



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**MAESTRÍA EN MANEJO DE AGROECOSISTEMAS  
Y RECURSOS NATURALES**

**“ESTUDIO MULTITEMPORAL DE LOS PATRONES DE FRAGMENTACIÓN DE  
LA VEGETACIÓN DE LA SIERRA FRÍA, AGUASCALIENTES, MÉXICO”**

**T E S I S**

**QUE PRESENTA**

***DANIEL EUGENIO CHAPA BEZANILLA***

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**TUTOR**

**DR. JOAQUÍN SOSA RAMÍREZ**

**AGUASCALIENTES, AGS.,**

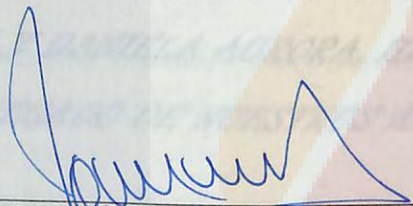
**DICIEMBRE DE 2003**

TESIS REALIZADA BAJO LA DIRECCIÓN DEL CUERPO TUTORIAL  
DESIGNADO Y QUE HA SIDO REVISADA Y APROBADA COMO  
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

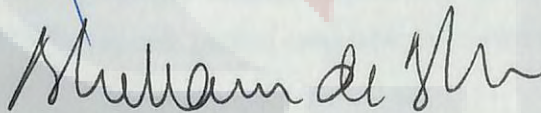
**MAESTRO EN CIENCIAS  
EN MANEJO DE AGROECOSISTEMAS Y  
RECURSOS NATURALES**

**CUERPO TUTORIAL**

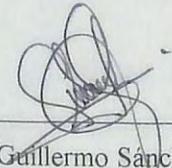
TUTOR:

  
Dr. Joaquín Sosa Ramírez

ASESOR:

  
M. en C. Abraham de Alba Ávila

ASESOR:

  
Dr. Guillermo Sánchez Martínez



## DEDICATORIA

A MI AMADA ESPOSA REBECA SILVA MEZA, ÁNGEL TUTELAR DE MI EXISTENCIA, POR QUIEN COBRAN SENTIDO TODOS MIS AFANES.

A MIS QUERIDOS HIJOS, JUAN MANUEL, ANA REBECA, ALICIA DEL CARMEN Y DANIELA AURORA, HEREDEROS DEPOSITARIOS DEL MEJOR LEGADO DE NUESTROS ANCESTROS: LA EDUCACIÓN.

A MIS QUERIDOS PADRES DON SEVERO, DOÑA CARMEN Y DOÑA ALICIA, A QUIENES DEBO LA VIDA.

**LA VOLUNTAD, ES EL EJERCICIO DE LA FÉ**

ANONIMO

## RECONOCIMIENTOS

Deseo agradecer de manera especial al Dr. Joaquín Sosa Ramírez su paciencia y entusiasmo que sirvieron de ejemplo para llevar a término este trabajo.

Al M. C. Abraham de Alba Ávila por sus enseñanzas durante los cursos de la maestría y por su desinteresado apoyo en la revisión de este trabajo.

Al Dr. Guillermo Sánchez Martínez, cuya sencillez no logra enmascarar sus vastos conocimientos, lo que me hace sentir orgulloso por haber aceptado asesorar este trabajo.

Al M. C. Sergio Soriano Vallés, compañero y amigo, quien tuvo la mejor disposición para asesorar y revisar esta tesis.

Al Dr. Jesús Meraz Jiménez, quien desinteresadamente aceptó revisar el escrito de la tesis y aportó valiosos comentarios y sugerencias para su conclusión.

A la memoria de mi amigo el Ing. Carlos Ortega, incansable estudioso de la naturaleza y en especial de la Sierra Fría, quien por mediación de su distinguida esposa Doña María del Rosario "Tatis" Villalobos Llamas proporcionó las fotografías aéreas de la zona de estudio para 1956, lo que hizo posible completar los materiales de trabajo.

A la Ing. Ma. Elena Flores Maldonado, por su valiosa amistad, que gracias a sus consejos y apoyo me fue posible alcanzar el desarrollo profesional que me ha permitido trascender.

Al M. C. Amós Antonio Pérez Hernández, por su atinada participación en la definición del modelo de análisis aplicado en esta tesis, por su valiosa amistad y por su gran ejemplo de templanza y conocimiento de la vida.



A mi colega, amigo y hermano, Biol. Jorge Rosales Hernández, quien amablemente me brindó la posibilidad de obtener información valiosa utilizada en su tesis de licenciatura, para fortalecer el marco conceptual de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Sistema Miguel Hidalgo y a La Fundación Produce Aguascalientes por al apoyo financiero al proyecto “Diversidad, Productividad y Manejo de Ecosistemas de Pastizales –Encinares de la Sierra Fría, Aguascalientes. Clave: 20000206007, dirigido por el Dr. Joaquín Sosa Ramírez.

A la Asociación Sierra Fría A. C., por todo el apoyo brindado

A todo el cuerpo académico de la maestría, mi agradecimiento.

|         |                                                                                        |    |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1       | IMPORTANCIA DE LOS BOSQUES TEMPLADOS EN MÉXICO                                         | 3  |
| 1.1     | ECOLOGÍA DEL PAISAJE                                                                   | 7  |
| 2       | DINÁMICA DE LA ESTRUCTURA DE LA VEGETACIÓN                                             | 8  |
| 2.1     | METODOLOGÍA                                                                            | 11 |
| 2.1.1   | CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO                                                  | 11 |
| 2.1.2   | RECURSOS MATERIALES                                                                    | 12 |
| 2.1.3   | GENERACIÓN DE LA BASE DE DATOS                                                         | 12 |
| 2.1.3.1 | CONVERSIÓN DE FORMATO ANALÓGICO A DIGITAL                                              | 12 |
| 2.1.3.2 | CORRECCIÓN GEOMÉTRICA DE LAS FOTOGRAFÍAS                                               | 13 |
| 2.1.3.3 | GENERACIÓN DEL MOSAICO DE FOTOGRAFÍAS                                                  | 14 |
| 2.1.3.4 | DEFINICIÓN DE CATEGORÍAS INFORMATIVAS                                                  | 15 |
| 2.1.4   | TECNICAS DE ANÁLISIS                                                                   | 16 |
| 2.1.4.1 | ANÁLISIS POR COMPARACIÓN DE ÁREAS                                                      | 16 |
| 2.1.4.2 | ANÁLISIS DEL NÚMERO DE MODALES POR CATEGORÍA INFORMATIVA                               | 16 |
| 2.1.4.3 | ESTIMACIÓN DE LA COBERTURA DE VEGETACIÓN POR FRECUENCIA DE VALORES DE PIXEL            | 17 |
| 2.1.4.4 | ANÁLISIS DE HOMOGENEDAD DE LOS MODALES MEDIANTE EL CÁLCULO DE ÍNDICES DE FRAGMENTACIÓN | 18 |
| 3       | RESULTADOS                                                                             | 18 |
| 3.1     | BOSQUE DE ENCINO                                                                       | 21 |

## CONTENIDO

| TEMA                                                                                                | Página |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| RELACIÓN DE CUADROS.                                                                                | vi     |
| RELACIÓN DE GRÁFICAS.                                                                               | vi     |
| RELACIÓN DE FIGURAS EN ANEXO I.                                                                     | vii    |
| 1. INTRODUCCIÓN.                                                                                    | 1      |
| 1.1 OBJETIVOS                                                                                       | 3      |
| 1.2 HIPÓTESIS                                                                                       | 3      |
| 1.3 IMPORTANCIA DE LOS BOSQUES TEMPLADOS EN MÉXICO.                                                 | 3      |
| 1.4 LA TECNOLOGÍA AEROESPACIAL.                                                                     | 5      |
| 1.5 ECOLOGÍA DEL PAISAJE.                                                                           | 7      |
| 1.6 LOS MODELOS DE FRAGMENTACIÓN EN EL ESTUDIO DE LA<br>DINÁMICA DE LA ESTRUCTURA DE LA VEGETACIÓN. | 8      |
| 2. METODOLOGÍA.                                                                                     | 11     |
| 2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.                                                          | 11     |
| 2.2 RECURSOS MATERIALES.                                                                            | 12     |
| 2.3 GENERACIÓN DE LA BASE DE DATOS.                                                                 | 12     |
| 2.3.1 CONVERSIÓN DE FORMATO ANALÓGICO A DIGITAL.                                                    | 13     |
| 2.3.2 CORRECCIÓN GEOMÉTRICA DE LAS FOTOGRAFÍAS.                                                     | 13     |
| 2.3.3 GENERACIÓN DEL MOSAICO DE FOTOGRAFÍAS.                                                        | 14     |
| 2.3.4 DEFINICIÓN DE CATEGORÍAS INFORMATIVAS.                                                        | 15     |
| 2.4 TÉCNICAS DE ANÁLISIS.                                                                           | 16     |
| 2.4.1 ANÁLISIS POR COMPARACIÓN DE ÁREAS.                                                            | 16     |
| 2.4.2 ANÁLISIS DEL NÚMERO DE RODALES POR CATEGORÍA<br>INFORMATIVA.                                  | 16     |
| 2.4.3 ESTIMACIÓN DE LA COBERTURA DE VEGETACIÓN POR<br>FRECUENCIA DE VALORES DE PÍXEL.               | 17     |
| 2.4.4 ANÁLISIS DE HOMOGENEIDAD DE LOS RODALES<br>MEDIANTE EL CÁLCULO DE ÍNDICES DE FRAGMENTACIÓN.   | 18     |
| 3. RESULTADOS.                                                                                      | 18     |
| 3.1 BOSQUE DE ENCINO.                                                                               | 21     |



|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 3.2 BOSQUE DE TÁSCATE.          | 21 |
| 3.3 BOSQUE DE PINO.             | 22 |
| 3.4 BOSQUE DE ENCINO – TÁSCATE. | 23 |
| 3.5 BOSQUE DE ENCINO – PINO.    | 23 |
| 3.6 MATORRAL DE PINGÜICA.       | 24 |
| 3.7 PASTIZAL.                   | 24 |
| 4. DISCUSIÓN.                   | 25 |
| 5. CONCLUSIONES.                | 27 |
| 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.  | 29 |
| 7. ANEXO I: FIGURAS.            | 32 |

|          |                                                                                                 |    |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Cuadro 5 | Número de hectáreas de agrupaciones de tipos de vegetación por estructura, para las tres fechas | 20 |
| Cuadro 6 | Número de rodales por fecha, por tipo de vegetación                                             | 21 |
| Cuadro 7 | Número de hectáreas por grado de fragmentación, por bosque de origen en 1958, 1973 y 1993       | 26 |

