



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

Metodología para ajustar clasificaciones supervisadas de  
imágenes satelitales, una contribución a la conservación  
del gorrión serrano (*Xenospiza baileyi*)

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO GEOMÁTICO

P R E S E N T A:

RODRIGO JAVIER VÁZQUEZ DE LA TORRE



MÉXICO, D.F.

2015

## Índice

I. PRESENTACIÓN .....	4
II. ANTECEDENTES.....	6
2.1. La Geomática como ciencia.....	6
2.1.1. La Cartografía y los Sistemas de Información Geográfica.....	7
2.1.2. Percepción Remota.....	9
2.1.2.1. Métodos de clasificación de imágenes y probabilidades <i>a priori</i> .....	12
2.1.2.2. Imágenes satelitales SPOT.....	14
2.1.3. Modelación matemática.....	18
2.2. MODELO DE ESTUDIO.....	20
2.2.1. Gorrión Serrano ( <i>Xenospiza bailey</i> ).....	21
III. OBJETIVO GENERAL.....	23
IV. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
V. MÉTODOS E INSUMOS.....	24
5.1. Etapa de planeación y recopilación bibliográfica.....	27
5.1.1. Trabajo de Campo.....	28
5.1.2. Modelación Matemática.....	28
5.1.3. Sistemas de Información Geográfica.....	29
5.1.4. Imágenes de Satélite.....	31
5.2. Selección de datos, preprocesamiento y trabajo de campo.....	32
5.2.1. Ejecución del trabajo de campo.....	32
5.2.2. Recopilación de datos para la modelación matemática.....	34
5.2.3. Elaboración del sistema de información geográfica base.....	35
5.2.4. Preprocesamiento de Imágenes.....	36

5.3. Clasificación supervisada. (Modelación del nicho ecológico del Gorrión Serrano, Elaboración probabilidades a priori de ocurrencia y Clasificación MaxLike). .....	42
5.3.1. Modelación del nicho ecológico del gorrión serrano. ....	42
5.3.1.1. Análisis de omisión/comisión. ....	46
5.3.2. Incorporación de resultados de la modelación al SIG y generación de las probabilidades <i>a priori</i> de ocurrencia. ....	47
5.3.3. Clasificación supervisada “MaxLike” empleando probabilidades de ocurrencia. ....	49
5.3.3.1. Cálculo de firmas espectrales. ....	49
5.3.3.1. Clasificación supervisada Maxlike. ....	51
VI. RESULTADOS .....	53
VII. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES. ....	58
VIII. LITERATURA CITADA .....	a

## Índice de Tablas

Tabla 1 Características técnicas de los sensores. ....	15
Tabla 2 Características técnicas de los instrumentos montados en los satélites SPOT .....	16
Tabla 3 Coordenadas que componen el área preliminar de estudio .....	30
Tabla 4 Registros de <i>Xenospiza baileyi</i> de acuerdo con rojas-soto et al. 2008 ...	31
Tabla 5 Visita de campo y muestreos de presencia del <i>Xenospiza baileyi</i> .....	33
Tabla 6 Características técnicas de las imágenes SPOT .....	37
Tabla 7 Características Generales Imágenes SPOT .....	37
Tabla 8 Comparación de pansharpen en imágenes SPOT .....	39
Tabla 9 Coordenadas finales del área de estudio. ....	41
Tabla 10 PORCENTAJE DE CONTRIBUCIÓN DE CADA VARIABLE EMPLEADA. ....	47

Tabla 11 Firmas espectrales representadas en radiancia aparente .....	49
Tabla 12 Superficies por tema producto de la clasificación supervisada. ....	53
Tabla 13 Probabilidad de ocurrencia con base en los sitios de entrenamiento .....	56
Tabla 14 Superficie remanente o nicho ecológico del gorrión serrano.....	54

## Índice de Imágenes

Imagen 1 Ecuación base del teorema de Bayes .....	13
Imagen 2 Descripción de la metodología llevada a cabo en el presente trabajo de tesis.....	26
Imagen 3 Comparación del detalle entre variables bioclimáticas a diferente resolución .....	44
Imagen 4 Distribución Potencial del Gorrión Serrano.....	45
Imagen 5 Análisis de Omisión y Comisión .....	46
Imagen 6 Gráfica de sensibilidad del modelo.....	46
Imagen 7 firmas espectrales para las bandas 1,2 y 3 del año 2004 (promedio) ...	50
Imagen 8 firma espectral para la banda 4 del año 2004 (promedio) .....	51
Imagen 9 Clasificación supervisada. Año 2004. Título .....	52
Imagen 10 Tendencia de conservación de pastizales.....	55
Imagen 11 Nicho ecológico del Gorrión Serrano.....	53
Imagen 12 Tendencia de conservación del nicho ecológico del gorrión serrano. .	54

## I. PRESENTACIÓN

En el ámbito del inventario y planificación del uso de los recursos naturales, la geomática y los SIG desempeñan un papel fundamental al permitir contextualizar en un sistema espacialmente referido, datos ambientales, tales como: la presencia de una especie a nivel nacional, estatal o regional, las características estructurales de una comunidad vegetal, o la interacción entre ambos componentes ambientales.

El punto medular de la geomática como ingeniería, es la unificación de tecnologías que permitan la adquisición, tratamiento y sistematización de información geográficamente referida. Así mismo, la geomática integra distintas técnicas y herramientas como la teledetección, la adquisición de datos y el manejo de bases de datos geográficas, que facilitan la realización de análisis multivariados que forman las bases de estudios territoriales. Es gracias a esta cualidad, que la geomática resulta en una herramienta invaluable en el monitoreo y cuantificación de procesos ecológicos.

El monitoreo de la dinámica de la cubierta forestal, es una práctica que apoya la gestión del territorio, dado que permite conocer las tendencias de deterioro de una región, o las tasas de transformación de áreas o tipos de vegetación específicos, así como también es posible medir el éxito de los programas de conservación del capital natural, y la reconversión productiva, entre otros (Nuñez 2010).

El gorrión serrano (*Xenospiza baileyi*) es un ave pequeña, poco visible, especialista y dependiente de los zacatonales de montaña (Berlanga *et al* 2009). Es una especie endémica de México, es decir, que su distribución está restringida al territorio nacional. Es además, una de las 55 especies de aves catalogadas como en Peligro de Extinción a nivel nacional de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2010 (México 2010).

Su distribución comprende dos regiones disjuntas. La primera en los Estados de Jalisco y Durango, en la Sierra Madre Occidental (S.M.O.). –Donde por más de 50 años se consideró extinta hasta que se redescubrió una pequeña población al sur

de Durango en 2002 (Oliveras de Ita-Rojas-Soto, 2005)-. La segunda región corresponde al sur del Valle de México (S.V.M), en los límites del Distrito Federal, Estado de México y Estado de Morelos -Donde su hábitat corresponde a los últimos remanentes de la asociación vegetal de pastizales de montaña conocida como zacatonal subalpino, en el Eje Volcánico Transversal (Rzedowski 1978, Oliveras de Ita 2002) -.

González (2000) estimó que el área de distribución de *Xenospiza baileyi* al S.V.M., es de 23.18 km<sup>2</sup>, y que el hábitat disponible para la reproducción de esta especie es de tan solo 796.84 ha distribuidas en 29 fragmentos de Zacatonal. Ante esta situación alarmante, resulta imprescindible conocer la distribución actual y los cambios que ha sufrido su hábitat en el S.V.M. a lo largo del tiempo para determinar si la transformación del hábitat es la principal amenaza para la especie (Oliveras de Ita 2002).

La presente Tesis, en el marco de los esfuerzos de conservación de *Xenospiza baileyi*, propone un método para afinar clasificaciones supervisadas realizadas a imágenes satelitales empleando probabilidades de ocurrencia *a priori* atendiendo 3 puntos fundamentalmente:

- Cuantificar el hábitat remanente del gorrión serrano en las poblaciones del S.V.M. al año 2008.
- Determinar el comportamiento de dicho hábitat en una ventana de tiempo de 5 años, correspondientes al periodo 2004-2008.
- Proyectar la tendencia de pérdida/ganancia del hábitat a futuro.

Empleando técnicas de análisis espacial, se realizó una evaluación del área de distribución y de la cantidad de hábitat disponible para el gorrión serrano a través de la modelación de su nicho ecológico y distribución conocida mediante el uso de tecnologías basadas en Sistemas de Información Geográfica, Fotogrametría, Cartografía, Modelación de Distribución de Especies (GARP-Maxent), Percepción Remota, entre otros. (Velázquez 2000, Rojas-Soto *et al* 2007).



La metodología propuesta se describe de tal forma que pueda ser aplicada en proyectos de conservación de cualquier otra especie, considerando un conocimiento *a priori* de su distribución potencial, que pueda ser modelado con base en un conjunto de variables bioclimáticas y abióticas propuestas en el presente documento.

## II. ANTECEDENTES

### 2.1. La Geomática como ciencia.

El término *Geomática* es un neologismo<sup>1</sup> empleado para referirse a un conjunto de técnicas y disciplinas que estudian la superficie de la Tierra y el medio ambiente (Gomasca 2004). La geomática se vale de datos geográficamente referenciados, también llamados datos geoespaciales, para efectuar análisis, interpretación, difusión y almacenamiento de información.

Al tratarse de una integración de distintas técnicas, la geomática requiere de la utilización de herramientas de manejo de datos y análisis espacial, así como de la interrelación entre métodos, procesos y disciplinas. Cabe mencionar que los datos geoespaciales, son obtenidos mediante las técnicas de la topografía, fotogrametría analógica y digital, percepción remota y sistemas de información geográfica entre otras (Rainer 2009).

Con base en lo anterior, se establece una definición de geomática desde el enfoque particular del presente trabajo. La geomática es un conjunto de ciencias y tecnologías que permiten la adquisición, almacenamiento, análisis y difusión de datos y que con base en ellos, genera y sistematiza información geoespacial útil

---

<sup>1</sup> Vocablo, acepción o giro nuevo en una lengua (Definición de la Real Academia de la lengua Española). En particular, hace referencia a la creación del término en 1969 por el científico francés Bernard Dubuisson.



para la administración y manejo de cualquier recurso que tenga una representación territorial. (Gomasca 2004, Rainer 2009, Weng 2010).

Desde su creación a finales del siglo XX, la Geomática se ha posicionado como una de las herramientas fundamentales para el estudio y análisis de los elementos y procesos que tienen lugar sobre la superficie terrestre; esto es, debido a su naturaleza intrínseca de manejo de datos cualitativos y cuantitativos asociados a un espacio geográfico determinado.

La Geomática no debe de conceptualizarse de manera independiente, sino como un gran espectro de ciencias y técnicas que integren un componente espacial en sus estudios y análisis; como lo es: La Percepción Remota, Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la Ecología y la Geografía entre otros.

A continuación se hará una breve descripción de las técnicas empleadas para el desarrollo del presente trabajo, y que integran a la Geomática.

### **2.1.1. La Cartografía y los Sistemas de Información Geográfica**

La principal función de un mapa es representar gráfica y métricamente las características bióticas, abióticas y sociales de una porción de territorio. Con base en lo anterior es que se puede afirmar que, entendiendo las relaciones espaciales existentes entre el objeto de estudio en una investigación y los factores bióticos y abióticos asociados, se puede llegar a una hipótesis con conocimiento de causa (ESRI 2008). Para comprender y estudiar estas relaciones geoespaciales, los especialistas se auxilian de diferentes ciencias que se sustentan en la cartografía.

La cartografía está continuamente evolucionando, conforme a los adelantos tecnológicos. Los avances en arquitectura de procesadores y sistemas de almacenamiento, permiten procesar volúmenes cada vez mayores de información geoespacial, lo que se traduce en un incremento en la resolución de archivos en





formato raster, un mayor detalle gráfico de archivos vectoriales o el procesamiento de grandes volúmenes de datos mediante *clústeres* informáticos (Lorenzo M. y R. González 2007).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), surgen en la década de los 60s como una herramienta que complementa y enriquece los procesos cartográficos. Un SIG organiza datos geográficamente referenciados en un entorno visual, y tiene como finalidad estudiar las relaciones espaciales existentes entre distintas capas de información que se sobreponen, intersectan o comparten un espacio geográfico (ESRI 2008). La tendencia moderna en SIG apunta a una mayor integración con diferentes ramos de la ciencia y la industria desde estudios de geomarketing hasta estudios geopolíticos; y en un rango del conocimiento que va desde la arqueología hasta la zoología.

En el tema de la ciencia, los SIG son únicos en el aspecto de incorporar datos cualitativos y cuantitativos dentro de una estructura espacial. De manera general, se considera que un SIG se centra en las relaciones humano-ambientales, por lo que un SIG es una de las herramientas más utilizadas que nos permite estudiar y conocer al hombre y su entorno. En el ámbito del inventario de los recursos naturales y en la planificación de su uso, la geomática y los SIG, desempeñan un papel importante al permitir contextualizar en un sistema espacialmente referido, datos ambientales, como pueden ser: presencia de una especie de flora o fauna a nivel nacional, estatal o regional, características estructurales de una comunidad vegetal o interacción entre ambos. También, al contar con datos actuales de las condiciones físicas y biológicas del territorio a través de los sensores remotos y del análisis en campo de fenómenos o situaciones ambientales, se obtiene un inventario espacial de los recursos, los fenómenos y las amenazas que se presentan en una zona o región, lo cual permite además realizar análisis retrospectivos y prospectivos de fenómenos bióticos o abióticos mediante la modelación de datos y su posterior interpolación o extrapolación. Con todo este acervo de datos e información, espacial y no espacial, los SIG contribuyen no sólo al entendimiento del entorno y conocimiento de fenómenos naturales, sino al desarrollo de estrategias de



mitigación, conservación, restauración, desarrollo y manejo de especies, hábitat o regiones determinadas. (Rainer 2009, Gomarasca 2000, Nuñez *et al* 2010).

La principal ventaja de los SIG, es la propiedad innata de emplear datos geoespaciales, por lo que el resultado de un ejercicio o análisis espacial resulta en valores independientes operados según su ubicación geográfica con relación a otras variables en un sistema coordinado.

### **2.1.2. Percepción Remota.**

La Percepción Remota se puede definir de manera general como la adquisición de datos e interpretación de un objeto, área o evento sin estar en contacto físico con él.

En el terreno de la geomática, la fotografía aérea sentó las bases de la técnica, primero adquiriendo imágenes en la porción visible del espectro electromagnético y posteriormente adquiriendo datos en otros anchos de banda, como lo puede ser el infrarrojo cercano o el infrarrojo termal entre otros. Actualmente, la existencia de plataformas satelitales ha ampliado considerablemente el campo de acción de la percepción remota y ofrece un método de adquisición de datos que cubre extensiones de terreno mayores a un costo menor (Sanderson 2007).

La percepción remota se basa en la medición de la energía del espectro electromagnético en diferentes regiones. De acuerdo con Weng (2010) la radiación electromagnética es una forma de energía con propiedades de onda, cuya principal fuente emisora es el sol y que viaja a la velocidad de la luz. A su vez, las ondas electromagnéticas, se propagan en el espacio en ondas cuya principal característica es su amplitud y frecuencia. El espectro electromagnético, es un mapeo de las características físicas de las ondas electromagnéticas, clasificadas según su amplitud.



Una de las características principales de las ondas electromagnéticas es la reflectancia, la cual se basa en el principio de que, cuando una onda electromagnética choca con un cuerpo sólido, parte de la energía contenida se absorbe y parte se refleja. El principio de reflectancia es en el que se basa la percepción remota. Cabe mencionar que los sensores de percepción remota pueden detectar y almacenar tanto la energía reflejada como la emitida por diferentes superficies.

Los sensores remotos son capaces de medir la energía en diferentes regiones del espectro electromagnético, y aunque las regiones de principal interés en los satélites se ubican en los rangos del espectro visible a los infrarrojos medios, también existen sensores remotos capaces de detectar ondas de radar o microondas, entre otros.

En el campo de los estudios ambientales, los sensores remotos facilitan las tareas de detección de coberturas vegetales mediante la medición de los niveles del espectro electromagnético en el rango del infrarrojo cercano y el rojo visible. De acuerdo con Nuñez (2010), el monitoreo de la dinámica de la cubierta forestal, es una práctica que apoya la gestión del territorio, dado que permite medir el éxito de los programas de conservación del capital natural, y la reconversión productiva, entre otros. Permite además, la obtención de datos sistematizados para la comparación de los cambios observados entre periodos de tiempo, es decir las tendencias de la cubierta vegetal y su relación con el desarrollo de las diferentes actividades que inciden en su mantenimiento, pérdida o recuperación.

Para determinar la densidad de vegetación en una zona, se deben de observar los distintos colores (longitudes de onda) de luz visible e infrarroja cercana reflejada por las plantas. El pigmento en las hojas, la clorofila, absorbe fuertemente la luz visible (0,4 a 0,7 micras) para su uso en la fotosíntesis. La estructura celular de las hojas, por el contrario, refleja claramente el infrarrojo cercano (0,7 a 1,1 micras). Es decir, mientras mayor sea el número de hojas que tiene una planta, mayor será la respuesta electromagnética (NASA 2012).





