*(56), 218-237.

Peterson, A. T., Cobos, M. E., y Jiménez-García, D. (2018). Major challenges for correlational ecological niche model projections to future climate conditions. *Annals Of The New York Academy Of Sciences*, *1429*(1), 66-77. https://doi.org/10.1111/nyas.13873

Pinus cembroides GBIF.org (16 October 2024) GBIF Occurrence Download

Pinus discolor GBIF.org (16 October 2024) GBIF Occurrence Download https://doi.org/10.15468/dl.ya4w9b

Pinus discolor GBIF.org (16 October 2024) GBIF Occurrence Download https://doi.org/10.15468/dl.6ppb9d

Pinus johannis GBIF.org (16 October 2024) GBIF Occurrence Download

Pinus pinceana GBIF.org (16 October 2024) GBIF Occurrence Download

Romero, A., Luna, M., y García, E. (2014). Factores físicos que influyen en las relaciones florísticas de los piñonares (Pinaceae) de San Luis Potosí, México. Revista de Biología Tropical, 62(2), 795-808.

Roque Ortiz, S. (2015). Síntesis de la evolución del conocimiento en Edafología. *Eubacteria*, *1*(34), 14. Retrieved 08 28, 2023, from https://digitum.um.es/digitum/bitstream/10201/48175/1/Sintesis_de_la_evoluci%C3%B3n_del_conocimiento_en_Edafolog%C3%ADa_Eubacteria34.pdf

Sánchez-González, A. (2008). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques*, *14*(1), 107-120.

Santillán, M. L. (2021, December 21). México, país de Pinos. Ciencia UNAM. https://ciencia.unam.mx/leer/1209/mexico-es-el-hogar-de-la-mitad-de-las-especies-de-pinos-de-todo-el-mundo-

Sellar, A. A., Jones, C. G., Mulcahy, J. P., Tang, Y., Yool, A., Wiltshire, A., ... & Zerroukat, M. (2019). UKESM1: Description and evaluation of the UK Earth System Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *11*(12), 4513-4558.

SEMARNAT. (2021, February 7). *Bosques de México, riqueza forestal y biodiversidad*. Bosques de México, riqueza forestal y biodiversidad | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales | Gobierno | gob.mx. Retrieved September 12, 2023, from:https://www.gob.mx/semarnat/articulos/bosques-de-mexico-riqueza-forestal-y-biodiversidad

SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Diario Oficial de la Federación (DOF), martes 04 de marzo de 2015.

Vargas, L. E., & Mesa-Fúquen, E. (2021). Introducción al análisis de datos con RStudio.

Zizka, A., Silvestro, D., Andermann, T., Azevedo, J., Duarte Ritter, C., Edler, D., ... & Antonelli, A. (2019). CoordinateCleaner: Standardized cleaning of occurrence records from biological collection databases. *Methods in Ecology and Evolution*, *10*(5), 744-751.