## RELACIÓN DE CUADROS

| CUADRO   | DESCRIPCIÓN                                                                                                                                                                                           | PÁGINA |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Cuadro 1 | Principales especies arbóreas de la Sierra Fría.                                                                                                                                                      | 5      |
| Cuadro 2 | Ejemplo de cuadro de puntos de control con sus residuales y error medio cuadrático de cada punto, resultante del proceso de corrección geométrica de la fotografía No. 5, línea de vuelo No. de 1970. | 14     |
| Cuadro 3 | Atributos para el mapa de ocupación del suelo generado para las fotografías de 1956, 1970 y 1993.                                                                                                     | 15     |
| Cuadro 4 | Resultado del cálculo de áreas por tipo de vegetación para cada fecha y resultados de la regresión lineal para cada intervalo de fechas.                                                              | 19     |
| Cuadro 5 | Número de hectáreas de agrupaciones de tipos de vegetación por estructura, para las tres fechas.                                                                                                      | 20     |
| Cuadro 6 | Número de rodales por fecha, por tipo de vegetación.                                                                                                                                                  | 21     |
| Cuadro 7 | Número de hectáreas por grado de fragmentación, para bosque de encino en 1956, 1970 y 1993.                                                                                                           | 26     |



## RELACIÓN DE GRÁFICAS

| GRÁFICA    | DESCRIPCIÓN                                                                                                                                                                                                                | PÁGINA |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Gráfica 1  | Distribución de frecuencias de los valores de píxel del bosque de encino, para las fotografías de las tres fechas.                                                                                                         | 17     |
| Gráfica 2  | Número de hectáreas por año de los tipos de vegetación agrupados por estructura.                                                                                                                                           | 20     |
| Gráfica 3  | Distribución de frecuencias de los indicadores de fragmentación que muestran las tendencias al interior de los rodales de bosque de encino.                                                                                | 21     |
| Gráfica 4  | Distribución de frecuencias de los indicadores de fragmentación para el bosque de táscate, en los periodos de 1956 a 1970 y 1970 a 1993.                                                                                   | 22     |
| Gráfica 5  | Distribución de frecuencias de los indicadores de fragmentación que muestran cambio para el periodo de 1956 a 1970, con una tendencia hacia una fragmentación media de 1956 a 1993, para el bosque de pino.                | 22     |
| Gráfica 6  | Distribución de frecuencias de los indicadores de fragmentación que muestran poco cambio para el periodo de 1956 a 1970 y una tendencia hacia fragmentación media y alta de 1970 a 1993, para el bosque de encino-táscate. | 23     |
| Gráfica 7  | Distribución de frecuencias que muestran una considerable disminución en la fragmentación al interior de los rodales de encino-pino de 1956 a 1993.                                                                        | 23     |
| Gráfica 8  | Distribución de frecuencias que muestran disminución en la fragmentación al interior de los rodales de matorral de pingüica.                                                                                               | 24     |
| Gráfica 9  | Polígonos de frecuencia que muestran poco cambio en las condiciones de fragmentación para el pastizal natural.                                                                                                             | 25     |
| Gráfica 10 | Las curvas muestran el conteo de hectáreas de bosque de encino para cada categoría de fragmentación, en 1956, 1970 y 1993.                                                                                                 | 26     |



## RELACIÓN DE FIGURAS EN ANEXO I

| FIGURA    | DESCRIPCIÓN                                                                                                                                                     | PÁGINA |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Figura 1  | Bosque de <i>Pinus leiophylla</i> cerca de en la Sierra Fría, Aguascalientes, 12 de septiembre de 2003.                                                         |        |
| Figura 2  | Encinar en la Cañada del Abuelo, Sierra Fría, Aguascalientes, 3 de marzo de 2003.                                                                               |        |
| Figura 3  | Ubicación de la zona de estudio en el Municipio de San José de Gracia, del Estado de Aguascalientes.                                                            |        |
| Figura 4  | Mapa "booleano" que incluye toda la zona de estudio. Se muestran los rodales de bosque de encino con valor de 1 y el resto de la zona con valor de 0 para 1956. |        |
| Figura 5  | Un mapa "booleano" multiplicado por la fotografía resulta en un mapa fotográfico que contiene los datos originales solo para un tipo de vegetación.             |        |
| Figura 6  | Mapa de Uso del Suelo en formato vectorial para 1956.                                                                                                           |        |
| Figura 7  | Mosaico fotográfico de la zona de trabajo, en tonos de gris, para 1993.                                                                                         |        |
| Figura 8  | Mapa de índice de fragmentación para bosque de encino de 1956.                                                                                                  |        |
| Figura 9  | Mapa de índice de fragmentación para bosque de encino de 1970.                                                                                                  |        |
| Figura 10 | Mapa de índice de fragmentación para bosque de encino de 1993.                                                                                                  |        |
| Figura 11 | Índices de fragmentación del bosque de encino, escalados a tres categorías para 1956, 1970 y 1993.                                                              |        |



## 1. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento, conservación y restauración de los recursos forestales requiere de la realización de estudios a diferentes escalas. Estas pueden ser a nivel local, en donde los muestreos en campo brindan información puntual acerca de la dinámica de las poblaciones, composición de flora y fauna, interacciones entre las especies que conforman una comunidad, dinámica de ecosistemas y atributos del medio físico que permiten el crecimiento y desarrollo de los organismos (Mueller-Dombois & Elleberg, 1974). A nivel regional, donde se considera la estructura de la vegetación y los procesos dinámicos que se presentan al paso del tiempo dentro de grandes extensiones de terreno, lo que supone un conocimiento substancial de las zonas bajo estudio, así como el uso de técnicas de obtención de información a distancia (Odum, 1972), que permitan registrar los eventos que se presentan como resultado de procesos de cambio, sean de origen natural o antropogénico, en la cubierta forestal. El estudio de estos cambios puede ser un factor determinante para decidir acerca del manejo de los ecosistemas, con el propósito de establecer políticas de restauración, conservación y aprovechamiento sustentable que aseguren la renovación de tales recursos en el futuro.

Las investigaciones que se realizan a nivel local brindan una gran cantidad de información detallada para áreas pequeñas y aquellas que se llevan a cabo a nivel regional proporcionan datos menos detallados, pero tienen la ventaja de que permiten el estudio de grandes áreas y la observación de fenómenos que no serían apreciables directamente en el sitio.

El diagnóstico de las condiciones del territorio a escala media (1:50,000 – 1:250,000), requiere que se tomen en cuenta dos variables: la espacial y la temporal. La primera se refiere a las condiciones de distribución, tamaño, forma, localización y proporción de los componentes de un paisaje en particular y la segunda variable permite discernir la dinámica de tales componentes al paso del tiempo.

En la zona boscosa de la Sierra Fría en Aguascalientes se realizó un diagnóstico espacial y temporal. Para ello se buscó determinar el grado de fragmentación que pudiesen presentar las áreas con arbolado en una superficie de cerca de 150 Km<sup>2</sup>. El fenómeno de fragmentación se refiere a la formación de varias unidades de paisaje o rodales del mismo tipo a partir de una unidad original o matriz (Forman & Godron, 1986). En un paisaje fragmentado, las áreas forestales forman parches o rodales. Este trabajo se hizo utilizando conceptos y metodologías de la ecología del paisaje, en conjunto con las posibilidades de proceso que brindan las funciones de sistemas de información geográfica (Burrough, 1986).

La ecología utiliza el concepto de paisaje en dos formas. La primera, que considera al paisaje como un área específica basada en la escala humana, es intuitiva: los paisajes son sistemas ecológicos que existen a la escala de kilómetros y comprenden elementos reconocibles tales como "parches" o rodales forestales inmersos dentro de una matriz. Los rodales pueden estar constituidos por terrenos de cultivo y arbolados, asentamientos humanos y ecosistemas naturales. El segundo



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

uso de paisaje es una abstracción que representa la heterogeneidad espacial a una escala determinada. En este caso, el paisaje es un criterio dentro de un enfoque espacial para algún sistema ecológico. El enfoque más común es el de la interacción entre los elementos de una matriz, especialmente aquellos que son adyacentes. Este enfoque expone los mecanismos de escala relativamente fina, más allá de la dinámica y estructura de la matriz en su totalidad y trata sobre la dinámica y comportamiento de la matriz, como un total, a gran escala (Forman & Godron, 1986). Los dos enfoques son complementarios y reconocen un mosaico espacial con elementos discretos.