### **2.1.2.1. Métodos de clasificación de imágenes y probabilidades *a priori*.**

Uno de los procesos más importantes en la percepción remota consiste en la elaboración de mapas temáticos, donde las coberturas del terreno se clasifican y agrupan en categorías de ocupación y uso del suelo. Las clasificaciones pueden ser amplias, como zonas urbanas, boscosas, de campo abierto y cobertura de cuerpos de agua; o pueden ser muy específicas, por ejemplo, diferenciando tipos de cultivos como campos de maíz, trigo o pastizales. Normalmente, los distintos tipos de terreno se codifican por colores.

Actualmente existen diferentes algoritmos de clasificación que permiten cubrir grandes porciones del terreno de manera rápida y efectiva. Dichos algoritmos se encuentran basados en diferentes características de la imagen como lo es: la reflectancia del espectro electromagnético almacenada en cada pixel, la textura y el contraste entre otros.

Los procedimientos para la clasificación de imágenes, pueden ser supervisados o no-supervisados. En la clasificación supervisada, los valores espectrales de las diferentes coberturas, son computados empleando sitios de entrenamiento, que generalmente corresponden a sitios, que han sido previamente muestreados en campo. En la clasificación no supervisada, el software de procesamiento de imágenes, computa automáticamente los valores de las diferentes coberturas, agrupándolas en acorde a su valor espectral. Finalmente, cada clase o tema obtenido de la clasificación (independientemente del procedimiento llevado a cabo) puede mapearse empleando Sistemas de Información Geográfica generando mapas temáticos (Sanderson 2007).

Para el caso particular del presente trabajo, se empleó un método automatizado de clasificación conocido como Máxima Verosimilitud (MaxLike). Este método estadístico de clasificación de imágenes satelitales emplea firmas espectrales generadas previamente; por lo que se considera un sistema de clasificación supervisada.



El algoritmo de máxima verosimilitud se alimenta de puntos de control (muestreos de campo), que considera como parámetros. Posteriormente, selecciona los valores de un conjunto finito de datos (en este caso una imagen satelital), con mayor probabilidad de acercarse a algún parámetro definido previamente, para después ser agrupado en *clusters*, bajo un mismo valor reclasificado en temas o clases; es decir, los parámetros que maximizan la función de verosimilitud. (Andersen 1980).

En este estudio, la clasificación se basó en la probabilidad de la densidad de valores asociados, a las firmas espectrales calculadas con los sitios de entrenamiento, que se obtuvieron mediante trabajo de campo. Los píxeles de la clasificación fueron asignados a la clase más probable, basada en una comparación previa realizada con las firmas calculadas. La clasificación MaxLike también es conocida como: “Clasificación por algoritmo Bayesiano”, dado que se le puede asignar probabilidades *a priori*, empleando el teorema de Bayes, el cual, expresa la probabilidad condicional de un evento aleatorio A dado en B de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{\sum_{k=1}^n P(B|A_k)P(A_k)}$$

#### IMAGEN 1 ECUACIÓN BASE DEL TEOREMA DE BAYES

Cabe mencionar que para que, las clasificaciones se pudieran comparar entre sí, se eligieron sitios de entrenamiento comunes, del catálogo completo de imágenes, es decir, aquellos sitios que mostraron un cambio menor aparente en el transcurso del tiempo.

Finalmente con el propósito de afinar los resultados obtenidos de la clasificación, se empleó el “teorema de probabilidades *a priori* de ocurrencia”.

El teorema se expresa como la probabilidad de que cada clase exista previo a la clasificación. Dichas probabilidades pueden especificarse como un valor constante aplicable a todos los píxeles, o como una imagen representando diferentes



probabilidades para cada píxel y de esta manera, asignar la clase con el valor de probabilidad a priori más alto en casos de incertidumbre (Richards 1986).

El proceso de cálculo de probabilidades *a priori* mediante modelación de máxima entropía se detalla en la sección 5.3.2.

### **2.1.2.2. Imágenes satelitales SPOT**

Los satélites SPOT (Sistemas para la observación de la Tierra, por sus siglas en Francés), son un sistema de satélites ópticos de alta resolución operado por Spot Image, localizado en Toulouse, Francia. Se diseñó en la década de los 70s en asociación con el centro SSTC (Servicios Belgas de Ciencia, Tecnología y Cultura) y el Consejo SNSB (Consejo Nacional Sueco del Espacio), y su fin específico es mejorar el conocimiento de la tierra mediante la exploración de recursos, detectar y predecir los fenómenos físicos involucrando la climatología y la oceanografía, además de las interacciones entre las actividades humanas y los fenómenos naturales. El sistema SPOT incluye un conjunto complejo de satélites y centros de control terrestre para la programación, producción de imágenes y distribución. (Astrium 2012)

La siguiente tabla muestra las características técnicas de los sensores.



**TABLA 1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS SENSORES.**

	SPOT 5	SPOT 4	Spot 1,2 & 3
Fecha de Lanzamiento	4 de Mayo de 2002	24 de Marzo de 1998	<b>SPOT 1</b> – Febrero 86 <b>SPOT 2</b> – Enero 90 <b>SPOT 3</b> – Septiembre 93
Vehículo de lanzamiento	Ariane 4		Ariane 2/3
Vida útil nominal	5 años		3 años
Salida de Órbita	En órbita		<b>SPOT 1</b> – Noviembre 03 <b>SPOT 2</b> – Julio 09 <b>SPOT 3</b> – Noviembre 96
Hora de cruce con el Ecuador	10:30 a.m.		
Altitud al Ecuador	822 km		
Inclinación	98,7°		
Velocidad	7.4 km/s		
Periodo de Orbita	101.4 minutes		
Ciclo de Órbita	26 días		

Fuente: Spot satellite technical data.

Los satélites spot están compuestos de dos sensores de alta resolución que pueden funcionar independientes o en tándem ya sea en modo pancromático (P: con una sola banda en el rango visible del espectro electromagnético) o en modo Multiespectral (XS/Hi: con bandas verde, roja y las bandas infrarrojas del espectro electromagnético). Las características técnicas por sensor de los satélites se mencionan a continuación.





**TABLA 2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS INSTRUMENTOS MONTADOS EN LOS SATÉLITES SPOT**

	SPOT 5	SPOT 4	Spot 1,2 & 3
Instrumentos	2 HRGs	2 HRVIRs	2 HRVs
Resolución de las bandas espectrales	2 pancromáticas (5 m), Combinados para generar un producto de 2.5 m 3 multiespectrales (10 m) 1 infrarrojo cercano (20 m)	1 pancromática (10 m) 3 multiespectrales (20 m) 1 infrarrojo cercano (20 m)	1 pancromática (10 m) 3 multiespectral (20 m)
Rango Espectral	P: 0.48 – 0.71 $\mu\text{m}$ B1 (verde): 0.50 – 0.59 $\mu\text{m}$ B2 (rojo): 0.61 – 0.68 $\mu\text{m}$ B3 (IC*): 0.78 – 0.89 $\mu\text{m}$ B4 (ICoC*): 1.58 – 1.75 $\mu\text{m}$	M: 0.61 – 0.68 $\mu\text{m}$ B1 (verde): 0.50 – 0.59 $\mu\text{m}$ B2 (rojo): 0.61 – 0.68 $\mu\text{m}$ B3 (IC*): 0.78 – 0.89 $\mu\text{m}$ B4 (ICoC*): 1.58 – 1.75 $\mu\text{m}$	P: 0.51 – 0.73 $\mu\text{m}$ B1 (verde): 0.50 – 0.59 $\mu\text{m}$ B2 (rojo): 0.61 – 0.68 $\mu\text{m}$ B3 (IC*): 0.78 – 0.89 $\mu\text{m}$
Tamaño de Escena	60 km x 60 km a 80 km		
Profundidad de pixel	8 bits		
Ángulo de Incidencia	+/- -31.06°		

\*IC: Infrarrojo Cercano. ICoC: Infrarrojo Cercano de Onda Corta.

Fuente: Spot satellite technical data.

Existen diferentes sensores que cubren distintos fines, para el caso del presente estudio, se trabajó con imágenes satelitales captadas por los sensores HRVIR y HRG de los satélites Spot 4 y Spot 5, ya que tienen la resolución radiométrica y espacial requerida para el tipo de análisis de cobertura.



Los sensores remotos capturan los datos en bloques de bites, lo que representa un nivel muy bajo de procesamiento y que generalmente no es compatible con la mayor parte de paquetería en percepción remota. De acuerdo con Piwowar (2001), existen 3 niveles de procesamiento que se deben de aplicar a la imagen para que pueda emplearse en estudios.

- **Nivel 0.**- Las imágenes de nivel 0 representan los datos crudos captados por el sensor. Como deben de hacerse correcciones fundamentales antes de poder utilizarse, los distribuidores no proveen de imágenes en nivel 0.
- **Nivel 1A.**- Las imágenes de nivel 1A han sido corregidas por variaciones del sensor. Entre las principales correcciones, está el detectar que cada celda reciba una cantidad de energía electromagnética similar a la de las demás celdas. Cabe mencionar que el sensor SPOT HRV tiene 6000 detectores, como la percepción remota se basa en medir las diferencias de energía electromagnética captada entre pixeles es muy importante realizar éste tipo de correcciones.

Las correcciones de 1A se refieren como correcciones radiométricas. Cabe mencionar que éste tipo de correcciones son vitales si se planea hacer clasificaciones a las imágenes satelitales.

- **Nivel 1B.**- Las imágenes 1B corrigen el segundo error más común de los datos captados por el satélite, y se refiere a las correcciones geométricas. Los errores geométricos generalmente se componen de distorsiones en la superficie terrestre o distorsiones existentes entre grupos de pixeles, como éste tipo de errores son predecibles la corrección 1B es uno de los ajustes básicos.
- **Nivel 2A.**- Las imágenes con nivel 2A representan una mejora de las imágenes de nivel 1B. Las imágenes 2A han sido mapeadas en un sistema coordinado ajustado a la ubicación aproximada del satélite al tomarse las imágenes, sin embargo, cabe mencionar que las imágenes en nivel de procesamiento 2A aún contienen errores de hasta 100 m de georreferencia. RADARSAT International, se refiere a los productos 2A como productos de "Map-Image."



- **Nivel 2B.**- El nivel de procesamiento 2B generalmente se conoce como la georreferencia de las imágenes. La georreferencia o georreferir una imagen, se refiere al proceso de ajustar la imagen satelital a una serie de puntos de control terrestre generalmente captados por GPS o una Ortofoto. Cabe mencionar que después de georreferir una imagen, la precisión al realizar mediciones sobre la misma corresponde a la resolución espacial de la misma.
- **Nivel 3A.**- Si el terreno que se está mapeando está compuesto de accidentes fisiográficos o topográficos importantes, es necesario ajustar la imagen para compensar las elevaciones y poder realizar mediciones. Para poder realizar dichos ajustes es necesario contar con un Modelo Digital de Terreno (MDT) para realizar los desplazamientos por altura. Este proceso generalmente se conoce como **ortorectificación.**
- **Nivel 3B.**- El último nivel de pre procesamiento, consiste en unir escenas diferentes que se traslapen en algún punto en común. A este proceso se le conoce como mosaiqueo y es necesario aplicarse cuando el área de estudio se encuentra distribuido entre 1 o más escenas.

### 2.1.3. Modelación matemática

Los modelos matemáticos empleados en la ingeniería y las ciencias ambientales (como la biología y la ecología, entre otras), pueden ser cualitativos, gráficos o cuantitativos. Los modelos son usados para explicar o predecir fenómenos con patrones espaciales. La característica innata de los SIG, para manejar datos espaciales permite trasladar modelos teóricos a un espacio geográfico, lo que mejora de manera significativa la interpretación y presentación de resultados (Brimicombe 2010).

Como se abordó en un apartado anterior (2.1.2.1), una práctica que apoya la gestión del territorio, es el monitoreo de la dinámica de la cubierta forestal, mediante imágenes aéreas o satelitales, y es mediante el cálculo de probabilidades *a priori*



de ocurrencia, que pueden mejorar los resultados de la clasificación supervisada empleando métodos automatizados.

Con la necesidad de obtener probabilidades *a priori* de ocurrencia, se presenta el problema de modelar la distribución geográfica potencial, de comunidades de flora y fauna, ya sea a nivel específico, o bien, de asociaciones de individuos que conforman distintos ecosistemas. Los datos disponibles para resolver este problema, generalmente consisten en una serie de puntos muestreados en campo donde se verifica directamente su presencia, misma que es georreferida a un sistema coordinado. Adicionalmente se cuenta con datos relacionados con variables bioclimáticas y topográficas acotadas al área de estudio. La finalidad es predecir aquellas áreas que satisfacen los requerimientos del nicho ecológico de la especie o asociación de ellas, y así delimitar su distribución potencial. En otras palabras, la distribución potencial determina cuales son las condiciones necesarias para la supervivencia de la especie o asociación de ellas (Phillips *et al.* 2004).

Un problema de distribución de probabilidades de ocurrencia se puede abordar desde diferentes enfoques. Una solución consiste en asegurar que la aproximación, o resultado de la modelación, satisfice cualquier restricción en la distribución que se busca, y que siendo sujeto a las reglas de ocurrencia establecidas en la modelación, el resultado debería de satisfacer la teoría del Máximo de Entropía (Jaynes 1957; Phillips *et al.* 2006).

De acuerdo con Phillips (2004), el principio de máxima entropía es un principio que establece que la distribución de probabilidad es aquella en la que, dadas unas ciertas condiciones iniciales, la desinformación es máxima y se llega a un equilibrio. Esto implica que en una situación de desconocimiento de información, la distribución estadística menos sesgada será aquella que menos información extrínseca al problema contenga.

MaxEnt es un software para la modelación de nichos ecológicos de especies mediante el cálculo de máxima entropía, escrito por Steven Phillips, Miro Dudik y Rob Schapire, con apoyo de “AT&T Labs-Research”, la Universidad de Princeton y



el Centro para la Conservación y la Biodiversidad del Museo Americano de Historia Natural. MaxEnt provee de un entorno visual que mediante raster de entrada en formato ASCII y sitios de muestreo de especies, determina el nicho ecológico en formato ASCII, para después estudiarse en software específico de Sistemas de Información Geográfica o Percepción Remota (Phillips 2004).

Como se mencionó en el apartado 2.1.2.1, una forma de obtener mejores resultados de las clasificaciones automatizadas a imágenes satelitales, es la inclusión de probabilidades a priori de ocurrencia que permitan discernir pixeles con un mismo valor de verosimilitud en algoritmos como el de MaxLike. Estas probabilidades contienen un valor que varía en un rango de 0 a 1, donde 0 representa 0% probabilidad de ocurrencia y 1 representa 100% de probabilidad de ocurrencia, definida por pixel, que finalmente ajustará la clasificación a los nichos ecológicos de las clases propuestas.

## **2.2. MODELO DE ESTUDIO.**

Como se mencionó anteriormente, la principal ventaja del uso de tecnologías geoespaciales es la posibilidad de ubicar datos en un sistema de coordenadas predeterminado, y de esta forma, asignarle atributos de referencia con respecto a otros elementos en el mismo marco de referencia. Dicho sistema de coordenadas puede ser arbitrario, para representar simulaciones en espacios ideales o teóricos, o geográfico/cartográfico, para representar datos en una ubicación real.

En el caso de la biología, la mayor parte de los procesos ecológicos-ambientales se desarrollan en un espacio geográfico que puede ser cartografiado para permitir un estudio detallado de las interacciones espaciales existentes entre los diferentes elementos.

Para el caso particular de la determinación del nicho ecológico, así como de la distribución potencial de una especie, las interacciones de los diferentes elementos



bióticos y abióticos es de especial importancia para poder generar las decisiones que determinaran la distribución especial de la especie.

Es debido a lo anterior, que la determinación del nicho ecológico y el cálculo de la distribución potencial del gorrión serrano será analizado a través de Sistemas de Información Geográfica y estudiado a través de la geomática, como un análisis espacial.

### **2.2.1. Gorrión Serrano (*Xenospiza baileyi*).**

El gorrión serrano (*Xenospiza baileyi*) es un ave pequeña, que se caracteriza por tener una longitud aproximada de 12 cm, plumaje café rojizo con una ceja gris y pecho y vientre blanquecinos con una mancha gris al centro (Berlanga *et al.* 2009).

Fue colectado por primera vez en 1888, pero fue hasta 1935 cuando fue reconocida como una nueva especie. (Bailey y Canover 1935).

Su distribución comprende dos regiones no adyacentes. La primera en los Estados de Jalisco y Durango, en la Sierra Madre Occidental (S.M.O.). –Donde por más de 50 años se consideró extinta hasta que se redescubrió una pequeña población al sur de Durango en 2002 (Oliveras de Ita-Rojas-Soto, 2005)-. La segunda región corresponde a la Cuenca de México (C.M), en los límites del Distrito Federal, Estado de México y Estado de Morelos -Donde su hábitat corresponde a los últimos remanentes de la asociación vegetal de pastizales de montaña conocida como zacatonal subalpino, en el Eje Volcánico Transversal (Rzedowski 1978, Oliveras de Ita 2002) -.

Es un ave poco visible y especialista estricta de su hábitat, correspondiente principalmente a gramíneas amacolladas de los géneros: *Festuca*, *Muhlenbergia* y *Stipa*, que conforman la comunidad de zacatonales subalpinos (Rzedowski 1978) Se considera un especialista de hábitat, ya que sólo anida en zonas cubiertas por gramíneas amacolladas altas y densas, en zonas desprovistas de árboles, por lo



que su hábitat se encuentra gravemente amenazado principalmente por la expansión de las fronteras agrícolas (avena y papa principalmente) y quemas locales para generar los rebrotes de los cuales se alimenta el ganado. (Berlanga *et al* 2009).

Durante mucho tiempo se consideró extintas las poblaciones de la S.M.O. (Jalisco y Durango); sin embargo, el redescubrimiento de una pequeña población en 2004 (Oliveras de Ita y Rojas-Soto 2005), animó los esfuerzos para la conservación de la especie, abriendo la posibilidad de implementar técnicas de Administración del Hábitat, Refuerzo Poblacional o Translocación de Individuos a Hábitats potenciales en Áreas Naturales Protegidas (Oliveras de Ita *et al* 2011).

Adicionalmente, se han generado esfuerzos para calcular la distribución potencial del gorrión serrano a nivel nacional mediante el modelado de su nicho ecológico. Lo anterior arroja resultados de subestimación o sobreestimación del hábitat – dependiendo del conjunto de variables y los sitios de muestreo empleados- lo cual genera una base teórica sólida para futuros esfuerzos de modelado mediante técnicas como la de Máxima Entropía. (Rojas-Soto *et al* 2008).

Finalmente, un estudio reciente que evalúa la diversidad genética a todas las poblaciones actuales de *Xenospiza baileyi*, muestran que se presenta poca diferenciación entre las poblaciones de la S.M.O. las del C.M. además de que existe poco intercambio genético entre poblaciones separadas por pocos kilómetros, lo que demuestra que existe una baja dispersión de la especie (Oliveras de Ita *et al* 2011).

Actualmente el *Xenospiza baileyi* es de especial atención para los organismos internacionales y forma parte de las agendas de conservación tanto a nivel nacional como internacional, ya que es considerada una de las 17 especies de aves en Peligro de Extinción en México (BirdLife 2013). Por lo que la generación de nuevas estrategias de conservación y monitoreo son vitales para la conservación de la especie.





### III. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este estudio es establecer una metodología automatizada para determinar cambios de cobertura vegetal en imágenes satelitales, empleando modelación de GARP (*Algoritmo Genético para la Producción de un Conjunto de Reglas* por sus siglas en ingles) y MáxEnt (*Máxima Entropía*). para el cálculo de probabilidades *a priori* de ocurrencia.

Con la implementación de la metodología automatizada para la clasificación de imágenes del Satélite SPOT, se valorará el hábitat del gorrión serrano al C.M. en un periodo de 5 años.

Como resultado principal se obtendrá una colección de mapas con la distribución espacial del hábitat del gorrión serrano, así como su superficie en hectáreas. Lo anterior con la finalidad de contribuir en la implementación de una estrategia de conservación para la especie, como lo es corredores entre fragmentos de vegetación.

### IV. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Obtener mapas de cobertura vegetal anual para el área de ocurrencia al C.M. empleando clasificaciones supervisadas a imágenes SPOT.
- Cuantificar el hábitat remanente para el gorrión serrano, en el C.M. es decir, la superficie de Zacatonal subalpino libre de dosel, es decir amacolladas de Zacatonal libres de vegetación en fase arbórea.
- Determinar la tendencia de conservación del hábitat en distintos intervalos de tiempo en el S.V.M. en **una ventana de tiempo de 5 años**.
- Identificar áreas con hábitat potencial en el rango de distribución de la especie a lo largo del S.V.M. para evaluar la posible translocación de poblaciones del gorrión serrano como acción de preservación a la especie.





## V. MÉTODOS E INSUMOS.

El estudio consiste en el establecimiento de una metodología automatizada para la clasificación de imágenes satelitales empleando el método de Máxima Verosimilitud (MaxLike), donde las probabilidades de ocurrencia de las clases seleccionadas serán definidas por un mapa de distribución, producto de la modelación de distribución potencial de la(s) especie(s) estudiadas. Entre algunas de sus aplicaciones se tienen: proyectos de conservación de especies, estimación de hábitat, diferenciación de subespecies en grupos consolidados de vegetación que por sus características espectrales pueden resultar complicadas de diferenciar, entre otros.

Esta metodología automatizada de clasificación supervisada emplea probabilidades a priori de ocurrencia –expuesta de manera detallada en el punto 2.1.2 del presente estudio–. Para el cálculo de las probabilidades *a priori* de ocurrencia fue necesario realizar trabajo de campo para obtener puntos de muestreo que permitieran generar una base de datos que relacionara la ubicación del *Xenospiza baileyi* con elementos bióticos y abióticos. La base de datos generada, sirvió a su vez para efectuar la modelación del nicho ecológico en GARP y MaxEnt para conocer su distribución potencial en el S.V.M.

Para efecto de su descripción, la metodología seguida en este estudio se dividió en 4 fases, que consisten en:

- Etapa de planeación y recopilación bibliográfica.
- Recopilación de datos, preprocesamiento y trabajo de campo.
- Clasificación supervisada. (Modelación del nicho ecológico del gorrión serrano, elaboración probabilidades a priori de ocurrencia y clasificación MaxLike).
- Análisis de resultados.



La metodología propuesta se presenta de manera gráfica en el siguiente diagrama de flujo, y en las páginas siguientes se detalla cada uno de los pasos realizados (dentro de estas 4 partes), para llegar a los resultados presentados.



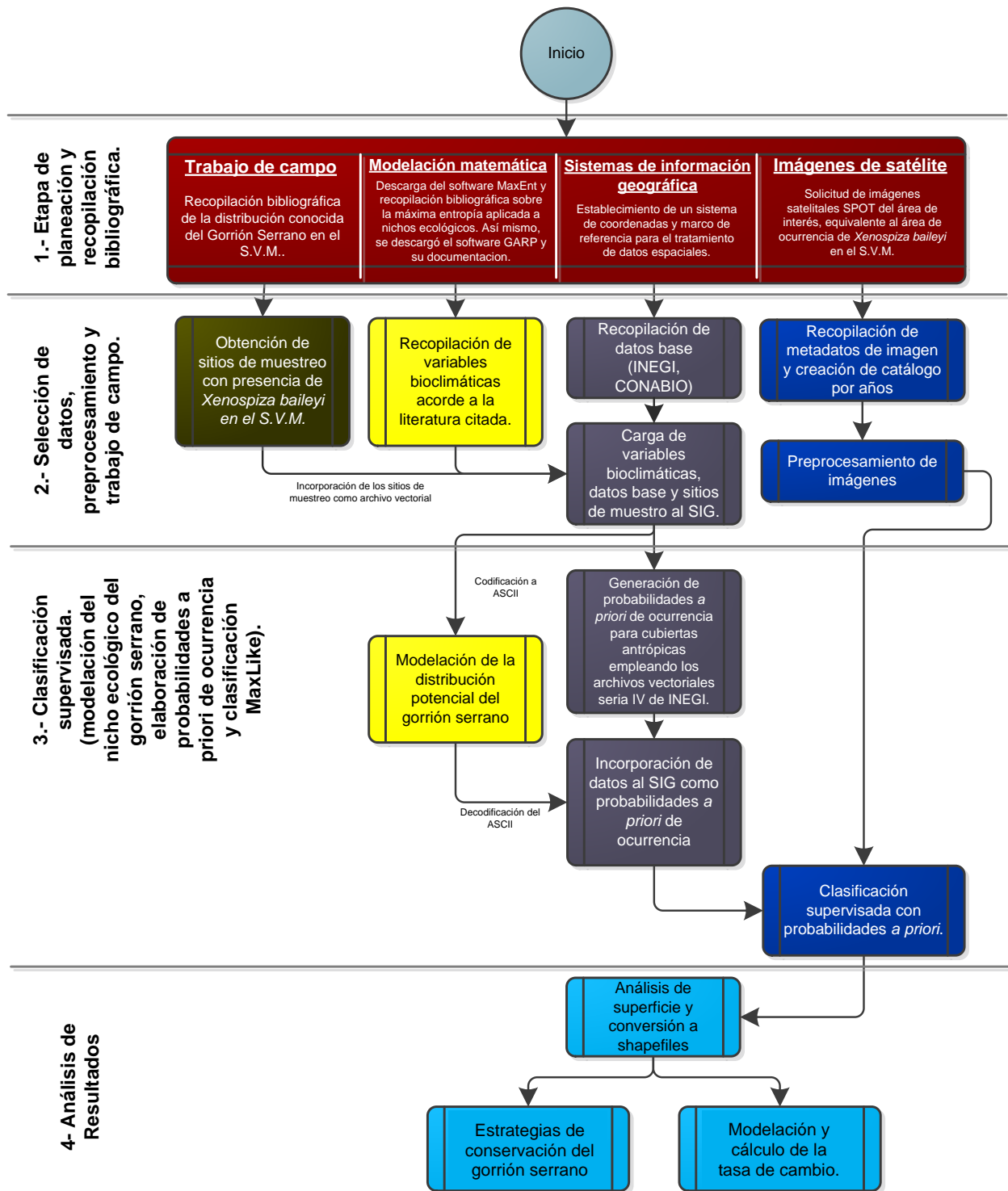


IMAGEN 2 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA LLEVADA A CABO EN EL PRESENTE ESTUDIO



## 5.1. Etapa de planeación y recopilación bibliográfica.

CONABIO a través de NABCI México (NABCI es el nombre en inglés de la Iniciativa para la Conservación de las Aves de América del Norte), ha establecido esfuerzos constantes en la conservación de las aves mediante la creación y fortalecimiento de alianzas que promueven la más amplia variedad de acciones de conservación. Es a través de los programas de conservación del gorrión serrano, que fue posible la elaboración del presente estudio.

Como primer paso en la etapa de planeación, se procedió con la selección y recopilación de artículos científicos y publicaciones relacionadas tanto con el modelo de estudio (*Xenospiza baileyi*) como con los métodos y procedimientos de clasificación de imágenes satelitales –clasificadores bayesianos y preprocesamiento de imágenes– así como de métodos para el modelado de la distribución potencial de especies –MaxEnt y GARP empleando el nicho ecológico de especies con base en los rasgos bióticos y abióticos de su hábitat–.

Para la elaboración del Sistema de Información Geográfico base empleado, se recopiló información vectorial disponible en internet de los sitios web de Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) a escalas 1:1,000,000 y 1:250,000 y que fue almacenada en una base de datos geográfica de tipo “Geodatabase” de ArcGIS.

Se estableció que la técnica para clasificar imágenes sería “Máxima Verosimilitud” toda vez, que permite el ingreso de probabilidades de ocurrencia.

Debido a que el hábitat del gorrión serrano, se encuentra altamente fragmentado (Berlanga *et al.* 2009), se buscaron imágenes que mostraran el terreno con un alto grado de detalle, característica que cumple el satélite SPOT en sus sensores HRVIR y HRV principalmente, con una resolución espacial de 10 m en *Pansharpened*. Además, se decidió que se adquirirían con fecha del periodo comprendido entre los meses de Noviembre a Marzo que corresponde a la temporada de secas; ya que



durante este periodo, las gramíneas obtienen un color pardo que las hace fácilmente diferenciables de la vegetación arbórea presente en el C.M.

### 5.1.1. Trabajo de Campo

Para poder realizar una clasificación supervisada, es necesario contar con muestreos de las diferentes coberturas o temas a clasificar en la imagen. En la fase de planeación de trabajo de campo, se realizó una recopilación bibliográfica con el fin de conocer los requerimientos de hábitat o nicho ecológico de *Xenospiza baileyi* en las poblaciones que todavía se distribuyen en el S.V.M. comprendido entre las delegaciones de Milpa Alta y Tlalpan del Distrito Federal, así como en los límites con Morelos y el Estado de México. Así mismo, se realizó una recopilación de publicaciones y capas vectoriales con los diferentes usos de suelo y vegetación del S.V.M., toda vez que a pesar de buscar una distribución potencial de *Xenospiza baileyi*, la clasificación a la imagen satelital se realizará sobre usos de suelo y coberturas vegetales en la imagen satelital de esta misma región estudiada, en la que ocurre el gorrión serrano.

### 5.1.2. Modelación Matemática

Se realizó una investigación sobre los algoritmos empleados con mayor frecuencia en la modelación de la distribución potencial de especies, así como las distintas aplicaciones que los incorpora. Resultado de lo anterior se determinó que tanto el software “*GARP (Algoritmo Genético para la Producción de un Conjunto de Reglas* por sus siglas en inglés)” como “*Maxent (Máxima entropía)*” generan modelos de nichos ecológicos aceptables basados tanto en la aleatoriedad de los modelos estocásticos empleados como en las características de los sitios de entrenamiento empelados. Ambos algoritmos arrojan distribuciones espaciales con condiciones ambientales habitables para una especie y pueden ser usados para predecir su



ocurrencia geográfica. (Townsend 2003, Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de Princeton 2013)

Tras realizar ejercicios con distribuciones de especies conocidas (donde los datos base se obtuvieron de tutoriales incluidos en la paquetería) y un análisis detallado de la literatura recolectada, se optó por Maxent sobre GARP, debido principalmente a que el segundo arroja resultados como archivos ASCII booleanos de ocurrencia (1) - no ocurrencia (0). Por lo que para poder representar los resultados como una probabilidad (0.00-1.00) o como porcentaje de probabilidad (0%-100%) es requisito correr el modelo 10 o 100 veces para posteriormente realizar una suma de los resultados y reclasificar. (Rojas-Soto et al 2008, Universidad de Kansas 2013). En el caso de Maxent, el resultado es un ASCII de máxima entropía con valores de 0.00 – 1.00, el cual, si se representa en una escala logarítmica arroja un raster comprensible que facilita su estudio y genera valores en la escala de probabilidad requerida por el método de máxima verosimilitud. (Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de Princeton 2013).

### 5.1.3. Sistemas de Información Geográfica

De acuerdo con los artículos revisados, y resultado del análisis de la distribución conocida del gorrión serrano, se estableció el uso de una proyección UTM Zona 14N ya que:

- Al encontrarse dentro de las longitudes 102°O y 96°O, la zona UTM correspondiente es la 14N.
- Conserva los ángulos.
- Para el área de estudio, no distorsiona las superficies en grandes magnitudes.



- Es un sistema que designa un punto o zona de manera concreta y fácil de localizar, lo que facilita en gran medida la ubicación y monitoreo de puntos de muestreo levantados en campo con GPS.
- La UTM es la proyección utilizada en el INEGI para su cartografía de escalas medias y grandes (no menores que 1:500,000), así como en la mayoría de otras instituciones, nacionales y del exterior.<sup>2</sup>

Además, como primer ejercicio se ubicaron en un primer mapa temático, las referencias y localidades conocidas con distribución del Gorrión Serrano para establecer un primer acercamiento al marco de referencia geográfico donde se realizaría el estudio. El mapa resultante se elaboró empleando las capas vectoriales recopiladas en el punto 5.1 y se muestra a detalle en el Mapa 1 del Anexo 1.

Al incorporar en un sistema de información la distribución conocida del *Xenospiza baileyi* se pudo establecer un área preliminar de estudio, la cual se muestra a continuación por sus coordenadas extremas:

### Área preliminar de estudio

**TABLA 3 COORDENADAS QUE COMPONEN EL ÁREA PRELIMINAR DE ESTUDIO**

	Coordenada X	Coordenada Y
Máxima	508684.379699	2130682.767774
Mínima	447128.880975	2083764.244316

---

<sup>2</sup> Hansen Francisco, INEGI. Manual de cartografía



#### 5.1.4. Imágenes de Satélite

Una vez establecida el área preliminar de estudio, se procedió –Con el apoyo de NABCI-CONABIO– a la solicitud de imágenes SPOT al área de Percepción Remota de esta misma Comisión Nacional. La razón del uso de éste tipo de imágenes, se debe a que las imágenes multiespectrales de SPOT cubren grandes extensiones de terreno a una resolución espacial moderada-alta, además de que tienen periodos de revisita (resolución temporal) cortos, por lo que fué relativamente sencillo contar con imágenes con baja cobertura de nubes del mismo periodo durante 5 años consecutivos.

Finalmente, el Mapa 2 del Anexo 1 presenta un mapa resumen de los puntos expuestos anteriormente, el diseño del mapa así como la presentación de datos vectoriales y raster fueron generados en el punto “1.- Etapa de planeación y recopilación bibliográfica”. Las localidades conocidas de gorrión –Incluidas en el mismo SIG base– y representadas en el mapa, se muestran en la siguiente tabla:

**TABLA 4 REGISTROS DE *XENOSPIZA BAILEYI* DE ACUERDO CON ROJAS-SOTO ET AL. 2008**

No.	Latitud	Longitud	Altitud
1	19.0495	-99.05339	2993
2	19.05256	-99.05603	2997
3	19.08803	-99.07889	2994
4	19.08531	-99.0865	3000
5	19.11506	-99.10131	3072
6	19.13856	-99.12139	3198
7	19.17389	-99.35619	3216
8	19.11963	-99.19445	3018





## 5.2. Selección de datos, preprocesamiento y trabajo de campo.

Una vez establecidos los parámetros iniciales que se considerarán para la realización del proyecto de tesis, se procedió con la ejecución de la fase de campo, la recopilación de los datos vectoriales necesarios para la modelación y el preprocesamiento de las imágenes satelitales proporcionados por la CONABIO. La metodología se describe a detalle a continuación.