La Sierra Fría, situada en la parte sur de la Sierra Madre Occidental, dentro del estado de Aguascalientes, presenta un mosaico complejo de condiciones geomorfológicas caracterizadas por mesetas y cañadas en donde crecen principalmente bosques de encino (*Quercus* spp), pino (*Pinus* spp), táscate *Juniperus* spp) y bosques mixtos, con pastizales y zonas de matorral (INEGI, 1995). Una buena parte de la Sierra Fría, en su vertiente oriental, pertenece a la cuenca del Río San Pedro por lo que, además de constituir una reserva natural de flora y fauna, representa una zona de captación de agua muy importante en el centro del país.

Esta zona estuvo sujeta a fuertes presiones debido a la extracción de carbón de encino durante la primera mitad del siglo XX (Minnich *et al.*, 1994). Con el aumento en el uso de los combustibles fósiles, cesó en gran medida la actividad de extracción, por lo que se espera un cambio en el sentido del aumento de cobertura de las especies que forman bosques y, por lo tanto, de la homogeneidad de los rodales que los conforman. De lo anterior, se deriva la necesidad de realizar estudios multitemporales que permitan estimar la dinámica de los ecosistemas y establecer las tendencias de recuperación, resultado de los procesos de sucesión.

Asimismo, es probable que los regímenes de incendios forestales en la zona se hayan modificado debido a la intervención humana, lo que significaría la posible acumulación de material combustible tanto en las zonas de arbolado como en las de matorral. Se sabe que los regímenes naturales de incendio, que son principalmente de tipo superficial, constituyen un factor de regulación en el crecimiento y desarrollo de las poblaciones de encino y pino, favoreciendo la germinación y reclutamiento de plántulas de diferentes especies (Minnich *et al.*, 2000; He, 1999). Al modificarse estas condiciones, con el aumento de combustibles, puede provocarse la incidencia de incendios de copa con lo cual se verían afectados los procesos de establecimiento de pinos y encinos con la subsiguiente proliferación de matorrales de pingüica (*Arctostaphylos pungens*) y bosques de Táscate.

La tecnología aeroespacial brinda los materiales necesarios para realizar trabajos de análisis de las condiciones del territorio a distancia, para grandes áreas, gracias al proceso e interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite en formato digital (Johnson, 1969; Lillesand & Kieffer, 1982; Chuvieco, 2001). Para el caso de la Sierra Fría, la problemática de utilizar estos insumos estriba en que, a pesar de que se cuenta con fotografías aéreas que datan de 1956, 1970 y 1993, no se tienen registros de trabajo en campo de esas épocas para comparar los resultados del



análisis, por lo que es necesario utilizar métodos de interpretación que permitan recrear las condiciones de los bosques, en cada fecha, mediante el cálculo de indicadores como podría ser el índice de fragmentación para diferentes niveles de agregación (Hargis, et. al.,1997).

Es importante conocer la dinámica de cambio en los rodales de vegetación de la Sierra Fría y generar información que permita la continuación de los estudios comparativos a futuro, con una metodología básica que pueda modificarse conforme se cuente con recursos informáticos especializados y registros de campo que puedan relacionarse con los datos anteriores así como nuevos cubrimientos fotográficos de la zona e imágenes de satélite recientes.

Este trabajo muestra un enfoque metodológico para el análisis del cambio en la cubierta vegetal de distintas zonas de la Sierra Fría en el Estado de Aguascalientes, a partir de fotografías aéreas para tres fechas: 1956, 1970 y 1993. Asimismo, se aplica un modelo de análisis del grado de fragmentación de la vegetación tanto para toda la zona, como para los rodales de cada tipo de vegetación por separado.

## **1.1 OBJETIVOS**

En este trabajo, se propusieron los siguientes objetivos:

- a) Conocer la estructura horizontal y dinámica del mosaico de rodales de la Sierra Fría
- b) Analizar el proceso de fragmentación de los componentes estructurales.
- c) Generar una base de datos sobre los paisajes de la Sierra Fría.
- d) Diseñar una metodología de análisis sobre la estructura y dinámica de paisajes.

## **1.2 HIPÓTESIS**

Bajo la premisa de que entre 1920 y 1940, hubo una fuerte presión sobre los bosques de la Sierra Fría debido a la extracción de carbón, leña y madera, se formularon las siguientes hipótesis:

- 1) A partir del término de este periodo de disturbio, comienza un proceso de recuperación de la vegetación.
- 2) En este proceso, los rodales de táscate (*Juniperus* spp.) aumentan su cobertura y densidad.
- 3) Los rodales de encino (*Quercus* spp.) y pino (*Pinus* spp.) permanecen sin cambio.
- 4) Los rodales de pingüica (*Arctostaphylos pungens*), permanecen sin cambio.
- 5) Los rodales de pastizal aumentan su superficie.

## **1.3 IMPORTANCIA DE LOS BOSQUES TEMPLADOS EN MÉXICO**

Durante las últimas tres décadas, han aumentado rápidamente los requerimientos de información para el manejo de ecosistemas forestales como resultado de las acciones emprendidas en reuniones de países a favor de un desarrollo sustentable



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

(el Protocolo de Kyoto sobre el Cambio Climático, la Comisión de las Naciones Unidas sobre Desarrollo Sustentable, la FAO, la Convención sobre Biodiversidad, etc.) (Addison, *et. al.*, 1999); y de la demanda pública de información sobre el ambiente y las prácticas y el impacto del manejo forestal que incorporan nuevas técnicas de cartografía predictiva de ecosistemas, escenarios de explotación y manejo que involucran un amplio rango de factores.

En el estudio de los recursos naturales de México, una de las áreas más difíciles de abarcar es la referente al conocimiento de la vegetación, ya que por las características topográficas y altitudinales del país se encuentra gran diversidad de condiciones climáticas y edáficas que determinan la riqueza florística de las regiones naturales. Uno de estos recursos son los bosques, tanto tropicales como de clima templado, que no solo tienen importancia como fuente de materias primas, sino también por los servicios ambientales que ofrecen y por constituir áreas de conservación de la fauna, la flora y el suelo. No menos importante resulta el hecho de que son áreas de recreación y esparcimiento humano.

La producción de las regiones agrícolas depende de un suministro de agua suficiente y oportuno. En la mayoría de los casos, el agua para riego proviene de una zona montañosa más o menos distante del área agrícola. La deforestación de estas cuencas de captación y la consecuente erosión del suelo forestal, pueden ocasionar azolve de presas, así como inundaciones de las zonas agrícolas ubicadas cuenca abajo.

De las formaciones vegetales en México, destacan los pinares y encinares en sus distintas formas (bosque y matorrales), así como las combinaciones de ambos tipos de plantas conocidas con el nombre genérico de bosques de pino-encino.

A pesar de que las especies tradicionalmente consideradas de mayor importancia forestal en México son los pinos, representados por alrededor de 40 *taxa* (especies, subespecies, variedades y formas), solo han sido parcialmente utilizados y estudiados (Rzedowski y McVaugh, 1966). En consecuencia, de las casi 35 especies reconocidas actualmente en el país, sólo algunas son aprovechadas de manera adecuada y unas pocas han sido objeto de investigación científica y tecnológica, para conocer su comportamiento biológico y ubicarlas en una mejor perspectiva dentro de los programas de manejo de recursos (Figura 1).

Comparativamente, los encinos forman otro de los grupos taxonómicos más numerosos y de similar importancia en el país, tanto por su distribución, como por el número de especies, mucho mayor que los pinos en ambos aspectos. De las 300 a 400 especies de *Quercus* spp., en el mundo, México posee entre 150 y 200, (Müller & McVaugh, 1972), cifra que supera con mucho a la de los pinos. Prácticamente en toda la República Mexicana (excepto la Península de Yucatán) se pueden encontrar encinos o robles como elementos fisonómicamente dominantes en tipos de vegetación con clima templado, tropical y subtropical, y como semidominantes o complementarios en otros (Figura 2).



Las áreas de nuestro país cubiertas por bosques templados en donde los encinos y los pinos son dominantes, junto con otras especies arbóreas (Cuadro 1), como es el caso de la Sierra Fría en Aguascalientes, cambian constantemente como resultado de las presiones ambientales y antropogénicas. Las principales causas de disturbio en estos ecosistemas, son los incendios forestales los desmontes con fines de establecimiento de nuevas zonas agrícolas y las actividades pecuarias como el pastoreo intensivo. Estos factores que se manifiestan diferencialmente en el tiempo, producen en el paisaje un mosaico de áreas con diferentes grados de cobertura vegetal o rodales, resultado del proceso de sucesión.

Cuadro 1. Principales especies arbóreas de la Sierra Fría. Fuente: Herbario del Departamento de Uso del Suelo y Vegetación, Dirección General de Geografía, INEGI.

| ESPECIE                                 | NOMBRE COMUN       |
|-----------------------------------------|--------------------|
| <i>Quercus syderoxila</i> H. & B.       | Encino             |
| <i>Quercus rugosa</i> Nee.              | Encino             |
| <i>Quercus potosina</i> Trel.           | Chaparro           |
| <i>Quercus grisea</i> Liebm.            | Encino, Palo chino |
| <i>Quercus eduardii</i> Trel.           | Palo Colorado      |
| <i>Pinus teocote</i> Schl. & Cham.      | Pino               |
| <i>Pinus leiophylla</i> Schl. & Cham.   | Pino               |
| <i>Juniperus deppeana</i> Stand.        | Táscate, Olmo      |
| <i>Juniperus flaccida</i> Schl.         | Olmo               |
| <i>Arbutus xalapensis</i> H. B. K.      | Madroño            |
| <i>Arbutus glandulosa</i> Mart. et Gal. | Madroño            |
| <i>Cupressus lindleyi</i> Klotzch.      | Ciprés             |
| <i>Salix</i> spp.                       | Sauce              |
| <i>Litsea glaucescens</i> H. B. K.      | Laurel             |

#### 1.4 LA TECNOLOGÍA AEROESPACIAL

Las actividades humanas y los fenómenos naturales, ejercen una presión constante sobre los bosques templados, lo cual da como resultado la fragmentación de los ecosistemas originales que formaban una matriz sobre del terreno. Debido a que los disturbios se presentan en diferentes épocas, el estado de colonización y sustitución de formas de vida varía en el espacio, lo cual forma un mosaico de rodales o "parches". Se pueden tener registros más o menos detallados del crecimiento y sustitución de las especies para cada rodal, pero esto lleva tiempo y no es posible registrar la evolución del fenómeno en áreas extensas. Una alternativa para obtener información a corto plazo, es realizar estudios del paisaje con ayuda de fotografías aéreas o imágenes de satélite, que brindan una cobertura sinóptica del terreno para grandes áreas.