### 5.2.1. Ejecución del trabajo de campo

Se programaron 7 visitas a campo con ayuda del M.C. Adán Oliveras de Ita, autor de varias publicaciones con relación al gorrión serrano, en colaboración de NABCI-CONABIO, durante el pico máximo de la temporada reproductiva de la *Xenospiza baileyi*. La finalidad era la de generar una base de datos con sitios de muestreo del gorrión serrano, que permitiera elaborar una modelación de su distribución potencial mediante el software de Maxent. Como se abordó en el punto 5.1.1. los sitios de muestreo se eligieron basándose en las comunidades y ambientes que integran el hábitat de *Xenospiza baileyi* definidas por Velázquez (2000); y que consisten en asociaciones de *Muhlebergiam macroura* y *Festuca lugens* (Correspondientes a Zacatón, Zacatucho o Zacate). Cabe destacar que también se emplearon registros tomados por el equipo de NABCI-CONABIO durante el censo anual de la especie.

Como se mencionó en el punto 2.2.1, el gorrión serrano es un ave especialista de hábitat (Oliveras de Ita 2002), ya que es dependiente del zacatonal. Por lo que durante la fase de campo, se puntuaron con GPS aquellas zonas con identificación de aves, ya sea cantando o alimentándose exceptuando los campos de cultivo.

Como equipo para la fase de campo, se emplearon Binoculares 8x42, un telescopio ed82 marca NIKKON y un navegador GPS marca Magellan Mobile Mapper con precisión submétrica en postproceso.



**TABLA 5 VISITA DE CAMPO Y MUESTREOS DE PRESENCIA DEL *XENOSPIZA BAILEYI***



Los sitios muestreados en campo fueron integrados en una base de datos con identificador y coordenadas UTM Zona 14N –Proyección seleccionada previamente en la fase de planeación–. Las fotografías así como las coordenadas obtenidas se presentan en el Anexo 4.



El mapa 3 del Anexo 1 presenta los sitios de muestreo levantados en campo como parte de esta tesis, así como los obtenidos por el equipo **NABCI-CONABIO** durante el censo anual de *Xenospiza baileyi* en Milpa Alta, Distrito Federal.

### 5.2.2. Recopilación de datos para la modelación matemática

Como se mencionó previamente en el punto 5.1.2, la metodología seleccionada para modelar la distribución potencial del ave, fue el de Máxima Entropía, contenido en software de Maxent.

Maxent se alimenta de variables en formato raster de tipo ASCII. Las variables empleadas en la modelación representan las características del medio físico en una extensión del terreno previamente delimitada o área de estudio. Dichas variables constituyen los ecosistemas representados en el área de estudio y pueden ser de tipo biótico o abiótico.

Durante la fase de recopilación de datos vectoriales (Punto 5.1), se generó una *Geodatabase* con datos que después de ser rasterizados y convertidos en formato ASCII, constituirían las variables a integrarían la base de datos que alimentaría el modelo.

De acuerdo con Rojas-Soto et al. (2008), el conjunto de variables que mejor ajustan un modelo de distribución potencial del ave, es el conjunto Parámetros Bioclimáticos o Variables Bioclimáticas con resolución espacial de 1 km (posteriormente se resampearán a 10 m como se muestra en el apartado 5.3.1). El conjunto de Parámetros Bioclimáticos se derivan de la temperatura y valores de precipitación mensual, con el fin de generar las variables biológicas más significativas (WorldClim, Hijmans *et al* 2005); y pueden ser descargados del Atlas Climático Digital de México del Instituto de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.

Para conocer la distribución potencial del gorrión serrano, fue necesario recopilar variables bioclimáticas específicas para alimentar el modelo de máxima entropía. De acuerdo con Rojas-Soto et al. (2008), el subconjunto de variables bioclimáticas



que mejor ajustan un modelo de máxima entropía para esta especie, corresponden a:

- B1 – Temperatura media anual
- B4 – Temporalidad de la temperatura (SD X 100)
- B12 – Precipitación anual
- B15 – Temporalidad de la precipitación (Coeficiente de variación).
- Pendiente.
- Altitud.

Las variables, representadas como capas de tipo vectorial, fueron re proyectadas al sistema de coordenadas establecido para el proyecto, así como convertidas a formato raster con un tamaño de pixel de 10 m. Las variables bioclimáticas se presentan a detalle en el Anexo 1, y corresponden a las figuras 4-9.

### **5.2.3. Elaboración del sistema de información geográfica base**

Empleando el software ArcGIS, se generó un SIG que incluyó datos base, sirviendo como marco de referencia para el estudio. Las capas incluidas en el SIG base así como sus metadatos y fuentes se incluyen a detalle en el Anexo 5.

Adicionalmente, se incorporaron los sitios de muestreo (*Xenospiza baileyi*) que se capturaron producto del trabajo de campo expuesto en el punto 5.2.1 La geoposición de estos sitios fue incorporada al SIG, tanto en formato vectorial como en formato raster.

Finalmente, se incorporaron las variables bioclimáticas elegidas para la modelación matemática. Dichas variables se incluyeron en formato vectorial y raster (\*.IMG y \*.ASCII).



#### 5.2.4. Preprocesamiento de Imágenes

Como parte del proyecto de conservación del gorrión serrano (*Xenospiza baileyi*), y con apoyo de la coordinación de NABCI en CONABIO, se contó con un catálogo de imágenes, una por año, del periodo comprendido entre el 2004 al 2008. La temporalidad del estudio (2004-2008) se debe a la disponibilidad de las imágenes, ya que las mismas debían de cumplir ciertos requisitos para ser útiles en el estudio de la vegetación en el S.V.M. Las restricciones principales son:

- Cobertura de nubes menor al 10%
- Pertenecer al periodo de secas.
- Pertenecer a los instrumentos: HRVIR1, 2 o HRG 1 (Principalmente por su resolución espacial).
- Contar con un nivel de procesamiento de 1B.

Las imágenes fueron procesadas dentro de las instalaciones de CONABIO debido principalmente a una restricción contractual entre CONABIO y la Secretaria de la Defensa Nacional (proveedor de imágenes satelitales SPOT); la cual estipula que las imágenes deberán ser de uso exclusivo de la CONABIO y con fines académicos o de investigación.

Las características técnicas de las imágenes se muestran a continuación en la siguiente tabla:





**TABLA 6 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS IMÁGENES SPOT**

Fecha	Instrumento	Indicador Espectral	Tipo de Sensor	R. Espacial
2004-01-13	HRVIR 1	XS1, XS2, XS3, XS4	Multiespectral	20 m
2004-01-13	HRVIR 1	P	Pancromática	10 m
2005-05-04	HRG 1	HI1, HI2, HI3, HI4	Multiespectral	10 m
2005-05-04	HRG 1	P	Pancromática	2.5 m
2006-04-03	HRVIR 1	XS1, XS2, XS3, XS4	Multiespectral	20 m
2006-03-03	HRVIR 2	XS1, XS2, XS3, XS4	Multiespectral	20 m
2006-04-03	HRVIR 1	P	Pancromática	10 m
2006-03-03	HRVIR 2	P	Pancromática	10 m
2007-03-02	HRVIR 2	XS1, XS2, XS3, XS4	Multiespectral	20 m
2007-04-06	HRG 1	HI1, HI2, HI3, HI4	Multiespectral	10 m
2007-03-02	HRVIR 2	P	Pancromática	10 m
2008-01-17	HRG 2	HI1, HI2, HI3, HI4	Multiespectral	10 m
2008-01-22	HRG 2	HI1, HI2, HI3, HI4	Multiespectral	10 m

**TABLA 7 CARACTERÍSTICAS GENERALES IMÁGENES SPOT**

Se presenta un detalle de los metadatos de cada una de las imágenes en la tabla 1 del Anexo 3.

Las imágenes obtenidas por la CONABIO para el desarrollo de este estudio tuvieron un nivel de procesamiento de 1B, por lo que fue necesario realizar los ajustes correspondientes para llevarlas a un nivel de procesamiento donde las mismas fueran equiparables entre sí, y se pudieran realizar mediciones con la menor deformación o desfase posible –procesamiento de 3B-. El fundamento teórico de



dicho proceso para las imágenes SPOT se describe de manera detallada en el punto 2.1.2.2.

Aquí se presenta el orden en que se efectuaron los procesos, así como una pequeña descripción del mismo:

### Correcciones Radiométricas

- I. **Conversión de número digital a radiancia.** Consiste en la conversión de los números digitales de una imagen a radiancia espectral, la cual requiere de información del Gain y Bias del sensor en cada banda. La transformación se basa en una curva de calibración de números digitales (DN) a radiancia la cual ha sido calculada por los sistemas de operación del satélite

De acuerdo con El Hajj (2008) la ecuación general para la conversión de número digital a radiancia es:

$$L_{\lambda} = (Gain * DN) + Bias \mid \text{Para SPOT 4} \text{ y } L_{\lambda} = \left( \frac{DN}{Gain} \right) + Bias \mid \text{Para SPOT 5}$$



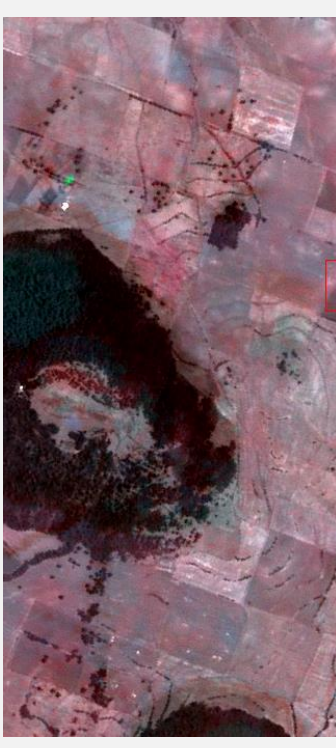
Los valores de Gain y Bias se encuentran en los metadatos de la imagen y se presentan de manera detallada en el Anexo 3.

Las imágenes fueron operadas empleando la herramienta *Raster Calculator* del módulo *Spatial Analyst* de ArcGIS.

- II. **Pansharpen.** Es un proceso donde se mezcla una imagen pancromática de alta resolución con una de tipo multiespectral para crear una imagen con la resolución espacial de la imagen pancromática, pero la información multiespectral del segundo conjunto. Para el caso de la presente tesis se empleó el módulo de Pansharpen ubicado en el conjunto de herramientas SPEAR del software ENVI, el cual genera una imagen sin la pérdida de datos multiespectrales, como sucedía con procesos manuales de Pansharpen empleados anteriormente con matemática de bandas (Chuvienco 1990).



**TABLA 8 COMPARACIÓN DE PANSHARPEN EN IMÁGENES SPOT**

Banda Pancromática	Banda Multiespectral	Pansharpen
		
		



La elección del algoritmo empleado por el proceso de pansharpen determina el nivel de degradación de las propiedades espectrales de las bandas multiespectrales al operarse. De esta forma, la transformación por el proceso de Gram-Schmidt obtiene resultados con una calidad espectral mucho mayor que los empleados mediante la transformada de Brovery. El algoritmo base para la transformación de pansharpen mide el coeficiente de correlación, brillo y contraste entre las bandas ingresadas y entre mayor sea la correlación dicho valor tenderá a uno (Documentación ENVI 4.7).

### Correcciones Geométricas

- I. **Ortorrectificación.** Consiste en la correcta georreferenciación de la imagen empleando puntos de control terrestre o de liga con otra que haya sido procesada con ortorrectificación. Para el presente estudio se emplearon ortofotos de INEGI para realizar la georreferencia de las imágenes, las ortofotos se encuentran a una escala 1:20,000 y se encuentran distribuidas gratuitamente a través del servicio WMS de INEGI a través de su servidor ANTARES. Una vez correctamente georreferidas las imágenes, se procedió con la reproyección al sistema de coordenadas empleado en este proyecto. Adicionalmente se incluyó información contenido en un Modelo Digital del Terreno (MDT), generado mediante interpolación por el proceso de Distancia Inversa Ponderado con datos extraídos de curvas de nivel cada 10 metros contenidas en información vectorial de INEGI.

Los puntos de liga fueron identificados y creados empelando el software ArcMAP siendo vinculados a una serie de Ortofotos distribuidas por INEGI mediante su servicio WMS. Así mismo la Ortorrectificación con Modelo Digital del Terreno (MDT) fue generada mediante el módulo SPEAR de ENVI.



- II. **Mosaikueo.** En aquellos casos donde el área de estudio se encontrara cubierta por más de una escena, se procedió con el mosaikueo y balanceo de color entre las imágenes, para de esta forma, cubrir en su totalidad la extensión del área de estudio que corresponde a una superficie mayor que el área de ocurrencia conocida para el *Xenospiza baileyi* en el C.M. con una sola imagen.

Una vez concluido el preproceso de las imágenes, se almacenaron en un catálogo de imágenes dentro de una base de datos geográfica (Geodatabase) y que correspondería al insumo principal para las clasificaciones supervisadas. Cuando se hubo incorporado en su totalidad la información antes mencionada en un SIG, fue posible establecer un área de estudio más fina, donde se realizarán los procesos de clasificación de imágenes y modelación. (Mapa 10 del Anexo 1).

Al tratarse de un esfuerzo en la conservación del hábitat del gorrión serrano en los pastizales en la porción del Eje Neovolcánico expuesta anteriormente, sólo se considerarán las poblaciones del sur de la Cuenca de México para el presente estudio.

El área final de estudio tiene una superficie de 1,146.57 km<sup>2</sup>, e incluye parte de las delegaciones Tlalpan, Xochimilco, Magdalena Contreras y Milpa Alta del Distrito Federal, los municipios de Tianguistenco, Ocuilan, Ocoyoacac, Juchitepec y Xalatlaco en el Estado de México y los municipios de Yautepec, Tepoztlán, Cuernavaca, Huitzilac y Tlayacapan en el Estado de Morelos que son parte de los Municipios y Delegaciones que componen la porción del Eje Neovolcánico de la Cuenca de México. Las coordenadas finales del área de estudio son:

**TABLA 9 COORDENADAS FINALES DEL ÁREA DE ESTUDIO.**

Coordenada X

Coordenada Y



Máxima	505327.564029	2128027.578698
Mínima	452879.838235	2095100.090382

### 5.3. Clasificación supervisada. (Modelación del nicho ecológico del Gorrión Serrano, Elaboración probabilidades a priori de ocurrencia y Clasificación MaxLike).

Como se mencionó anteriormente, la clasificación Maxlike es de tipo bayesiana, ya que permite incorporar probabilidades de ocurrencia de cada una de los diferentes temas a clasificar. Las probabilidades de ocurrencia son valores de 0 a 1 que pueden tener una distribución específica dentro del área de estudio o estar constituidas por constantes que asignan un mismo valor a cada pixel. Si el usuario no especifica una imagen con distribución de probabilidades de ocurrencia o una constante al realizar clasificaciones de tipo Maxlike, el software asigna probabilidades iguales a todos los temas.

Para determinar la probabilidad de ocurrencia de la comunidad de Zacatonales subalpinos diversos, (compuestos principalmente por gramíneas o pastos, en mayor cantidad por Zacates) –hábitat potencial del *Xenospiza baileyi*– se modeló su distribución potencial con base en un conjunto de variables bioclimáticas preestablecidas y recomendados por Rojas-Soto *et al.* (2008).

#### 5.3.1. Modelación del nicho ecológico del gorrión serrano.

Para alimentar el modelo de máxima entropía, fue necesario contar con sitios de muestreo donde se observó el ave, referidos a un sistema de coordenadas, así como el conjunto de variables bioclimáticas expuestas en el punto 5.2.2 en formato



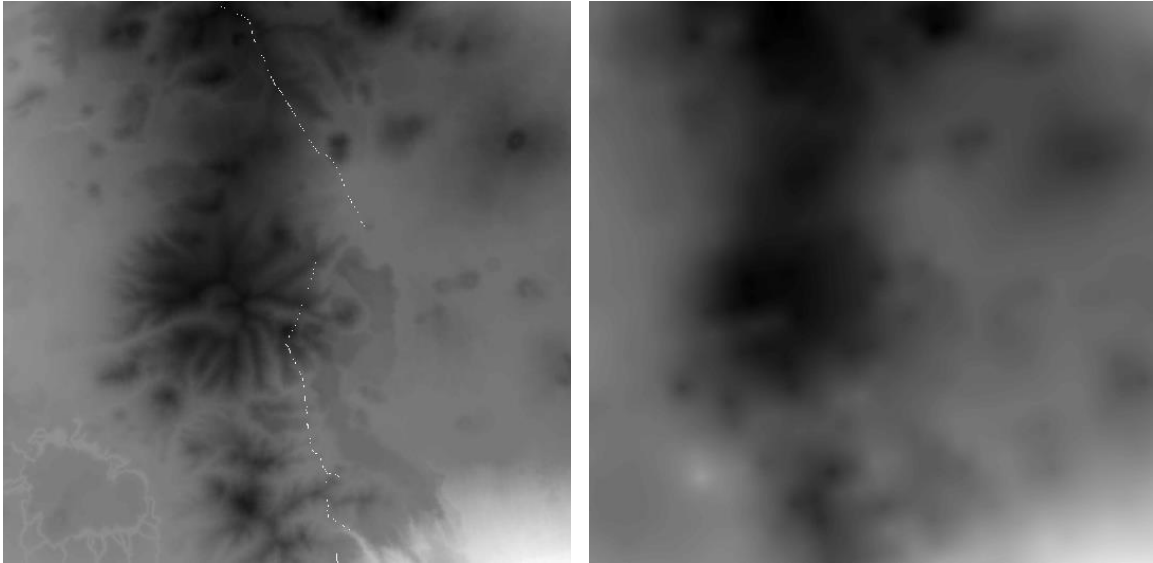
raster tipo ASCII. Es importante mencionar que la finalidad es extraer las características físicas almacenadas en las capas de las variables bioclimáticas y generar una base de datos de donde se modelará la distribución potencial.