La interpretación de fotografías aéreas ha sido empleada desde hace más de 50 años para cartografiar las comunidades vegetales, identificar especies forestales y estudiar los cambios ocurridos debido al proceso natural de sucesión o a la influencia



de otros factores como el fuego, las plagas forestales y la intervención humana (Clouston, 1950; Zsillinsky, 1964; Wickens, 1966).

La fotografía aérea y su interpretación, han mostrado efectividad en el mapeo de tipos y especies forestales, especialmente con la creciente utilización de materiales fotográficos en blanco y negro, a color e infrarrojo color (Colwell, 1960; Lillesand & Kieffer, 1979). Asimismo, las técnicas de identificación de las condiciones del terreno sobre las fotografías, han evolucionado desde la fotointerpretación, hasta las técnicas de análisis de productos en formato digital, apoyadas por el uso de mapas temáticos que representan condiciones del medio físico como clima, geología, geomorfología y suelos, para estudios de la cubierta forestal que integran procesos especializados de análisis espacial (Burrough, 1986).

Los estudios forestales de zonas templadas y la generación de cartografía de vegetación, pueden enriquecerse con la incorporación de exámenes de fotografías aéreas e imágenes de satélite en series de tiempo, que permitan establecer un monitoreo ecológico a corto, mediano y largo plazo (Mas *et. al.*, 2002; Minnich *et. al.*, 1994).

Así, en algunas zonas pueden registrarse los sitios que muestran recuperación de la cobertura vegetal, pero también se pueden detectar aquellos que sufren disturbios y caracterizar, a nivel estructural, la dinámica de sucesión, con el registro subsiguiente de los cambios en productos cartográficos. La cartografía posibilita realizar comparaciones de una misma zona en distintos tiempos. Las técnicas modernas de manejo de las fotografías, su interpretación y la confección de productos cartográficos en formato digital, permiten reducir los tiempos de proceso y obtener resultados de análisis multitemporales a corto plazo con grados de exactitud aceptables.

Las imágenes de satélite que originalmente captaban información a escalas regionales han evolucionado, ya que actualmente proporcionan datos detallados del terreno, lo que posibilita su uso a nivel local. El aumento en la capacidad de los sensores para producir imágenes de alta resolución tanto espectral como espacial, permite obtener información del estado actual de los recursos forestales a escalas similares a las de las fotografías, para grandes extensiones de terreno y a un costo mucho más bajo con relación a los productos fotográficos, tanto en el sentido de su adquisición como en el de su proceso y análisis (Chuvieco, 2002).

Con la información fotográfica o de imágenes y los mapas resultantes del análisis, se generan bases de datos digitales en espacio y tiempo que constituyen un valioso acervo para contribuir al establecimiento de políticas de manejo sustentable de los recursos forestales.

## **1.5 ECOLOGÍA DEL PAISAJE**

La ecología, a través de su historia, consideró únicamente la homogeneidad espacial por conveniencia o simplicidad. Se hizo mucho énfasis en las escalas, las que



prestan una uniformidad aparente a los procesos bajo estudio y la heterogeneidad era considerada como un mal necesario. En contraste, la ecología del paisaje registró a la heterogeneidad espacial como un factor central en los sistemas ecológicos y considera que la dinámica espacial y los fundamentos de la ecología relacionados con la dinámica temporal de los sistemas son de igual importancia. Los factores de la dinámica temporal incluyen el crecimiento y regulación poblacional, la dinámica de la comunidad o sucesión, y la dinámica del cambio evolutivo. Los efectos espaciales de estos factores no eran completamente ignorados antes del advenimiento de la ecología del paisaje (Pickett & Cadenasso, 1995; Antrop, 1999; Forman & Godron, 1986; Elkie, *et. al.*, 1999, Howard & Mitchell, 1980). Una de las raíces más antiguas de la ecología es la biogeografía. De manera similar, la ecología evolutiva contribuyó a la relación con la subdivisión de la población y el papel de la segregación espacial en la diferenciación y especiación de las poblaciones.

La ecología del paisaje debe ser considerada como una ciencia multidisciplinaria que involucra distintos puntos de vista y enfoques de manera holística. Sirve como ejemplo que actualmente existe un enfoque más dirigido a la ecología relacionado con patrones de hábitat, fragmentación, conectividad y otros aspectos de biología de poblaciones, que contrasta con otro enfoque el cual tiene sus raíces en la geografía y por lo tanto incluye parámetros abióticos. De ahí, pueden reconocerse al menos dos puntos de vista fundamentales dentro de la ecología del paisaje: uno biológico y otro geográfico (Bastian, 2001).

El término ecología del paisaje fue acuñado por el bio-geógrafo alemán Carl Troll (en Bastian, 2001) a fines de los años 30's, al realizar trabajos de interpretación de fotografías aéreas para el estudio de la sabana al este de África, en donde reconoce la importancia de los hallazgos científicos debidos al enfoque vertical y funcional de los ecólogos, relacionados con el enfoque espacial y horizontal de los geógrafos. De esto deduce que la Ecología del Paisaje no es únicamente la investigación de los patrones espaciales, sino que además, involucra los más importantes enfoques basados en la dinámica de poblaciones como pueden ser, por ejemplo, los modelos de matriz – corredor – parche, infraestructura ecológica, redes de hábitat, barreras ecológicas, que integran el esqueleto de la calidad y estabilidad ecológica.

Se pueden enumerar varias características generales para definir un paisaje, por ejemplo, en él están incluidos un cúmulo de tipos de ecosistema; todos los puntos dentro de un paisaje son influidos por el mismo tipo general de clima, tienen una geomorfología similar y a través de dicho paisaje puede observarse un conjunto de regímenes similares de disturbio que durante días, años o siglos han contribuido a modelar su aspecto y composición, que se manifiesta en forma de una matriz, en el sentido espacial (no en el sentido matemático), que guarda las condiciones de vegetación y fauna originales, dentro de la que están inmersas áreas mas pequeñas con diferente aspecto y composición de especies denominadas parches, manchas o rodales.



Por lo anterior, se puede ahora definir el paisaje como un área de terreno heterogénea compuesta por un cúmulo de ecosistemas que interactúan y son recurrentes (Forman & Godron, 1986).

Rodal puede ser definido como una superficie que difiere en su apariencia de lo que la rodea. Los rodales varían en tamaño, forma, tipo, heterogeneidad y características de sus límites (Forman & Godron, 1986). Por lo común, los rodales están insertos en una matriz, que es un área circundante con diferente estructura y/o composición de especies. El modo en que se originan los rodales puede ser muy variado e incluye, principalmente, disturbios, heterogeneidad ambiental o actividad humana. Si el proceso de sucesión permanece por tiempo suficiente en un rodal que se originó por incendio, probablemente no podría ser distinguido de la vegetación que lo rodea, a diferencia de otros rodales en donde la condición de heterogeneidad con respecto a la matriz es más durable.

A pesar de que los patrones de paisaje son vistos típicamente como diferencias en topografía y vegetación a escala de kilómetros, los patrones pueden aparecer a cualquier escala y como resultado de alguna discontinuidad como diferencias en disponibilidad de alimento, en temperatura, humedad, propiedades del suelo y algunos otros atributos que atañen a plantas y animales. De cualquier modo, cada discontinuidad se manifiesta como un rodal, que es el elemento básico para la construcción de un patrón de paisaje. El límite inferior en el tamaño de rodal es el grano, o la escala mínima a la cual un organismo puede detectar discontinuidades. Desde el punto de vista humano, el grano es el equivalente al elemento de resolución de un mapa, de una fotografía o una imagen de satélite denominado píxel (del inglés "picture element"), debido a que representa la mínima escala a la cual se pueden representar discontinuidades de los factores bióticos y abióticos en forma de mapa.

El conteo de las variaciones en patrón de dos clases de paisaje se origina de cuatro fenómenos: la representación proporcional de cada clase, la agregación de cada clase dentro de rodales, la frecuencia de distribución de tamaños de rodal y la distribución espacial de los rodales. Estos fenómenos influyen en los patrones de paisaje debido a que generalmente la representación proporcional de cada clase determina que clase forma la matriz del paisaje; la agregación afecta el tamaño, forma y la relación perímetro-área de cada rodal; la distribución de frecuencias de tamaños de rodal crea la textura del paisaje; y la distribución espacial de los rodales determina si los rodales están agrupados o dispersos (Hargis *et. al.*, 1998).

## **1.6 LOS MODELOS DE FRAGMENTACIÓN EN EL ESTUDIO DE LA DINÁMICA DE LA ESTRUCTURA DE LA VEGETACIÓN**

Los diferentes tipos de bosque sufren procesos de deforestación relativamente rápidos. La deforestación no se traduce solamente en una disminución del área forestal, tiene también como consecuencia la parcelación de las superficies residuales, es decir, la fragmentación. En un paisaje fragmentado, las áreas forestales forman parches o rodales. La fragmentación modifica las condiciones ambientales y el funcionamiento de los ecosistemas, alterando el régimen



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

hidrológico, el ciclo de los elementos minerales, el microclima y las propiedades del suelo (Forman & Godron, 1986). La fragmentación de los hábitats en rodales separados, conduce a la reducción de poblaciones sensibles a los intercambios y a los procesos de inmigración, lo que se traduce en la pérdida o el desplazamiento de la biodiversidad (Forman *et. al.*, 1976; Mas y Correa, 2000). El proceso de fragmentación puede darse como resultado de disturbios naturales o como resultado de actividades humanas como la tala con diferentes propósitos o la construcción de caminos y redes de servicios (Tinker *et. al.*, 1998; Heilman *et. al.*, 2002).

El desarrollo de métodos para la simulación de paisajes y otros patrones categóricos de datos espaciales, ha llamado la atención de muchos investigadores (Hargis *et. al.*, 1997; Hargis *et. al.*, 1998; Heilman *et. al.*, 2002; Mas y Correa, 2000; Saura & Martines-Millan, 2000; Tinker *et. al.*, 1998). Sin embargo, los resultados aun son parciales y se carece de un modelo general que considere la diversidad a gran escala de los patrones de paisaje existentes.

Los métodos de simulación pueden clasificarse de manera general en tres grupos: modelos de paisaje neutrales, modelos explícitos de simulación y métodos geoestadísticos de simulación (Saura & Martines-Millan, 2000).

Los modelos de paisaje neutrales, son aquellos que producen un patrón sin considerar los procesos que ocurren en un paisaje, de acuerdo con esto, el proceso modificado de simulación de nubes al azar, puede considerarse como un modelo neutral, dado que no incluye un proceso explicativo de los patrones espaciales resultantes. Entre estos modelos, los de mapas de percolación han sido los más ampliamente usados (Bunn, *et. al.* 2000).

Los modelos explícitos de simulación, reproducen los patrones resultantes de la actuación de ciertos procesos que están incluidos en el modelo, por lo que son modelos explicativos. Un ejemplo de esta categoría es el modelo de Moloney y Levin (1996) que simula la dinámica ecológica temporal y espacial que ocurre específicamente en un pastizal con especies anuales en California. Otro ejemplo es el desarrollado por Li y Reynolds (1993) para simular la fragmentación del paisaje resultante de distintos patrones de corte en zonas forestales.

El grupo de métodos de simulación geoestadística, simula la distribución espacial de variables categóricas y requieren suficiente información acerca de las propiedades estadísticas de los patrones a ser simulados, tales como variogramas, funciones de covarianza, etc. Una de las características más interesantes, es que permiten la simulación de estructuras complejas, mediante algoritmos simples que casi no requieren información previa.

El cálculo de indicadores de fragmentación, ha sido ampliamente utilizado por investigadores interesados en el estudio de la ecología del paisaje (i. e. Hughes *et. al.*, 2001; Hurd *et. al.*, 2002; Riitters *et. al.*, 2000; Wickham *et. al.*, 1999; Fiona, 1997; Schmiegelow *et. al.*, 1997; Tinker *et. al.*, 1998; Rudis, 1995; Petit & Lambin, 2002).



Muchos de los métodos de estudio de la fragmentación del paisaje se generan a partir de modelos sintéticos contruidos tomando como base matrices de valores numéricos (raster), en donde cada dígito es asociado a un tono de gris. De manera similar, la conjunción de mapas de uso del suelo y vegetación, con fotografías aéreas, permiten realizar análisis de patrones de fragmentación del paisaje como un total o al interior de los rodales de cada tipo de vegetación por separado. Las fotografías aéreas en formato digital, que se presentan como archivos raster, permiten asociar las escalas de valores numéricos que los constituyen, con las condiciones de cobertura de la vegetación sobre el terreno, con una clara tendencia a mostrar valores altos de la escala aquellos sitios en donde existe menor cobertura vegetal y, por lo tanto, mayor cantidad de suelo desnudo. Así, se pueden establecer patrones de cobertura que permiten estimar el grado de fragmentación entre tipos de vegetación, así como al interior de los rodales de cada tipo por separado.

Otra forma de expresar el fenómeno de fragmentación del paisaje corresponde al concepto de conectividad de hábitat, lo cual es caracterizado como el grado de facilidad con el que los organismos pueden moverse dentro de un paisaje específico (Söndgerath & Schröder, 2002). Esto depende tanto del patrón espacial del paisaje, como de las características de dispersión de las especies bajo estudio. Sin embargo, se puede afirmar de manera general, que un decremento en la conectividad (o aumento en la fragmentación del hábitat) impacta en la supervivencia de las especies, favoreciendo a aquellas que son generalistas y afectando en mayor grado a las especialistas.

Es importante establecer que, estrictamente, el fenómeno de fragmentación se refiere a la formación de varias unidades de paisaje o rodales del mismo tipo a partir de una unidad original. Sin embargo, puede ocurrir que dentro de una unidad original, no se presente un cambio en su tamaño, es decir en la superficie de terreno que ocupa, sino que se presentan cambios de cobertura al interior de ésta, lo cual constituye también un fenómeno de fragmentación. Un ejemplo de esto puede ser un bosque de encino, en el que se ejerce una presión como resultado de la extracción de leña. El rodal no varía en tamaño, pero al interior del rodal se puede presentar una fragmentación con la extracción de árboles o se puede favorecer su recuperación mediante el reclutamiento natural o la plantación de nuevos individuos.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio abarca la parte occidental del Estado de Aguascalientes, entre los 22° 05' y 22° 15' de Latitud Norte y los 102° 32' y 102° 38' de Longitud Oeste (Figura 3). El grupo de climas presente en la zona es el Seco (B), Semiseco (BS1) y Semiseco Templado (BS1kw) con lluvias en verano y precipitación media anual de 700 mm (García, 1980).

Esta área de estudio se encuentra dentro de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental, en la Subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos. Comprende 3 sistemas



de topoformas: Sierra con Mesetas, Mesetas y Sierras Bajas, dentro de un rango altitudinal de 2000 a 3000 m (DGG, 1981).

La parte montañosa está condicionada a una topografía variable en donde la estructura se encuentra activa tectónicamente, lo cual se manifiesta a través del arqueamiento estructural y disyunción en bloques como resultado del levantamiento. Como reflejo de tal movimiento y de manera simultánea, ocurre una profunda disección del relieve por erosión fluvial al cambiar el perfil longitudinal de las corrientes. De esta manera, al relacionar los efectos de la actividad tectónica y las características de la morfología fluvial, se observa que la profunda disección solo es el resultado de una acelerada erosión regresiva por efectos del levantamiento. Tal fenómeno se expresa por medio de profundos barrancos que se manifiestan a través de toda la unidad montañosa. Las vertientes están siendo modeladas por la erosión fluvial mediante la escorrentía, provocando con ello una rápida pérdida de los suelos, ya que las laderas cóncavas concentran el escurrimiento de las precipitaciones, a diferencia de las laderas convexas en donde el escurrimiento es difuso y no llega a erosionar los suelos (Gómez, 1981).

En cuanto a la Geología, la mayor parte de la zona montañosa presenta un sustrato de rocas ígneas extrusivas ácidas (riolita y toba ácida) del Terciario Superior (CETENAL, 1971). Los suelos presentan unidades predominantemente del tipo Litosol Eútrico con fase lítica (lecho rocoso entre 25 y 30 cm de profundidad) asociadas, por ejemplo, con Cambisol Húmico así como Luvisol Húmico.

Con respecto a la vegetación, el estrato arbóreo está compuesto por bosques de encino en su mayoría y de encino – pino en menor proporción, que se encuentran mejor conservados en los terrenos de propiedad particular, que en los terrenos comunales en los que existe un alto grado de deterioro que se manifiesta por la incidencia de elementos secundarios como pingüica, jarilla (*Dodonea viscosa*), madroño (*Arbutus* spp.) y táscale entre otros (Cuadro 1).

## 2.2 RECURSOS MATERIALES

Fotografías aéreas de la zona:

Fotografías aéreas de marzo de 1956, escala 1:50,000 de la compañía Mexicana Aerofoto, S. A. cortesía de la familia Ortega Villalobos.

Vuelo SINFA del 6 de abril de 1970, escala 1:50,000, altura de vuelo 7060 msnm (INEGI).

Vuelo SINFA del 2 de febrero de 1993, escala 1:37,500, altura de vuelo 7060 msnm, (INEGI).

En adición, se utilizaron los siguientes materiales:

Carta Topográfica escala 1:50,000, F13B88 (INEGI).

Carta de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:50,000 Sierra Fría, Zona Centro (INEGI).



Material digital:

Imagen de satélite LANDSAT TM 1993 de Aguascalientes.  
Ortofotografías digitales escala 1:20,000 A, B, D y E de la  
carta F13B88 (INEGI).

Sistemas de cómputo para el análisis de datos IDRISI V. 32.1 y ArcView 3.2.

## **2.3 GENERACIÓN DE LA BASE DE DATOS**

Para realizar el estudio multitemporal de la zona de interés en forma automatizada, se aplicaron procedimientos de cambio de formato, para convertir el material analógico a digital mediante "scanner" y para normalizar los datos por medio del proceso de georreferencia.

Las fotografías de las primeras dos fechas fueron procesadas para ajustarse en posición y resolución a las ortofotografías de 1993. El procedimiento consistió de los pasos siguientes:

### **2.3.1 CONVERSIÓN DE FORMATO ANALÓGICO A DIGITAL**

La conversión se realizó mediante un dispositivo de barrido (scanner) convencional, mediante el cual se digitalizaron las fotografías con una resolución de 600 puntos por pulgada (dpi), para generar archivos en formato TIF con un tamaño aproximado de 30 Megabytes cada uno.