Para el caso particular del gorrión serrano, se generó un archivo en formato CSV donde se enumeraron las localidades de ocurrencia de la especie, así como sus coordenadas UTM.

A su vez, se incorporaron las variables bioclimáticas B1, B4, B12 y B15 y las variables físicas de la pendiente y la elevación en formato ASCII. Es importante destacar que, a pesar de que las variables bioclimáticas se encuentran disponibles en una resolución espacial de 1 km, se realizó un proceso de resamplado de píxeles empleando el Modelo Digital del Terreno del área generando datos con una resolución de 10 m. (Cuervo-Robayo *et al* en revisión) Las variables bioclimáticas se presentan en formato cartográfico en su totalidad en el Anexo 1 Mapas 11-14.

Para incrementar la precisión de la modelación, se incorporaron también las 4 bandas procesadas correspondientes al año 2004 y el NDVI calculado a partir de los datos, toda vez que la información multiespectral contenida favorece la modelación de máxima entropía y permite establecer un punto de comparación con clasificaciones de otros años.





**IMAGEN 3 COMPARACIÓN DEL DETALLE ENTRE VARIABLES BIOCLIMÁTICAS A DIFERENTE RESOLUCIÓN**

De acuerdo con Rojas-Soto (2008) y con base en lo descrito anteriormente, las variables finales empleadas en la modelación son:

- Imagen SPOT 2004 (Banda 1, Banda 2, Banda 3 y Banda 4)
- Modelo Digital del Terreno (MDT, continuo de elevaciones mexicano)
- Pendientes (Calculado a partir del CEM)
- Variable Bioclimática B1 (Temperatura media anual), Temperatura media anual =  $((t_{max1} + t_{max2} + \dots + t_{max12})/12 + (t_{min1} + t_{min2} + \dots + t_{min12})/12)/2$ , en cada estación (UNIATMOS 2013).
- Variable Bioclimática B4 (Estacionalidad de la temperatura), Estacionalidad de la temperatura = desviación estándar de la temperatura media mensual \* 100, en cada estación (UNIATMOS 2013).
- Variable Bioclimática B12 (Precipitación anual), Precipitación anual =  $(prec1 + prec2 + \dots + prec12)$ , por estación (UNIATMOS 2013).
- Variable Bioclimática B15 (Estacionalidad de la precipitación), Estacionalidad de la precipitación =  $(Desviación\ estándar\ (prec1, prec2, \dots, prec12) * 100) / (1 + ((prec1 + prec2 + \dots + prec12) / 12))$ , por estación (UNIATMOS 2013).



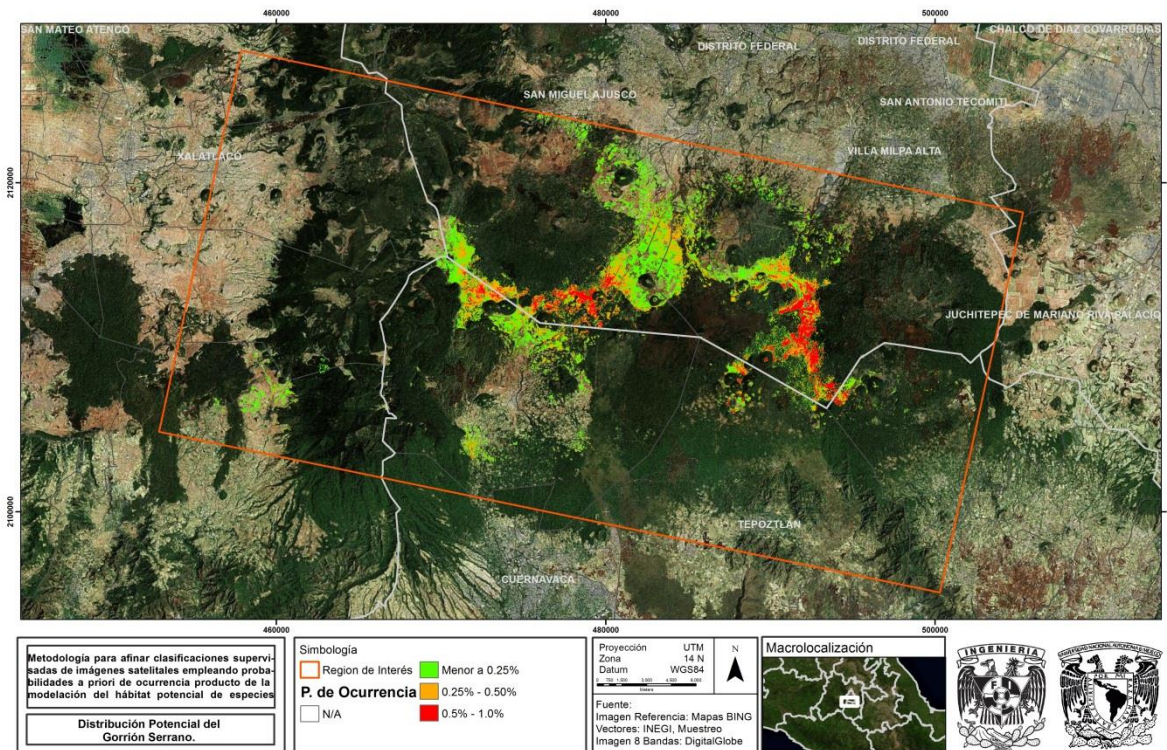


Una de las restricciones del software, es que cada capa ascii que es alimentada debe de tener las mismas dimensiones y tamaño de pixel, por lo que todas las capas fueron resampladas y recortadas para mantener los parámetros generales de la modelación que son:

Número de Columnas	5246	Esquina Y	2095088.3454487
Número de Filas	3294	Tamaño de celda	10
Esquina X	452871.02658212	Profundidad de Pixel:	32 Bits

Alimentando el software con las variables antes mencionadas, se obtiene un archivo ASCII donde cada pixel representa la probabilidad de ocurrencia de la especie, así como los resultados estadísticos como el análisis de Omisión/Comisión así como la contribución de cada variable en el modelo final. (Townsend 2003, Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de Princeton 2013)

El resultado de la distribución potencial del *Xenospiza baileyi* se muestra a continuación. (Mapa 15 del Anexo 1).



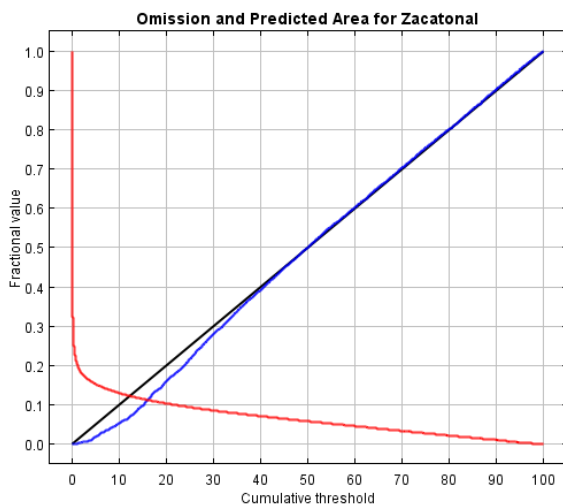
**IMAGEN 4 DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL GORRIÓN SERRANO**



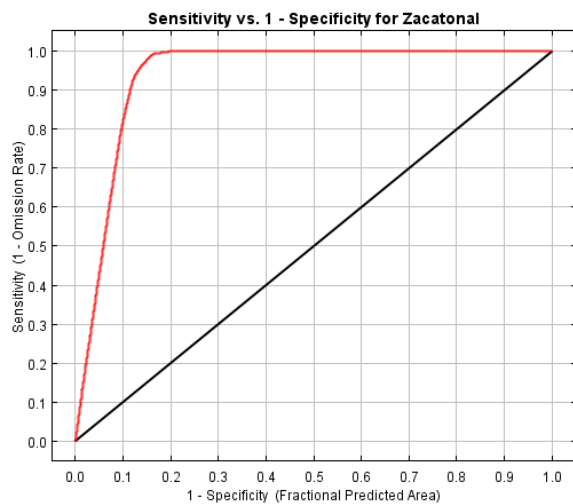
### 5.3.1.1. Análisis de omisión/comisión.

El error de omisión y comisión muestra dos graficas que evalúan el desempeño del modelo en cuanto a los valores de ocurrencia predichos, lo que facilita el establecimiento de una frontera de porcentaje que separe “presencia” de “no presente”. La primer gráfica muestra la relación entre los valores de ocurrencia modelados contra los valores elegidos como sitios de entrenamiento (En teoría debería de ser una gráfica 1:1). La segunda gráfica –comisión- muestra cómo se comporta el modelo seleccionando un conjunto aleatorio de puntos.

Las siguientes imágenes muestran la tasa de omisión y rango de predicción como una función del rango de valores total. La tasa de omisión se calcula tanto en los sitios de entrenamiento usados por el modelo, como en los sitios de validación.



**IMAGEN 5 ANÁLISIS DE OMISION Y COMISION**



**IMAGEN 6 GRÁFICA DE SENSIBILIDAD DEL MODELO**

La siguiente tabla muestra las aportaciones relativas y totales de las variables empleadas en el modelo de Maxent. La tabla de porcentajes de contribución muestra la importancia de cada variable en la modelación.





**TABLA 10 PORCENTAJE DE CONTRIBUCIÓN DE CADA VARIABLE EMPLEADA.**

<b>Variable</b>	<b>Porcentaje de contribución</b>	<b>Importancia</b>
<b>Banda 3</b>	42.6	38.5
<b>Bioclimática 4</b>	23.1	18.6
<b>Bioclimática 12</b>	10.2	11.1
<b>Banda 4</b>	8.5	12.2
<b>Banda 2</b>	6.7	0
<b>Bioclimática 15</b>	4.9	9.3
<b>DEM</b>	2.4	3.8
<b>Banda 1</b>	0.9	2.5
<b>Bioclimática 1</b>	0.7	3.6
<b>Pendiente</b>	0.1	0.4

En el Anexo 2, se presentan en detalle las curvas de respuesta por tema producto de la modelación Maxent, así como el detalle completo.

### **5.3.2. Incorporación de resultados de la modelación al SIG y generación de las probabilidades *a priori* de ocurrencia.**

Los resultados de Maxent se presentan en formato ASCII, por lo que se transformó en formato raster tipo IMG y fue incorporado al SIG para poder visualizarlo.

La modelación realizada en MaxEnt, predice exclusivamente la presencia de *Xenospiza baileyi*. Dicha distribución será de utilidad para discriminar unidades vegetales con firmas espectrales similares en la imagen satelital, pero no debe confundirse con una modelación de pastos; ya que las asociaciones de gramíneas mencionadas en el punto 2.2.1 tienen una distribución conocida mucho más extensa que la modelada para la presente tesis.

Una vez calculada la probabilidad *a priori* de ocurrencia de *Xenospiza baileyi*, se procedió con la definición de los demás tipos de coberturas presentes en la zona de estudio, para generar sitios de entrenamiento mediante fotointerpretación de imágenes satelitales de alta resolución, y para la generación de las probabilidades



*a priori* de ocurrencia correspondientes al resto de las coberturas vegetales y usos de suelo no considerados hábitat adecuado para el gorrión serrano.

Los temas (clases) definidos para la clasificación son los siguientes:

- Asentamientos humanos y vías de comunicación.
- Desprovisto de vegetación.
- **Pastizal subalpino (hábitat potencial para el *Xenospiza baileyi*).**
- Agrícola-pecuario-forestal (Caracterizado por ser una combinación uniforme entre terrenos agrícolas y vegetación nativa que no pueden identificarse como algún uso de suelo en particular).
- Vegetación arbórea media (Correspondiente a vegetación rala).
- Terrenos agrícolas.
- Vegetación arbórea densa (Correspondiente a bosques).

Para el caso de las probabilidades *a priori* de ocurrencia de los temas anteriores – con excepción del pastizal subalpino-, se empleó la serie III de INEGI. La metodología consistió en extraer las áreas con cobertura conocida de los temas correspondientes, es decir, para la clase de “Asentamientos Humanos” se extrajo de la capa vectorial aquellos polígonos etiquetados como Zona Urbana o Asentamientos humanos, para la capa de “Terrenos Agrícolas” se extrajeron aquellos polígonos etiquetados con usos Agropecuarios, y así sucesivamente.

Finalmente mediante fotointerpretación se seleccionaron sitios de entrenamiento para cada una de las clases definidas anteriormente. Dichos sitios de entrenamiento, se emplearán para el cálculo de firmas espectrales requeridas para la clasificación supervisada. Una vez digitalizados los sitios de entrenamiento, se generó un archivo de tipo raster que se incorporó al catálogo de imágenes satelitales.



### 5.3.3. Clasificación supervisada “MaxLike” empleando probabilidades de ocurrencia.

Como se ha indicado previamente, la finalidad de este proyecto de tesis es establecer una metodología automatizada para afinar el resultado de la clasificación a la imagen satelital, empleando la probabilidad de ocurrencia producto de la modelación, por lo que la metodología descrita a continuación se aplicó para cada uno de los 5 años presentes en el catálogo de imágenes y podrá ser aplicada para clasificaciones supervisadas de tipo MaxLike, siempre que se tenga la distribución potencial de las clases.

#### 5.3.3.1. Cálculo de firmas espectrales.

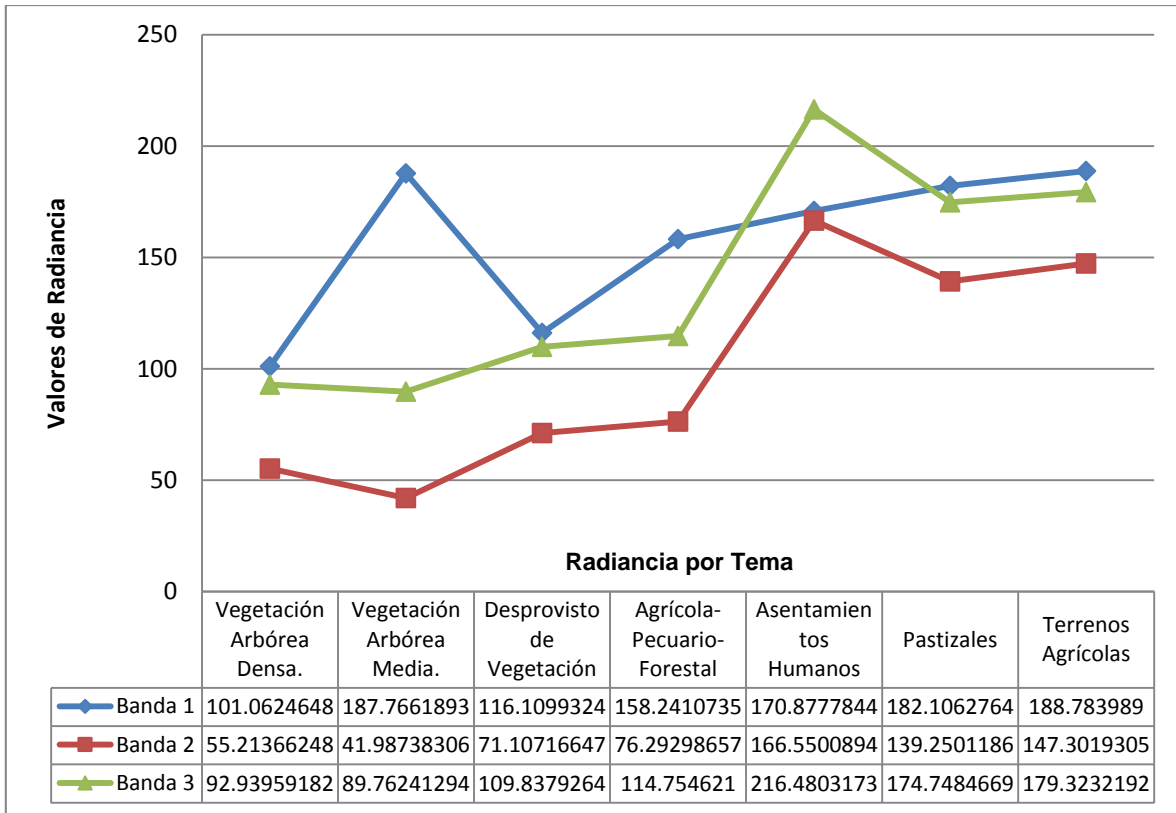
Se calcularon las firmas espectrales para cada uno de los años empleando los sitios de entrenamiento definidos mediante la fotointerpretación y trabajo de campo correspondiente. A manera de ejemplo, a continuación se presentan las curvas de respuesta espectral por tema para cada una de las bandas para el año 2004 –misma que fue empleada en la modelación de Maxent y funge como clasificación de control–.