Cada una de estas fotografías forma una imagen digital que muestra las características de la zona. Sin embargo, los rasgos no guardan una proporción en tamaño y forma con respecto a la condiciones reales sobre del terreno, es decir, poseen distorsión no sistemática de los elementos representados.

La organización de los datos en una imagen digital puede esquematizarse como una matriz numérica, en donde cada elemento de la matriz recibe el nombre de píxel. La orientación aproximada Norte-Sur se expresa a través de las filas o renglones de la matriz, que normalmente reciben el nombre de líneas, mientras las columnas indican la disposición Oeste-Este.

### **2.3.2 CORRECCIÓN GEOMÉTRICA DE LAS FOTOGRAFÍAS**

Con el propósito de unir todas las fotografías de cada fecha para formar un mosaico que represente la totalidad del área de interés, fue necesario aplicar un proceso de corrección geométrica o georreferencia, la cual trata de compensar las distorsiones presentes en las imágenes, que se originan por variaciones en la altitud, latitud, velocidad de la plataforma que lleva la cámara fotográfica a bordo, curvatura de la tierra, desplazamiento por relieve, entre otras, para que la imagen ya corregida tenga la integridad geométrica de un mapa.



El método de corrección se aplicó a cada fotografía utilizando el tradicional procedimiento de ajuste polinomial de la imagen fotográfica a partir de puntos de control coincidentes en posición tanto en la fotografía como en un mapa tomado como referencia cartográfica para el ajuste (Lillesand & Kieffer, 1982). En este caso, se utilizaron como referencia cartográfica para la corrección, las ortofotografías digitales correspondientes a la Carta F13B88 (INEGI, 1993).

Como resultado del ajuste, se obtiene un error medio cuadrático (EMC) para cada punto de control y un EMC general para el conjunto de puntos, en cada fotografía. Para el estudio, solo se consideró como aceptable un EMC general de 8 metros como máximo (4 píxeles), lo que significa que es el máximo desplazamiento aceptable de algún rasgo del terreno representado en cada una de las 38 fotografías procesadas (Cuadro No. 2).

Cuadro 2. Ejemplo de cuadro de puntos de control con sus residuales y error medio cuadrático de cada punto, resultante del proceso de corrección geométrica de la fotografía No. 5, línea de vuelo No. 74 de 1970.

| No. De Punto    | Coordenadas de la fotografía |                 | Coordenadas del mapa |                    | Error medio cuadrático |               |       |
|-----------------|------------------------------|-----------------|----------------------|--------------------|------------------------|---------------|-------|
|                 | Columna                      | Renglón         | Este                 | Norte              | Residual en X          | Residual en Y | EMC   |
| 9               | 2766                         | 929             | 751628               | 2461308            | 2.203                  | 0.705         | 2.314 |
| 12              | 1066                         | 185             | 749296               | 2462361            | -7.187                 | -4.682        | 8.577 |
| 13              | 1193                         | 2084            | 749424               | 2459709            | -1.349                 | 2.002         | 2.414 |
| 14              | 621                          | 2196            | 748648               | 2459673            | 0.129                  | 3.229         | 3.231 |
| 15              | 273                          | 807             | 748208               | 2461496            | 0.749                  | -2.018        | 2.152 |
| EMC en X = 3.01 |                              | EMC en Y = 2.90 |                      | EMC general = 4.01 |                        |               |       |

Se utilizaron al menos 60 puntos de control por fotografía a ser rectificadas, debido a que en las fotografías, a diferencia de las imágenes de satélite, la distorsión aumenta conforme los rasgos se alejan del centro de la escena, por lo que fue conveniente generar una red de puntos situados de manera sistemática en la totalidad de la fotografía, para asegurar el mismo valor de EMC en todo el resultado de la corrección.

Dado que existe diferencia en las escalas de las fotografías para las tres fechas (1956 1:50,000; 1970 1:37,500; 1993 1:20,000), y que a cada escala se tiene diferente grado de detalle de la información plasmada en ellas, se decidió homogeneizar la escala de todas las fechas a 1:50,000, tanto para efectos de la interpretación de los tipos de vegetación presentes, como para la aplicación del modelo de fragmentación utilizado. Asimismo, se considera que el nivel de detalle requerido para el estudio se cumple completamente. Esta escala coincide, además, con la del mapa de uso del suelo y vegetación (1:50,000) de la Sierra Fría que se usó como apoyo para la identificación de tipos de vegetación.



### 2.3.3 GENERACIÓN DEL MOSAICO DE FOTOGRAFÍAS

Una vez terminada la georreferencia de cada fotografía, se procedió a unir las y formar un mosaico para 1956 y otro para 1970. El programa de aplicaciones permite seleccionar todas las fotografías para una fecha y las une considerando las posiciones geográficas y ajustando el contraste de cada una de ellas para homogeneizar el histograma del archivo resultante. Enseguida se realizó el recorte de los archivos de las tres fechas, 1956, 1970 y el mosaico de ortofotografías de 1993, con el propósito de que puedan ser sobrepuestos uno a otro y así realizar las comparaciones con los resultados del análisis de cada uno.

### 2.3.4 DEFINICIÓN DE CATEGORÍAS INFORMATIVAS

Con el mosaico fotográfico de cada fecha se realizó la delimitación de los tipos de cobertura de la zona, considerando únicamente la estructura de la vegetación y utilizando como un modelo el esquema de clases presente en la carta de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:50,000, cuyo grado de generalización se ajusta a la escala de los productos resultantes.

Cuadro 3. Atributos para el mapa de ocupación del suelo generado para las fotografías de 1956, 1970 y 1993.

| POLYID | CLAVE      | DESCRIPCIÓN                                    |
|--------|------------|------------------------------------------------|
| 1      | a          | Matorral de manzanita                          |
| 2      | Ch         | Chaparral                                      |
| 3      | d          | Matorral de Jarilla ( <i>Dodonea viscosa</i> ) |
| 4      | e          | Matorral Espinoso                              |
| 5      | EI         | Erosión-Pastizal Inducido                      |
| 6      | EN         | Erosión Pastizal Natural                       |
| 7      | EQ         | Erosión-Bosque de Encino                       |
| 8      | I          | Pastizal Inducido                              |
| 9      | J          | Bosque de Táscate                              |
| 10     | JQ         | Bosque de Táscate-Bosque de Encino             |
| 11     | La Congoja | Zona Urbana                                    |
| 12     | N          | Pastizal Natural                               |
| 13     | P          | Bosque de Pino                                 |
| 14     | PQ         | Bosque de Pino-Bosque de Encino                |
| 15     | Q          | Bosque de Encino                               |
| 16     | QJ         | Bosque de Encino-Bosque de Táscate             |
| 17     | QP         | Bosque de Encino-Bosque de Pino                |
| 18     | RA         | Agricultura de riego con cultivos anuales      |
| 19     | TA         | Agricultura de temporal con cultivos anuales   |
| 20     | Ag         | Cuerpo de agua                                 |



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Tomando la fotografía como fondo de la pantalla, se trazaron los límites de cada categoría informativa discernible con base en los tipos de tono y textura y se verificó su consistencia con apoyo de la carta de Uso del Suelo y Vegetación de la Sierra Fría, Zona Centro, escala 1:50,000 y de la imagen de satélite LANDSAT TM, ambas de 1993. Simultáneamente, se generó el cuadro de atributos ligado de manera lógica a cada archivo resultante de la delimitación, que contiene la información de tipo de cobertura del terreno, clave e identificador de polígono, indispensable para los procesos de análisis de cambios de una fecha a otra. Los datos se organizaron según la fecha y el tipo de estructura; raster, vector y alfanumérica (Cuadro No. 3).

Con el propósito de aplicar funciones de análisis a los datos resultantes, los mapas de ocupación del suelo para las tres fechas se transformaron a formato matricial (raster), lo que permitió calcular el área ocupada por cada categoría informativa.

## **2.4 TÉCNICAS DE ANÁLISIS**

### **2.4.1 ANÁLISIS POR COMPARACIÓN DE ÁREAS**

La interpretación de los resultados de la delimitación de tipos de vegetación se realizó comparando la extensión en hectáreas de la superficie ocupada por cada tipo en las tres fechas.

Se realizó el cálculo del área ocupada por cada tipo de vegetación y los resultados se compararon mediante una regresión lineal para los intervalos de 1956 a 1970, 1970 a 1993 y 1956 a 1993 con el propósito de establecer si existieron cambios significativos en la extensión de terreno cubierta por encino, pino, táscate, manzanita y pastizal al paso del tiempo.

### **2.4.2 ANÁLISIS DEL NÚMERO DE RODALES POR CATEGORÍA INFORMATIVA**

Otro proceso de análisis consistió en el conteo del número de rodales de vegetación para cada fecha y compararlos entre sí, con el fin de establecer si existió un proceso de fragmentación entre 1956, 1970 y 1993, es decir, si hubo modificación en el número de rodales entre fechas.

Este mismo conteo del número de rodales se realizó de manera separada en cada tipo de vegetación, para establecer si existió un proceso de fragmentación al interior de cada tipo al paso del tiempo.

Lo anterior se realizó mediante la técnica de extracción de rasgos ("feature extraction"), que consiste en reclasificar los valores de los elementos de la matriz de datos asignando un valor de 1 a aquellos píxeles que componen un sólo tipo, por ejemplo, bosque de encino, y un valor de 0 a todos los demás elementos del mapa raster (Figura 4). De aquí se obtiene un mapa que presenta los rodales de un sólo tipo de vegetación, los cuales pueden ser enumerados de manera automática (mapa "booleano" o máscara).