**TABLA 11 FIRMAS ESPECTRALES REPRESENTADAS EN RADIANCIA APARENTE**

Clase	Promedio			
	Banda 4	Banda 1	Banda 2	Banda 3
Asentamientos Humanos	908.314268	170.8777844	166.550089	216.480317
Desprovisto de Vegetación	570.099368	116.1099324	71.1071665	109.837926
Pastizales	920.597645	182.1062764	139.250119	174.748467
Agrícola-Pecuario-Forestal	614.007479	158.2410735	76.2929866	114.754621
Vegetación Arbórea Media.	436.582757	187.7661893	41.9873831	89.7624129
Terrenos Agrícolas	1000.3674	188.783989	147.301931	179.323219

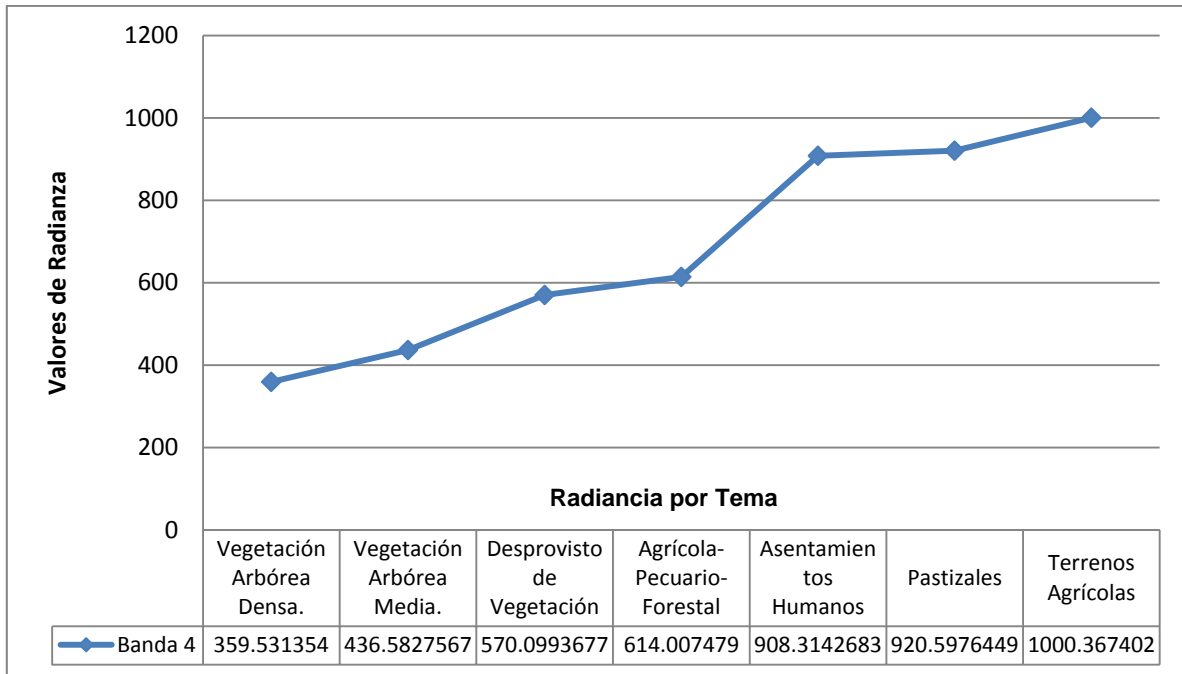


**Vegetación Arbórea Densa.** 359.531354 101.0624648 55.2136625 92.9395918



**IMAGEN 7 FIRMAS ESPECTRALES PARA LAS BANDAS 1,2 Y 3 DEL AÑO 2004 (PROMEDIO)**





**IMAGEN 8 FIRMA ESPECTRAL PARA LA BANDA 4 DEL AÑO 2004 (PROMEDIO)**

### 5.3.3.1. Clasificación supervisada Maxlike.

Se empleó el software IDRISI para realizar la clasificación supervisada de las imágenes. Una vez calculadas las firmas espectrales para los temas seleccionados, se ejecutó el proceso, seleccionando como probabilidad *a priori* las imágenes calculadas mediante Maxent. Los resultados para el conjunto de años de 2005-2008 se presentan a detalle en los mapas 16-20 del Anexo 1.





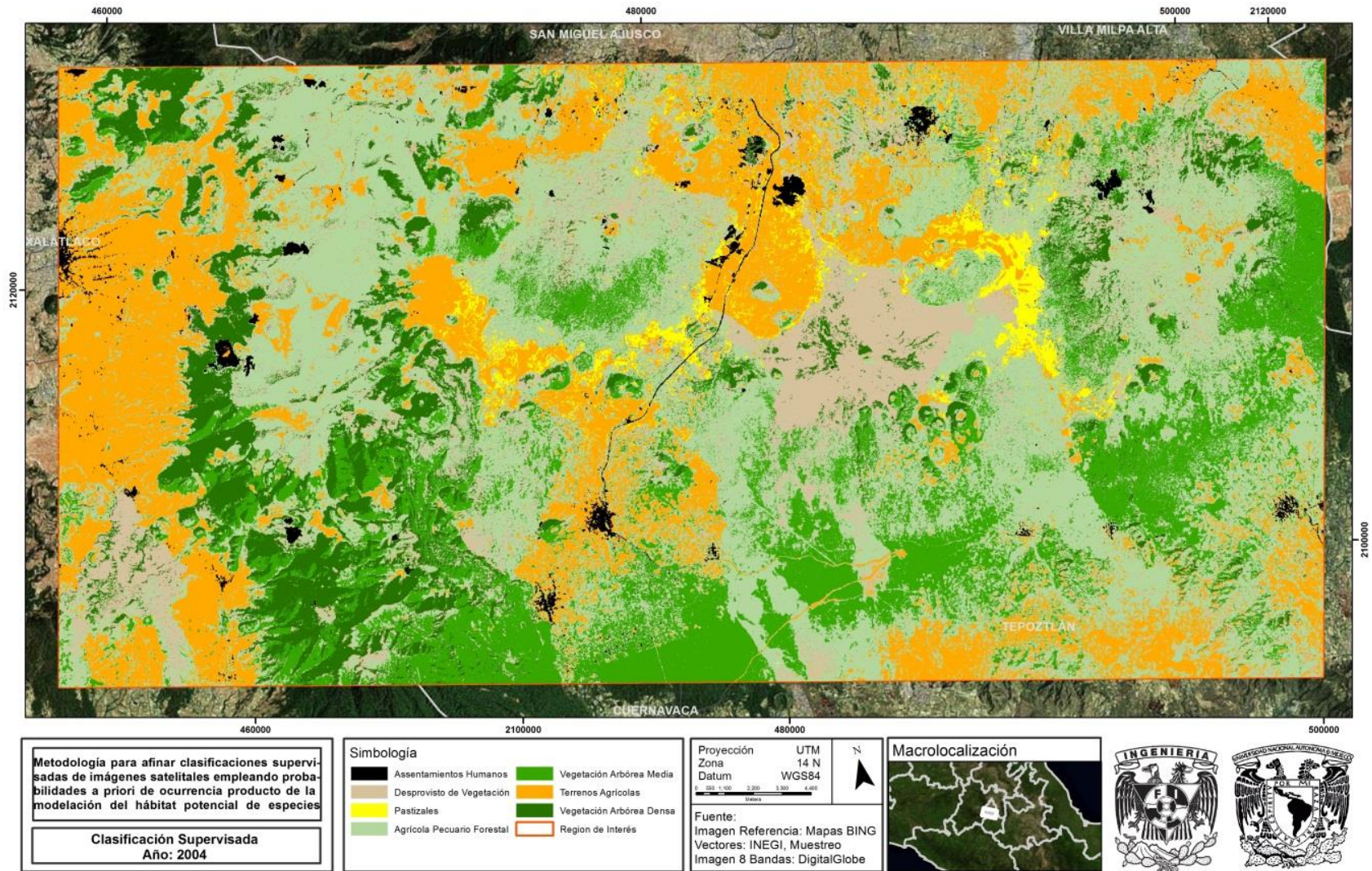


IMAGEN 9 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA. AÑO 2004.

Finalmente, los resultados se almacenaron por separado para cuantificarse y realizar los análisis de tendencia programados.

## VI. RESULTADOS

Una vez concluidas las clasificaciones a las imágenes satelitales se cuantificaron las superficies por uso de suelo, quedando los totales de acuerdo a la siguiente tabla:

Superficie del Área de Interés: 114657.41 Ha.

**TABLA 12 SUPERFICIES POR TEMA PRODUCTO DE LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.**

<b>Uso de Suelo</b>	<b>2004 Ha</b>	<b>2005 Ha</b>	<b>2006 Ha</b>	<b>2007 Ha</b>	<b>2008 Ha</b>
<b>Asentamientos Humanos</b>	1,403.50	1,535.14	1,564.11	1,648.45	1,731.40
<b>Desprovisto de Vegetación</b>	12,488.60	13,041.53	14,759.39	13,898.59	15,736.00
<b>Pastizales</b>	1,930.27	1,613.30	1,483.20	1,854.13	1,357.71
<b>Agrícola-Pecuario-Forestal</b>	44,656.55	41,402.56	38,627.59	45,312.36	46,808.62
<b>Vegetación Arbórea Media.</b>	10,711.86	12,860.01	14,899.97	10,956.35	10,164.23
<b>Terrenos Agrícolas</b>	25,377.69	26,353.10	26,340.87	23,970.11	22,765.11
<b>Vegetación Arbórea Densa.</b>	18,088.96	17,822.81	16,982.28	17,017.43	16,094.36
	<b>114,657.42</b>	<b>114,657.41</b>	<b>114,657.41</b>	<b>114,657.41</b>	<b>114,657.43</b>

Las superficies expuestas en la tabla anterior, reflejan el área de ocupación que representan los píxeles que fueron agrupados en cada uno de los temas seleccionados. Cabe destacar que la vegetación tiene un comportamiento



estacional y depende de la precipitación para realizar sus procesos metabólicos como la fotosíntesis. Por lo que las coberturas pueden agruparse de la siguiente manera:

**TABLA 13 AGRUPACIÓN DE CLASES POR TEMA.**

<b>Uso de Suelo</b>	<b>2004 Ha</b>	<b>2005 Ha</b>	<b>2006 Ha</b>	<b>2007 Ha</b>	<b>2008 Ha</b>
<b>Asentamientos Humanos</b>	1,403.50	1,535.14	1,564.11	1,648.45	1,731.40
<b>Desprovisto de Vegetación</b>	12,488.60	13,041.53	14,759.39	13,898.59	15,736.00
<b>Pastizales</b>	1,930.27	1,613.30	1,483.20	1,854.13	1,357.71
<b>Agrícola-Pecuario-Forestal / Terrenos Agrícolas</b>	70,034.24	67,755.66	64,968.46	69,282.47	69,573.73
<b>Vegetación Arbórea Media / Densa</b>	28,800.82	30,682.82	31,882.25	27,973.78	26,258.59
	<b>114,657.42</b>	<b>114,657.41</b>	<b>114,657.41</b>	<b>114,657.41</b>	<b>114,657.43</b>

### **Asentamientos Humanos**

La clase o uso de suelo definido como Asentamientos Humanos, se refiere a todas las estructuras creadas por el hombre y que componen a las zonas urbanas y asentamientos rurales.

### **Desprovisto de Vegetación**

La clase denominada como desprovista de vegetación se refiere, principalmente, a una región que sufrió un gran incendio forestal, a principios del 2000, así como todas aquellas zonas sin cobertura aparente.

### **Agrícola-Pecuario-Forestal / Terrenos Agrícolas**

El uso Agrícola-Pecuario-Forestal se refiere a aquellas coberturas donde se realizan actividades diversas que van desde su uso como potrero, hasta el cultivo temporal de plantaciones forestales o agrícolas. Es debido a la vocación de este uso de suelo



que se sumó a la clase de Terrenos Agrícolas, ya que debido al tipo de cultivo de la región (avena principalmente) se debe considerar un uso compartido debido a la multitemporalidad del estudio.

### Vegetación Arbórea Media / Densa

Como se mencionó anteriormente, la vegetación tiene un comportamiento estacional, y el verdor detectado por los sensores SPOT varía dependiendo de la precipitación, por lo que se agrupo dentro de la misma clase.

### Pastizales

En el tema específico del Gorrión Serrano, el hábitat potencial corresponde a asociaciones de Zacatonales clasificadas dentro de “Pastizales”.

A continuación se presenta una gráfica donde se muestra el comportamiento del pastizal a lo largo de la ventana de 5 años, así como un ajuste lineal representado por la gráfica de ecuación:

$$Y = -90.429X + c$$

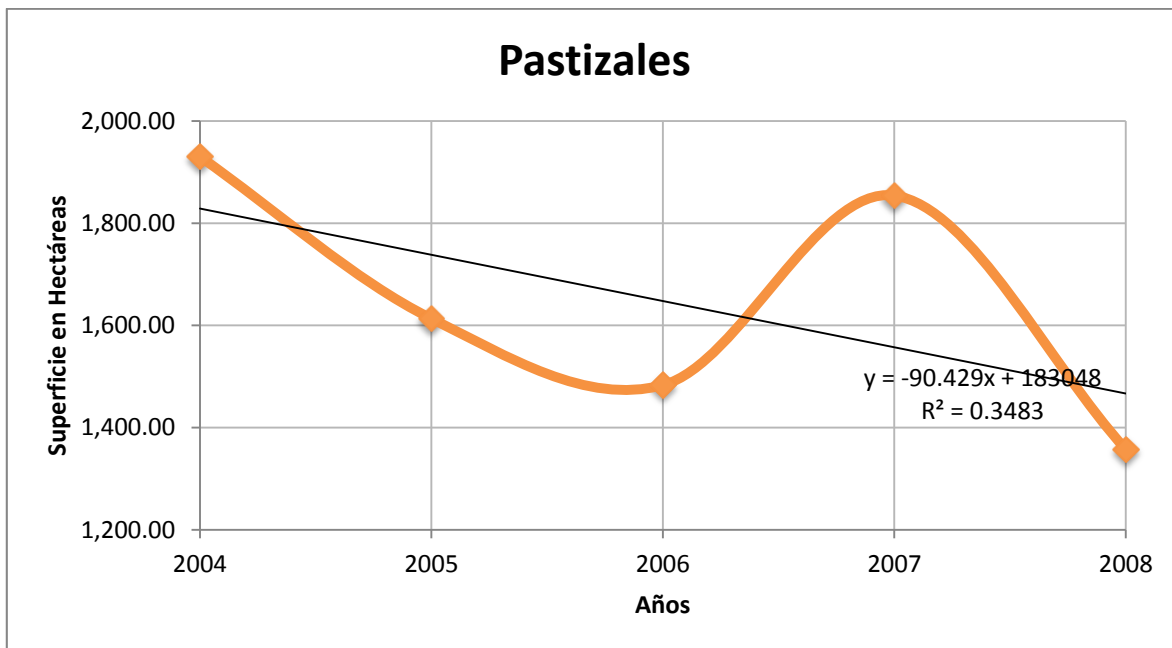


IMAGEN 10 TENDENCIA DE CONSERVACIÓN DE PASTIZALES



La pendiente negativa de la gráfica, muestra una clara disminución de **90.429 Ha** al año en el área de estudio.

Es importante destacar que, a pesar de que el Zacatonal fue clasificado dentro del tema “Pastizales”, la clase “Pastizales” en su totalidad no representa el hábitat potencial del gorrión, ya que está formada además de por Zacatonal, por otras asociaciones de gramíneas y vegetación arbustiva que comparte características espectrales con el Zacatonal. Es necesario realizar una discriminación dentro de la clase pastizal para conocer el hábitat del ave.

Para la determinación del nicho ecológico, se empleó el valor mínimo de presencia de sitios de entrenamiento como extremo inferior en el rango de presencia de la especie. Mediante sistemas de información geográfica se determinó la siguiente tabla, que muestra en orden ascendente los sitios de entrenamiento (muestreo) empleados para la elaboración del modelo Maxent y el valor correspondiente de probabilidad de ocurrencia.