Tesis Tesis Tesis Tesis Tesis

Todos los procesos se realizaron únicamente para las categorías de

- a) Bosque de encino.
- b) Bosque de táscate.
- c) Bosque de pino.
- d) Bosque de encino-táscate.
- e) Bosque de encino-pino.
- f) Matorral de pingüica.
- g) Pastizal.

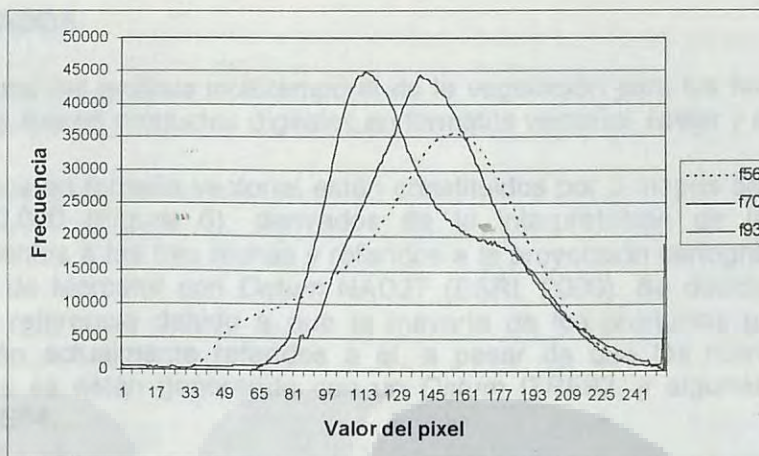
que en su conjunto constituyen más del 80 % de la zona. Por lo tanto se tuvieron tres mapas "booleanos" por cada categoría de vegetación mencionada en el párrafo anterior, lo que permitió el conteo de rodales y su comparación entre fechas. Enseguida se aplicó una función de álgebra de matrices, consistente en la multiplicación del mapa booleano de cada categoría de vegetación y de cada fecha, por el mosaico fotográfico de la fecha correspondiente (Figura 5).

Como ejemplo se puede citar que se realizó la multiplicación del mapa conteniendo únicamente la categoría de bosque de pino para 1956, por el mosaico de fotografías para esa misma fecha. El resultado fue un mapa fotográfico que muestra solo las áreas cubiertas por ese tipo de vegetación con sus valores originales de píxel.

#### **2.4.3 ESTIMACIÓN DE LA COBERTURA DE VEGETACIÓN POR FRECUENCIA DE VALORES DE PÍXEL**

Con el propósito de inferir si existieron cambios en los rodales de cada tipo al paso del tiempo, se procedió a calcular el polígono de frecuencias de valores de píxel de los mapas de cada categoría y para cada fecha, en donde la posición de la curva en el histograma muestra la tendencia hacia una mayor (tonos oscuros) o menor (tonos claros) cobertura del terreno por parte del dosel (Gráfica 1). Es conveniente mencionar que los estados fenológicos poco influyen en esta condición, ya que los pinos y olmos (táscate) son perenifolios y, en el caso de los encinos, aunque existen pocas observaciones sistemáticas al respecto, muchas especies mexicanas de encino son caducifolias. Sin embargo, el periodo de carencia de follaje de la mayor parte de las especies de hoja decídua es breve, con frecuencia menor de un mes y además no siempre coincidente entre una y otra (Rzedowski, 1983).





Gráfica 1. Distribución de frecuencias de los valores de píxel del bosque de encino, para las fotografías de las tres fechas.

#### 2.4.4 ANÁLISIS DE HOMOGENEIDAD DE LOS RODALES MEDIANTE EL CÁLCULO DE ÍNDICES DE FRAGMENTACIÓN

Para poder establecer de manera cuantitativa la tendencia hacia la homogeneidad o heterogeneidad de los rodales de cada tipo de vegetación y para cada fecha, se aplicó un análisis consistente en el cálculo de índices de fragmentación, según la siguiente expresión:

$$F = (n-1)/(c-1)$$

En donde

**F** = Índice de fragmentación.

**n** = número de clases distintas presentes en el núcleo de 3 X 3, 5 X 5 o 7 X 7 píxeles.

**c** = número de celdas consideradas en el núcleo de 9, 25 o 49 (Monmonier, 1974).

En el estudio se utilizó un núcleo de 7 x 7 (49 elementos). Por lo tanto, si el índice de fragmentación tiende a 1, entonces existe mayor fragmentación y si tiende a 0 entonces existe mayor homogeneidad al interior del rodal. El proceso se aplicó por separado y para cada una de las fechas (1956, 1970 y 1993), a los rodales de bosque de encino, bosque de pino, bosque de táscate, bosque mixto de encino táscate, bosque mixto de encino pino, matorral de pingüica y pastizal natural.

Como se mencionó, los índices de fragmentación oscilan de 0 a 1. Para cada resultado, se hizo una reclasificación de los datos a solo 3 categorías: 1 = no fragmentado (F de 0.0 a 0.50), 2 = fragmentado (F de 0.51 a 0.75), 3 = muy fragmentado (F de 0.76 a 1.0).



### 3. RESULTADOS

Los resultados del análisis multitemporal de la vegetación para las fechas de 1956, 1970 y 1993, fueron productos digitales en formatos vectorial, raster y alfanumérico.

Los productos en formato vectorial están constituidos por 3 mapas de vegetación a escala 1:20,000 (Figura 6), derivados de la interpretación de las fotografías correspondientes a las tres fechas y referidos a la proyección cartográfica Universal Transversa de Mercator con *Datum* NAD27 (ESRI, 2000). Se decidió utilizar este sistema de referencia debido a que la mayoría de los productos geográficos en México están actualmente referidos a él, a pesar de que los nuevos productos cartográficos se están generando con un *Datum* ITRF92, y algunas instituciones utilizan WGS84.

Los productos en formato raster son los archivos digitales que corresponden a los tres mosaicos fotográficos, uno de 1956, otro de 1970 y el último de 1993 (Figura 7). Además, se tienen los mapas de vegetación resultantes de la conversión de los vectoriales a raster para las tres fechas.

Cuadro 4. Resultado del cálculo de áreas por tipo de vegetación para cada fecha y resultados de la regresión lineal para cada intervalo de fechas.

| Categoría                               | Hectáreas |        |        |                      |        |        |
|-----------------------------------------|-----------|--------|--------|----------------------|--------|--------|
|                                         | 1956      | 1970   | 1993   |                      |        |        |
| Matorral de pingüica                    | 684.8     | 684.3  | 683.8  |                      |        |        |
| Chaparral                               | 12.1      | 12.9   | 12.1   |                      |        |        |
| Matorral de Jarilla                     | 133.6     | 190.8  | 191.1  |                      |        |        |
| Matorral Espinoso                       | 78.4      | 77.9   | 78.4   |                      |        |        |
| Erosión Pastizal Inducido               | 18.4      | 18.6   | 18.6   |                      |        |        |
| Erosión Pastizal Natural                | 28.3      | 25.4   | 25.4   |                      |        |        |
| Erosión Bosque de Encino                | 127.8     | 127.8  | 125.5  |                      |        |        |
| Pastizal Inducido                       | 569.3     | 448.0  | 448.1  | Coef. de correlación |        |        |
| Bosque de Táscate                       | 177.7     | 207.9  | 227.0  | 56-70                | 56-93  | 70-93  |
| Bosque mixto de Táscate - Encino        | 2514.7    | 2548.6 | 2518.7 | 0,9996               | 0,9996 | 0,9999 |
| Zona Urbana                             | 5.0       | 5.9    | 11.6   |                      |        |        |
| Pastizal Natural                        | 1228.5    | 1201.6 | 1194.8 |                      |        |        |
| Bosque de Pino                          | 253.7     | 279.6  | 281.6  |                      |        |        |
| Bosque mixto de Pino-Encino             | 1389.7    | 1365.1 | 1385.2 |                      |        |        |
| Bosque de Encino                        | 5421.6    | 5418.3 | 5428.1 |                      |        |        |
| Bosque mixto de Encino - Táscate        | 2243.8    | 2258.0 | 2255.4 |                      |        |        |
| Bosque mixto de Encino - Pino           | 1245.7    | 1274.0 | 1272.4 |                      |        |        |
| Agríc. de riego con cultivos anuales    | 179.2     | 173.7  | 180.0  |                      |        |        |
| Agríc. de temporal con cultivos anuales | 61.5      | 54.8   | 53.6   |                      |        |        |
| Cuerpos de Agua                         | 0         | 24.8   | 6.9    |                      |        |        |

El análisis de la superficie estudiada se basó en la observación de 4 parámetros. La superficie, número, cobertura y fragmentación de los rodales. El análisis comparativo



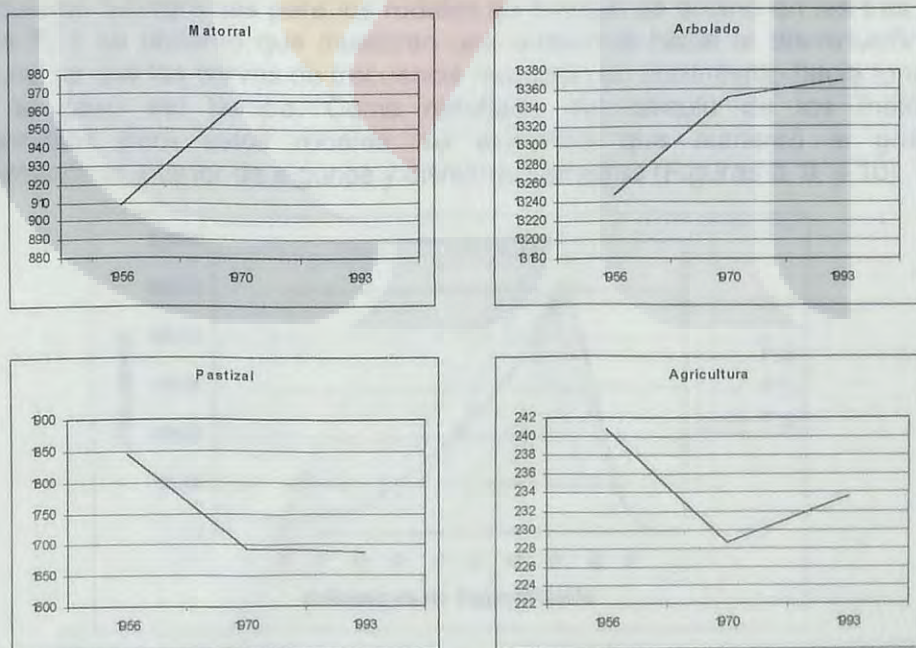
de cada tipo de vegetación para las 3 fechas, muestra que, en general, en la zona de estudio, no hubo grandes cambios al paso del tiempo (Cuadro 4). Los coeficientes de correlación generales para cada intervalo son muy cercanos a 1. Sin embargo, algunos de los tipos de vegetación mostraron cambios claramente perceptibles: el bosque de pino (categoría 13), el matorral de jarilla (categoría 3) y el bosque de táscate (categoría 9), tuvieron un incremento en superficie. El pastizal natural (categoría 12) y el pastizal inducido (categoría 8), en cambio, presentaron una reducción.