**TABLA 14 PROBABILIDAD DE OCURRENCIA CON BASE EN LOS SITIOS DE ENTRENAMIENTO**

Id	x	y	Probabilidad *100
1	475640.12	2112508.08	36
2	492214.11	2112981.85	40
3	492003.77	2111362.59	41
4	491912.49	2112708.00	49
5	492233.96	2113140.60	50
6	492543.52	2111822.97	50
7	478703.76	2112914.31	51
8	478416.28	2112693.35	51
9	492059.33	2113120.75	51
10	479135.13	2112247.90	53
11	475521.05	2112441.93	54
12	492428.43	2108794.81	54
13	491662.45	2112525.44	55
14	492023.61	2112894.54	56
15	478816.31	2113137.78	57
16	491416.39	2114037.54	58

Id	x	y	Probabilidad *100
17	492261.74	2113898.63	59
18	478971.40	2112881.76	60
19	477147.84	2113307.65	61
20	492428.43	2113632.72	61
21	492527.64	2112414.32	61
22	491352.89	2112350.82	62
23	491063.17	2110453.75	62
24	490932.20	2110338.66	62
25	492341.11	2112827.07	63
26	477268.49	2112982.21	65
27	491547.36	2112454.00	65
28	492261.74	2111652.31	66
29	492444.30	2113156.47	67
30	477378.03	2113304.47	68
31	478678.73	2113354.74	68
32	478866.24	2112949.42	68
33	492182.36	2111616.60	68
34	491920.42	2111187.97	68
35	491900.58	2111029.22	68



Id	x	y	Probabilidad *100
36	478607.29	2113140.43	69
37	478660.21	2113005.49	69
38	479083.54	2112968.45	70
39	478608.08	2113063.88	70
40	478970.20	2113075.87	71
41	478996.23	2113010.78	71
42	491805.33	2112604.82	71
43	478961.83	2113132.49	72
44	479146.20	2112652.62	72
45	492110.92	2111009.38	73
46	479231.44	2112283.88	74
47	478850.71	2113034.60	75

Id	x	y	Probabilidad *100
48	479329.30	2112666.38	75
49	477544.72	2113088.57	76
50	478594.78	2113207.39	78
51	479102.06	2113055.76	78
52	492579.24	2109465.53	78
53	478565.11	2113014.38	79
54	478911.30	2113062.29	79
55	478459.02	2112991.47	80
56	478555.09	2113298.67	80
57	479124.52	2113178.34	81
<b>Valor mínimo = 36</b>			

Con los valores obtenidos anteriormente se reclasificó el raster de su distribución potencial. El mapa resultante con la distribución potencial del *Xenospiza baileyi* se presenta a continuación:





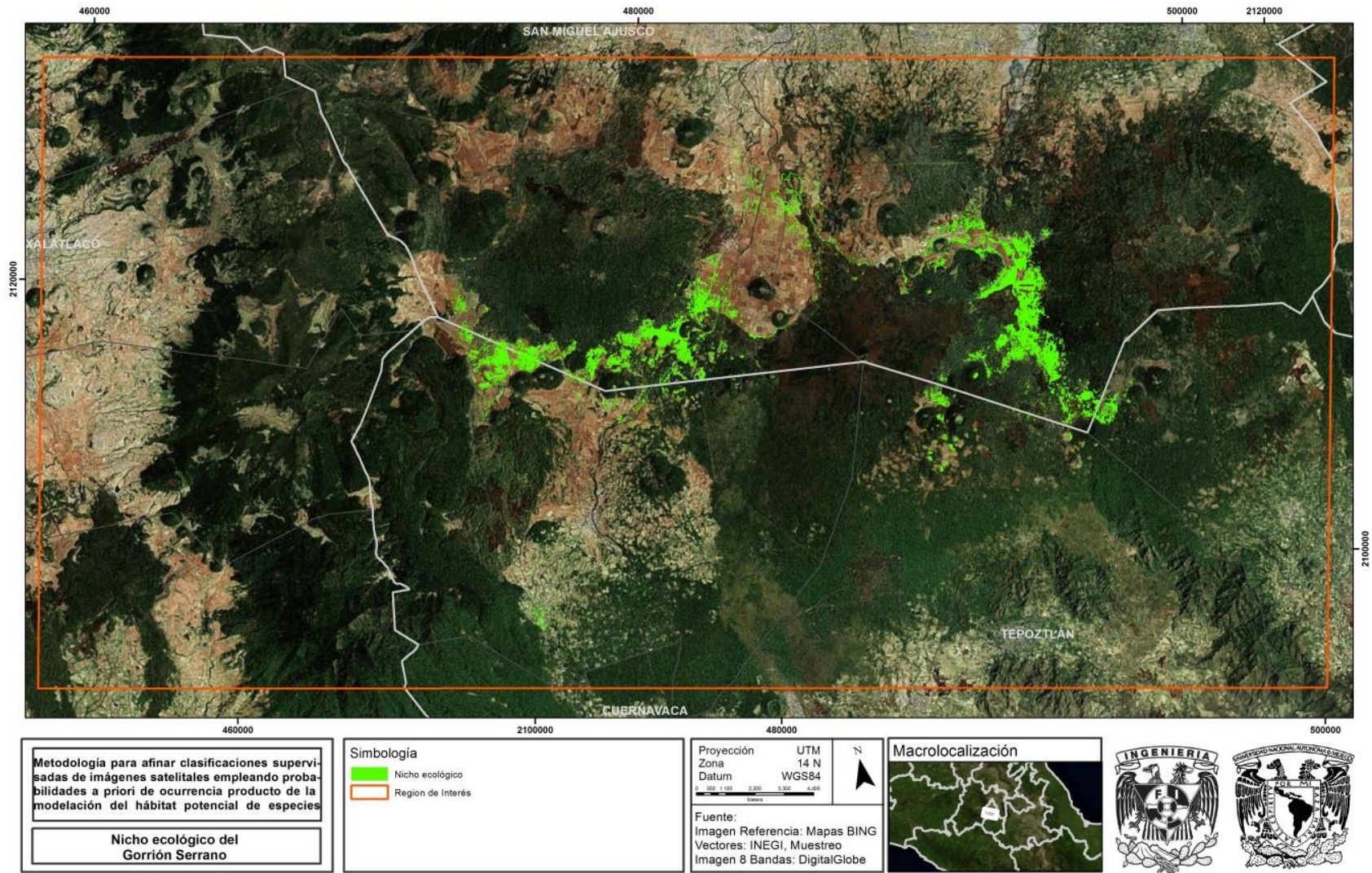


IMAGEN 11 NICHU ECOLÓGICO DEL GORRIÓN SERRANO

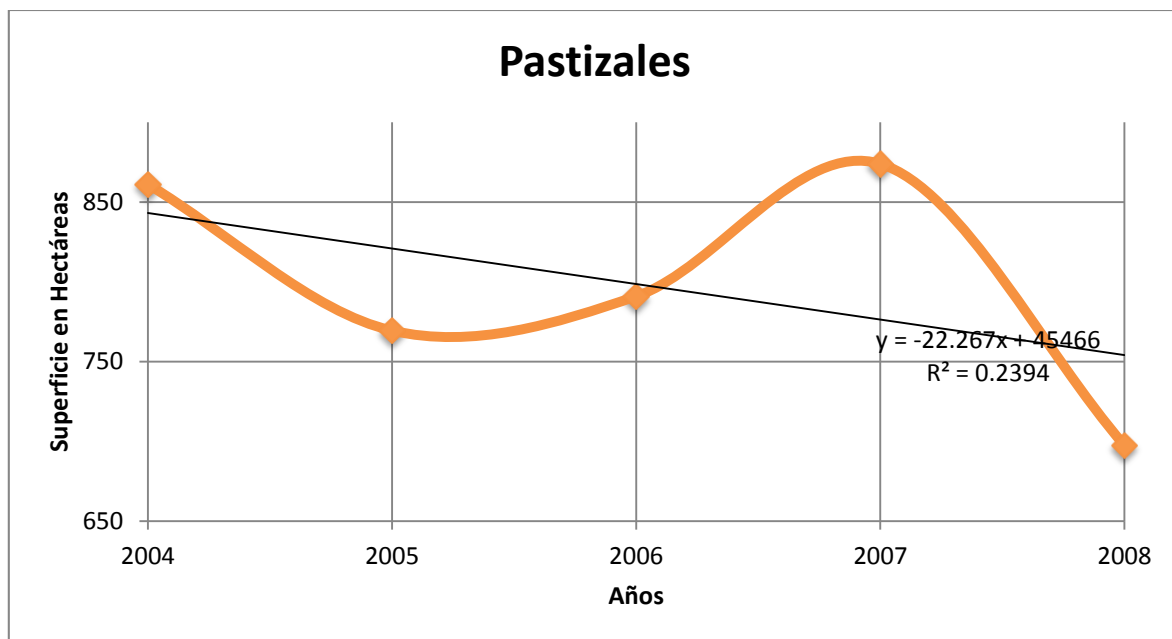
Finalmente se hizo un cruce entre las zonas clasificadas como pastizales en las clasificaciones de imágenes satelitales y la superficie determinada como nicho ecológico obtenida de la reclasificación del nicho ecológico.

**TABLA 15 SUPERFICIE REMANENTE O NICHU ECOLÓGICO DEL GORRIÓN SERRANO**

Pastizales (Ha)	2004	2005	2006	2007	2008
	861.1	769.41	790.91	873.92	697.51

A continuación se presenta una gráfica donde se muestra el comportamiento del pastizal a lo largo de la ventana de 5 años, así como un ajuste lineal representado por la gráfica de ecuación:

$$Y = -22.267X + c$$



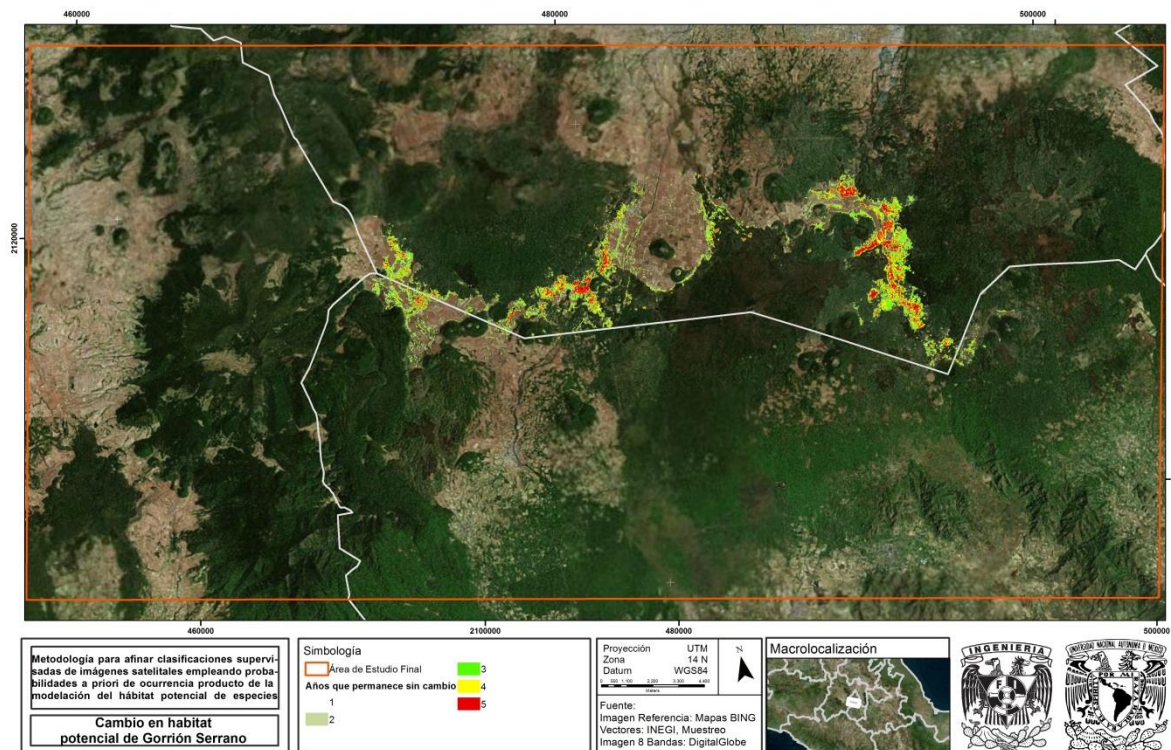
**IMAGEN 12 TENDENCIA DE CONSERVACIÓN DEL NICHU ECOLÓGICO DEL GORRIÓN SERRANO.**



La pendiente negativa de la gráfica, muestra una clara disminución de **22.267 Ha** anual en el área de estudio y una disminución de **163.59 Ha** acumulativo en la ventana de 4 años.

A continuación se realizó un análisis en SIG para determinar las zonas que permanecen con el mismo uso de suelo durante el periodo de 5 años y aquellas que cambiaron a otros usos.

Como resultado se obtuvo la siguiente imagen. (Mapa 21 Anexo 1).



**IMAGEN 13 CAMBIO EN EL HÁBITAT POTENCIAL DEL GORRIÓN SERRANO**

El mapa muestra la distribución espacial de áreas de importancia para el Gorrion Serrano. Cuantificando la superficie por pixel se obtiene la siguiente tabla:

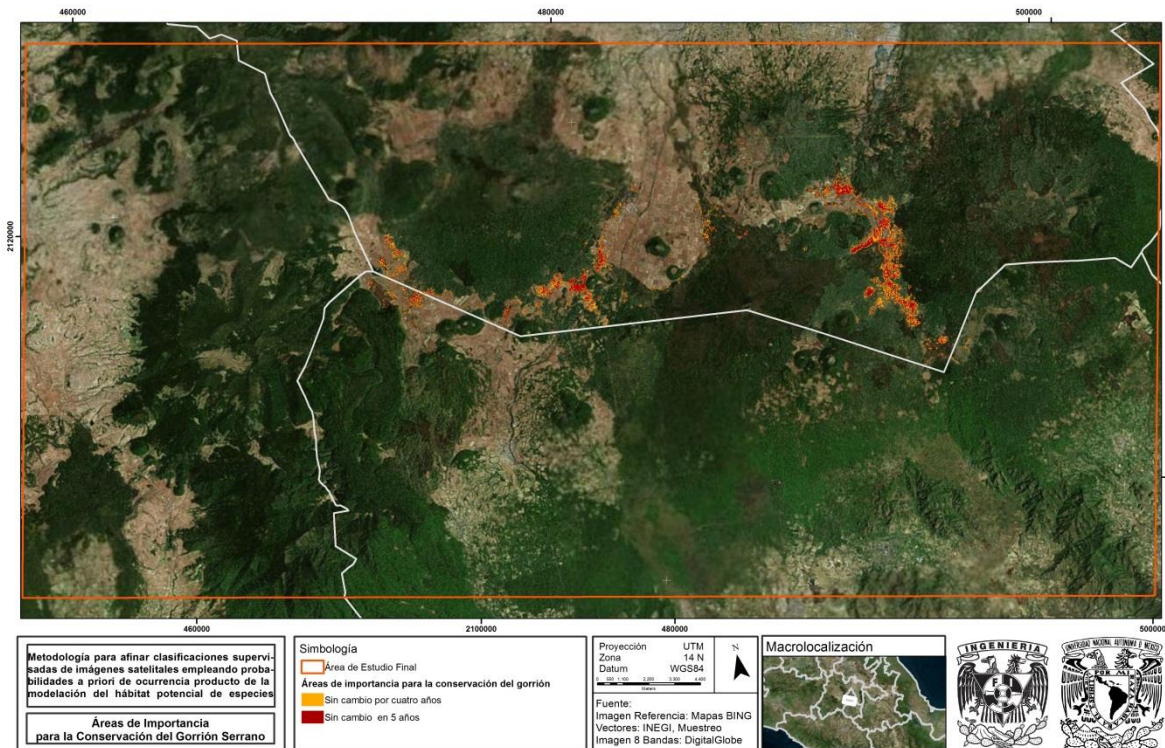




**TABLA 16 SUPERFICIES DE CAMBIO EN EL HÁBITAT DEL GORRIÓN SERRANO**

Clase	Superficie en Ha
Sin cambio en 5 años	305.07
Sin cambio en 4 años	439.66
Sin cambio en 3 años	505.78
Sin cambio en 2 años	636.34
<b>Total</b>	<b>1886.86</b>

Finalmente, con base en lo anterior se obtiene un mapa de zonificación de áreas de importancia para la conservación del Gorrión Serrano (Mapa 22 Anexo 1)

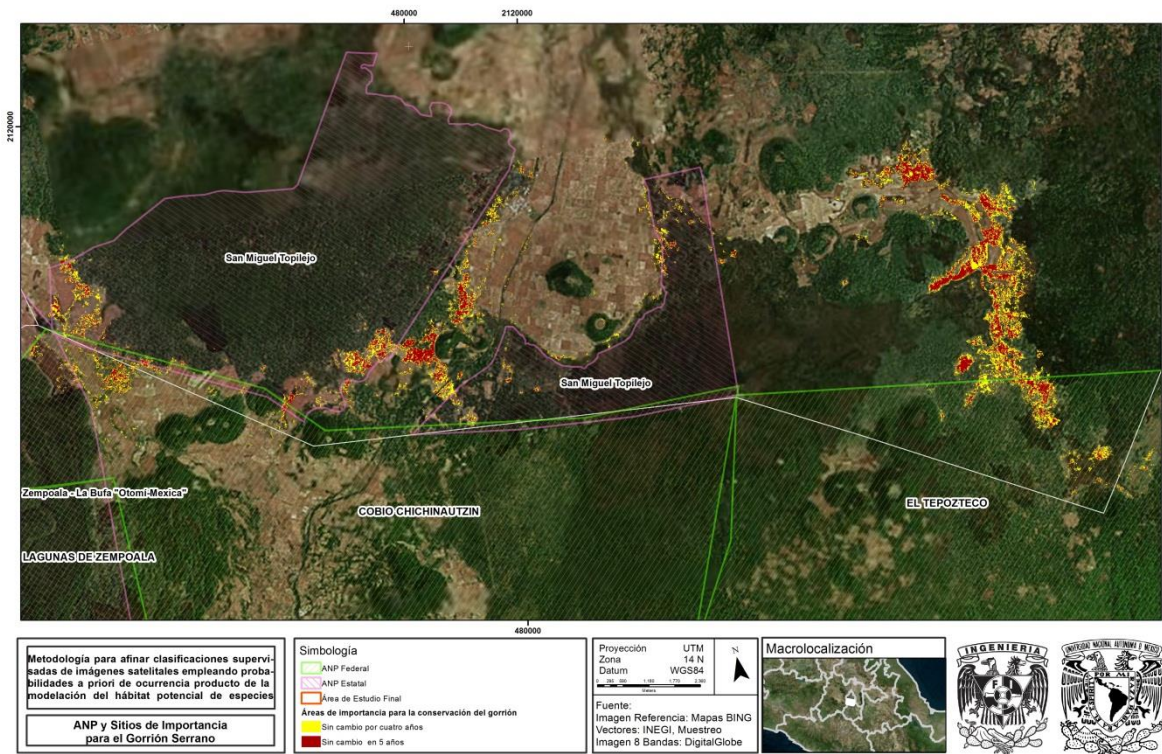


**IMAGEN 14 ÁREAS DE IMPORTANCIA PARA LA CONSERVACIÓN DEL GORRIÓN SERRANO**

El mapa muestra dos clases; la primera con una superficie de 439.66 Ha muestra las áreas que no han cambiado durante 4 años mientras que la segunda con una superficie de 305.07 Ha muestra las áreas de distribución del Gorrión que no han cambiado en un periodo de 5 años.



Empleando SIG se realizó un cruce de los datos con las capas vectoriales correspondientes a ANP de carácter Federal y Estatal. Identificando un ANP de carácter Estatal –San Miguel Topilejo- y dos ANPs de carácter Federal –El Tepozteca y Cobio Chichinautzin- donde se tiene incidencia de hábitat potencial de Gorrion Serrano como se muestra en la siguiente imagen.



**IMAGEN 15 ANP'S Y SITIOS DE IMPORTANCIA PARA LA CONSERVACIÓN DEL GORRIÓN SERRANO.**

Los resultados del análisis permiten establecer estrategias de conservación y vinculación con planes de manejo de las Áreas Naturales Protegidas, así como planes de translocación de individuos para apoyar a la conservación de la especie.



## VII. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

A pesar de su reciente creación, la geomática ha demostrado ser una herramienta especialmente útil en la gestión de los recursos naturales y territoriales. A través de sus distintas ramas de especialización la geomática, posee la característica intrínseca de analizar espacialmente los procesos y elementos encontrados en una porción de territorio.

En el caso particular del estudio de fauna silvestre, la geomática es una herramienta indispensable en el monitoreo, mapeo y análisis de la distribución, comportamiento y características de individuos que tienen un continuo desplazamiento en uno o varios hábitats –A diferencia del estudio de flora silvestre donde los individuos se encuentran estáticos y es posible el mapeo de su distribución por métodos de campo o de gabinete como al teledetección-.

Actualmente existen distintos métodos y técnicas para el estudio de fauna silvestre que tienen una injerencia total en la geomática, como lo son, el rastreo satelital, la telemetría, así como el mapeo y modelación de nichos ecológicos entre otros.

En el presente trabajo de tesis se determinó mediante métodos automatizados, el cambio de hábitat del gorrión serrano (*Xenospiza baileyi*), una pequeña ave, endémica de México, especialista de hábitat y encontrada actualmente en peligro de extinción (Berlanga *et al* 2009 y México 2010).

Al ser un ave especialista de hábitat (Oliveras de Ita 2002), el gorrión serrano depende del Zacatonal Subalpino, por lo que la determinación de hábitat remanente y las variaciones en superficie del mismo permiten a los especialistas conocer la situación actual del gorrión y generar acciones que ayuden en la conservación del mismo.

La metodología de clasificaciones supervisadas por el método de Máxima Verosimilitud “MaxLike” mostró ser una herramienta útil en la delimitación del hábitat del Gorrión Serrano, principalmente por la característica de clasificar empleando





probabilidades a priori de ocurrencia, característica heredada de los algoritmos desarrollados a partir del teorema de Bayes (Enciclopedia Stanford).

La mayor dificultad del estudio radicó en la similitud entre las firmas espectrales - calculadas sobre las imágenes satelitales- del uso de suelo “Agrícola” contra el uso “Pastizal” (que posteriormente sería clasificado como hábitat potencial para el Gorrión Serrano). Para diferenciar dichos usos, se empleó el método de probabilidades de ocurrencia, el cual facilitó la diferenciación entre usos generando buenos resultados como se puede apreciar en la tabla 12 del punto VI.

Para el cálculo de probabilidades de ocurrencia de Zacatonal, se modeló la distribución del Gorrión Serrano en la región, empleando sitios de entrenamiento, un conjunto de variables bioclimáticas y el software de modelación de especies por el método de Máxima Entropía, Maxent.

La metodología aquí descrita es de especial consideración en aquellos casos donde se requiere realizar una clasificación a una imagen satelital y se encuentran usos o clases con firmas espectrales similares. La modelación de la distribución potencial de una especie con base en su nicho ecológico permite también, la creación de capas vectoriales o raster que, ya sea como máscaras o probabilidades a priori permitan diferenciar asociaciones de vegetación similares pero con una composición de especies distintas.

Para el ejercicio se empelaron imágenes de los Satélites SPOT, resultando efectivas en la caracterización de la región. Actualmente la constelación de satélites SPOT para los periodos del 2004 al 2012 resultan los más útiles en la gestión de los recursos naturales, ya que el satélite Landsat 7 ETM+ se encuentra inhabilitado debido a fallas técnicas presentadas en el espacio.

Para la modelación de la distribución potencial del Gorrión Serrano fue necesario generar un catálogo en formato ASCII de los raster contenidos en el SIG base del proyecto; el código ASCII resulta en archivos muy pesados, y requieren de archivos adicionales para especificar proyección cartográfica. Siendo su principal ventaja ser



un formato básico que puede ser leído por la gran mayoría de los paquetes especializados en Percepción Remota y SIG.

Uno de los objetivos principales del documento fue la elaboración de una colección de mapas con la distribución espacial del hábitat del gorrión serrano, así como su superficie en hectáreas. Lo anterior con la finalidad de contribuir en la implementación de una estrategia de conservación para la especie, como lo es corredores entre fragmentos de vegetación, misma que se presenta en el Anexo 1 Cartografía del presente documento.

Así mismo se recomienda el uso de las clasificaciones supervisadas empleando probabilidades *a priori*, ya sea extraídas de cartas vectoriales como las que provee INEGI o producto de la distribución del hábitat potencial de las especies presentes en el área de estudio.

Finalmente, se identificó una tendencia de pérdida para el zacatonal subalpino. Al graficar los resultados se muestra un comportamiento de tipo senoidal entre los diferentes periodos clasificados, es decir, en el periodo 2005-2007 se muestra una tendencia (pendiente) positiva, mientras que en el periodo 2004-2005 y 2007-2008 una tendencia negativa, que se representa mediante la ecuación:  $Y = -22.267X + c$  donde la pendiente (-22.267) muestra una tendencia de pérdida de 22 Ha al año.

La ganancia-pérdida del zacatonal subalpino se debe a distintos factores, siendo el primordial el avance de la frontera agrícola en la zona. Las zonas con zacate son quemadas intermitentemente para sustituirlas por cultivos. La quema progresiva y la expansión de las tierras de cultivo, constituyen el principal factor de riesgo en la conservación del Gorrión Serrano.

Como medida de conservación, se propone establecer zonas de protección del hábitat del gorrión Serrano, existen zonas de importancia dentro de Áreas Naturales Protegidas, correspondientes a ANP de carácter Federal y Estatal. Identificando un ANP de carácter Estatal –San Miguel Topilejo- y dos ANPs de carácter Federal –El Tepozteca y Cobio Chichinautzin-. Es de vital importancia establecer estrategias de conservación y vinculación con planes de manejo de las Áreas Naturales Protegidas



mencionadas, así como planes de translocación de individuos para apoyar a la conservación de la especie.. Los mapas que muestran de manera gráfica las áreas de importancia para el gorrión así como la vinculación con las Áreas Naturales Protegidas se muestran en los Mapas 22 y 23 del Anexo 1.



## VIII. LITERATURA CITADA

AOU. 1998. The AOU check-list of North American birds. 7<sup>th</sup> edition and its supplements. American Ornithologists Union. Washington. D.C. E.U.A.

Andersen. E. B. 1980. Discrete Statistical Models with Social Science Applications. North Holland. E.U.A.

Astrium. 2012. <http://www.astrium-geo.com/es/> (Fecha de consulta 26/07/2012).

Berlanga, H. V. Rodríguez, A. Oliveras de Ita, L.A. Sánchez, y E. Iñigo Elías. Oliveras de Ita, L.A. Sánchez, y E. Iñigo Elías. 2009. Conservación de hábitat y especies: Los pastizales de montaña y el gorrión serrano en México. CONABIO. Biodiversitas, 87:11-15.

BirdLife International. 2000. Threatened birds of the world. Barcelona and Cambridge, Reino Unido. Lynx Editions and BirdLife International.

Brimicombe Allan. 2010. GIS, Environmental Modeling and Engineering. CRC Press Taylor & Francis Group. Second Edition. E.U.A. Pp 63-65. ISBN: 978-1-4398-0870-2.

Collar, Ni., LÑ. P. Gonzaga, N. Krabbe, A. Madroño Nieto, L.G. Naranjito, T. A. Parker III y D. C. Wege. 1992. Threatened birds of the Americas. The ICBP/IUCN Red Data Book. Smithsonian Institution Press / International Council for Bird Preservation. Cambridge, Reino Unido.

Cuervo-Robayo, AP. O. Tellez-Valdes, M Gomez, C Venegas-Barrera, J Manjarrez y E Martínez-Meyer. An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. International Journal of Climatology. (en revision).

Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de Princeton. Sitio: <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/> (Fecha de consulta: 30 Julio 2013.)

Dickerman, R.W., A.R. Phillips, y D.W. Warner. 1967. On the Sierra Madre Sparrow, *Xenospiza baileyi*, of México. Auk, 84:61-71.

ESRI. 2010. GIS Best Practices — Environmental Management. ESRI Press. California, E.U.A.

ESRI. 2008. GIS Best Practices —GIS And Science. ESRI Press. California, E.U.A.

Enciclopedia Stanford. <http://plato.stanford.edu/entries/bayes-theorem/> (Fecha de consulta: 01/02/2012).

Gobierno del estado de México. 2009. Monitoreo satelital a nivel estatal para el control de suelos erosionados por pérdida de cobertura vegetal y procesos de urbanización. [http://qacontent.edomex.gob.mx/idc/groups/public/documents/edomex\\_archivo/vegetcion\\_pdf\\_rep\\_veg\\_ago\\_2009.pdf](http://qacontent.edomex.gob.mx/idc/groups/public/documents/edomex_archivo/vegetcion_pdf_rep_veg_ago_2009.pdf) (Fecha de consulta 24/07/2012).



González, C. 2000. Identificación de las áreas críticas para la conservación del gorrión serrano (*Xenospiza baileyi*). Tesis de Licenciatura. UNAM, Campus Iztacala, México D.F.

Gomasca M.A. 2004. Basics of Geomatics. National Research Council of Italy, Institute for the Electromagnetic Sensing of the Environment, Milán, Italia. ISBN 978-1-4020-9013-4.

Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones y A. Jarvis, 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 25: 1965-1978.

Jaynes E.T. 1956. Probability Theory in Science and Engineering. Colloquium Lectures in Pure and Applied Science. Socony-Mobil Oil Co. E.U.A. No. 4.

Klicka J. y Spellman G. 2007. A Molecular Evaluation of the north American "Grassland" Sparrow Clade. The American Ornithologists' Union. E.U.A. 124 Pp 537-551.

Lorenzo M. y R. González. 2007. Cartografía, Herramienta para el desarrollo sostenible. Federación Galega de Municipios e Provincias. España. Pp 16-18. ISBN: 978-84-611-8791-1.

México. 2010. Norma Oficial Mexicana 059-SEMARNAT-2010 Protección ambiental — especies nativas de México de flora y fauna silvestres — categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio — lista de especies en riesgo.

Montes de Oca M. 1989. Topografía. Ediciones Alfaomega S.A. de C.V. Cuarta Edición. México. Pp 1-2. ISBN 968-6062-04-1.

NABCI. CONABIO 2013. [http://www.conabio.gob.mx/otros/nabci/doctos/nabci\\_principal.html](http://www.conabio.gob.mx/otros/nabci/doctos/nabci_principal.html) (Fecha de consulta: 21/01/2013)

NASA. 2012. Measuring Vegetation (NDVI & EVI).  
[http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring\\_vegetation\\_3.php](http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_3.php)  
(Fecha de consulta: 14/11/2011)

Navarro, S.A. y H. Benítez. 1995. El dominio del aire. La Ciencia desde México. Fondo de Cultura Económica. México D.F.

Núñez, J.M.; Y. Rodríguez; K. Carrillo y J.M. Madrigal. 2010. Esquema para el monitoreo de impacto sobre la cubierta forestal en corredores biológicos de Chiapas. XIV Simposio SELPER, Guanajuato, México. ISBN 978-607-441-100-3.

Oliveras de Ita A. 2002. Dinámica poblacional e historia natural del Gorrión Serrano (*Xenospiza baileyi*). Tesis de Licenciatura. UNAM. Ciudad Universitaria. México D.F.

Oliveras de Ita, A., Gómez de Silva, H. M. Grosselet, 2001. Population dynamics and natural history of the Sierra Madre Sparrow *Xenospiza baileyi* at La Cima, México. Cotinga 15 (2001). Pp 43-47.

Oliveras de Ita, A., Rojas-Soto, O., 2005. A survey for the Sierra Madre Sparrow (*Xenospiza baileyi*), with its rediscovery in the state of Durango, Mexico. Bird Conservation International (2005) 15.



Oliveras de Ita et. al. 2011. Genetic evidence for recent range fragmentation and severely restricted dispersal in the critically endangered Sierra Madre Sparrow, *Xenospiza baileyi*. Springer Science+Business Media B.V.

Rojas-Soto O., E. Martínez-Meyer, A.G. Navarro-Siguenza, A. Oliveras de Ita, H. Gómez de Silva y A. T. Peterson. 2008. Modeling distributions of disjunct populations of the Sierra Madre Sparrow. *J. Field Ornithol.* 79(3) Pp 245-253.

Phillips S. et al. 2004. A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning.* E.U.A. Pp 655-662.

Phillips S. et al. 2006. Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions. *Ecological Modelling.* 190. E.U.A. Pp 231-259.

Piwowar J. M. 2001. *Getting Your Imagery at the Right Level.* Cartouche. No 41. USA.

Rainer Andreas R. 2009. *Aplicaciones de Geomática para el corredor biológico mesoamericano México.* Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad Corredor Biológico Mesoamericano. México.

Richards, J.A., 1986. *Remote Sensing Digital Image Analysis,* Berlin: Springer-Verlag.

Sanderson R. 2007. *Introduction to remote sensing.* New México Space Grant Consortium.

Toledo, V.M. 1988. La diversidad biológica de México. *Ciencia y Desarrollo* 81:17-30

Townsend P. 2003. Predicting the geography of species' invasions via ecological niche modeling. *The quarterly review of biology.* E.U.A. 78. Pp 419-433.

UNAM. Variables Bioclimáticas. <http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml/> (Fecha de consulta: 1 de Julio de 2010).

UICN. (2009). Más que nunca, las aves críticamente amenazadas en la Lista Roja de UICN Comisión de Supervivencia de Especies de la UICN. UICN, Gland, Suiza y Cambridge, Reino Unido. (Fecha de consulta 21 de Enero de 2013).

Universidad de Kansas. Desktop GARP. <http://www.nhm.ku.edu/desktopgarp/> (Fecha de consulta: 8 de Agosto de 2013)

UNIATMOS. 2013. Atlas Climático Digital de México. <http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/uniatmos> (Fecha de consulta: 30 de Julio de 2013)

USGS. 2001. HYDROK1 elevation derivative database, U.S. geological survey. Disponible en: [http://eros.usgs.gov/#/Find\\_Data/Products\\_and\\_Data\\_Available/gtopo30/hydro/namerica](http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/gtopo30/hydro/namerica) (Fecha de consulta: 1 de Julio de 2010).

Philpot W.. 2011. *Vegetation Indices (VI).* Cornell University. CEE 6150: Digital Image Processing.



Walsh B. 1995. Extinction: Lecture Notes by Bruce Walsh.  
<http://nitro.biosci.arizona.edu/courses/EEB105/lectures/extinction/extinction.html> Consultado (30 de Julio 2013)

Weng Qihao. 2010. Remote Sensing and GIS Integration. Theories, Methods, and Applications. Mc Graw Hill. USA ISBN: 978-0-07-160654-7.