Cuadro 5. Número de hectáreas de agrupaciones de tipos de vegetación por estructura, para las tres fechas.

|      | Matorral    | Arbolado    | Pastizal    | Agricultura |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1956 | 909.0481748 | 13247.28379 | 1844.817574 | 240.7502922 |
| 1970 | 966.0676438 | 13351.67678 | 1693.648041 | 228.5468103 |
| 1993 | 965.5811051 | 13368.9329  | 1687.017349 | 233.6602693 |

Se agruparon los tipos de vegetación por estructura y se sumaron las hectáreas de agrupaciones para las tres fechas. Matorral incluye pingüica, chaparral, jarilla y matorral espinoso. Arbolado incluye encino, pino, táscate y bosque mixto. Pastizal incluye inducido y natural. Agricultura incluye riego y temporal (Cuadro 5).

Se observa que el matorral, el arbolado aumentan en superficie, principalmente en el periodo de 1956 a 1970 y entre 1970 y 1993 se mantienen más o menos constantes, mientras que el pastizal y la agricultura disminuyen en superficie (Gráfica 2).



Gráfica 2. Número de hectáreas por año de los tipos de vegetación agrupados por estructura.



También se comprobó si los tipos de vegetación para la totalidad del área, sufrieron un proceso de fragmentación, mediante el conteo del número de rodales. De esto se obtuvo como resultado que en 1956 se tenían 198 rodales en total de todos los tipos de ocupación del suelo, en 1970, 210 rodales y en 1993, 209 rodales (Cuadro 6).

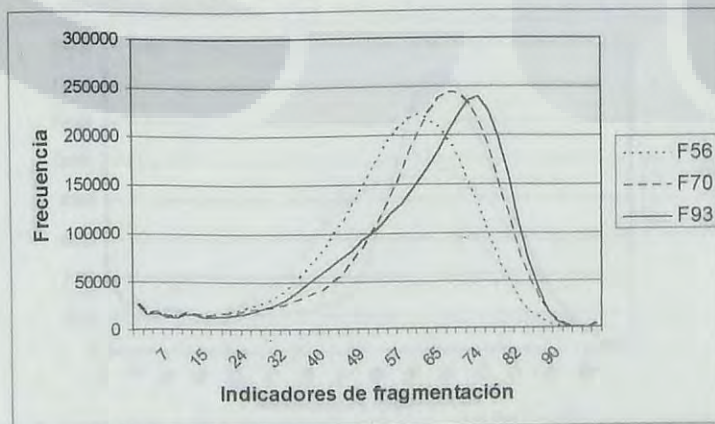
Aunque en las dos últimas fechas se registró un incremento en el número de rodales, esto no se considera suficientemente significativo como para pensar que hubo un proceso substancial de fragmentación en la zona, por lo que se realizaron los procesos encaminados a verificar la magnitud e índole de los cambios para cada tipo de vegetación por separado.

Cuadro 6. Número de rodales por fecha, por tipo de vegetación.

| Tipo de vegetación \ Fecha | 1956 | 1970 | 1993 |
|----------------------------|------|------|------|
| Bosque de encino           | 53   | 60   | 57   |
| Bosque de táscate          | 6    | 10   | 10   |
| Bosque de pino             | 12   | 13   | 13   |
| Bosque de encino – táscate | 28   | 30   | 29   |
| Bosque de encino – pino    | 11   | 13   | 13   |
| Matorral de pingüica       | 16   | 16   | 18   |
| Pastizal                   | 17   | 17   | 15   |

### 3.1 BOSQUE DE ENCINO

Se calcularon histogramas para los rodales de bosque de encino en las tres fechas (Gráfica 2) y se observó que muestran una tendencia hacia la disminución en la cobertura, ya que las curvas de frecuencia muestran un corrimiento hacia tonos más claros al paso del tiempo. Como resultado del cálculo de los índices de fragmentación para estos rodales, se evidenció que aumentó el grado de fragmentación al interior de algunos y disminuyó en otros (Figuras 8, 9, y 10).

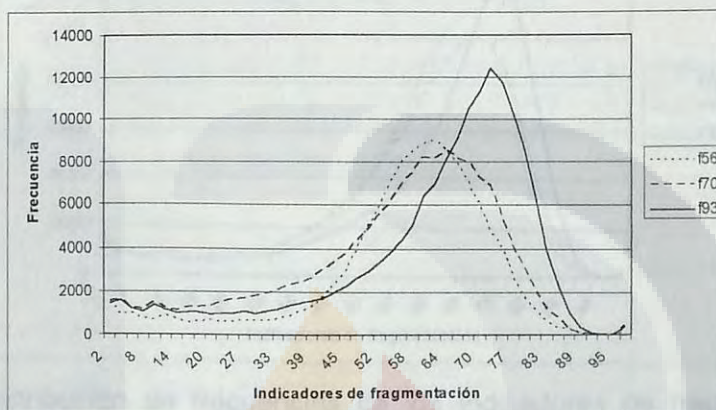


Gráfica 3. Distribución de frecuencias de los indicadores de fragmentación que muestran las tendencias al interior de los rodales de bosque de encino.



### 3.2 BOSQUE DE TÁSCATE

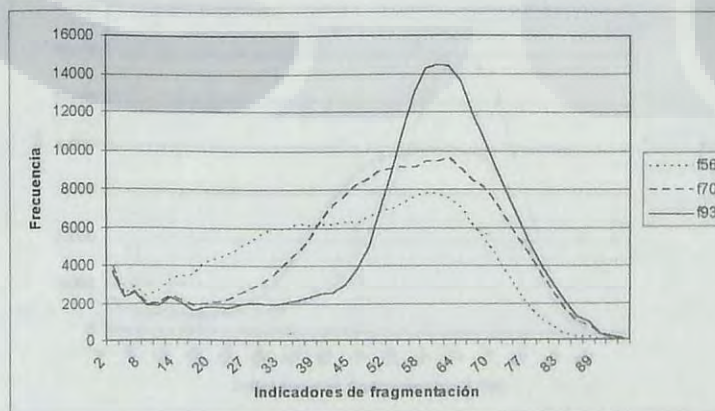
En el caso del bosque de táscate, se encontró que no se modificó el número de rodales durante las tres fechas, en cambio se registró un aumento en la superficie cubierta por este tipo de vegetación (Cuadro 4.). En relación con la fragmentación, no se observaron cambios para el periodo de 1956 a 1970, pero, si se observaron cambios para el periodo 1970 a 1993, en donde se presentó una franca tendencia hacia la alta fragmentación en todos los rodales.



Gráfica 4. Distribución de frecuencias de los indicadores de fragmentación para el bosque de táscate, en los periodos de 1956 a 1970 y 1970 a 1993.

### 3.3 BOSQUE DE PINO

El bosque de pino presentó un incremento en superficie. Sin embargo, no hubo modificación en el número de rodales al paso del tiempo. A diferencia de los bosques de encino y táscate, se observó una tendencia hacia la fragmentación media Gráfica 4).

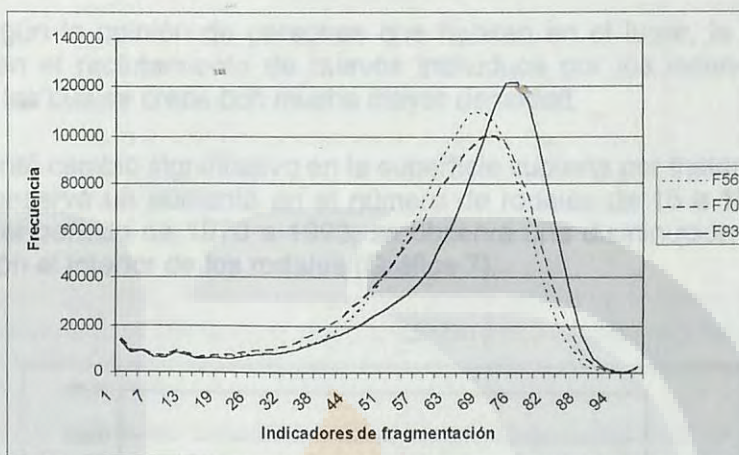


Gráfica 5. Distribución de frecuencias de los indicadores de fragmentación que muestran cambio para el periodo de 1956 a 1970, con una tendencia hacia una fragmentación media de 1956 a 1993, para el bosque de pino.



### 3.4 BOSQUE DE ENCINO - TÁSCATE

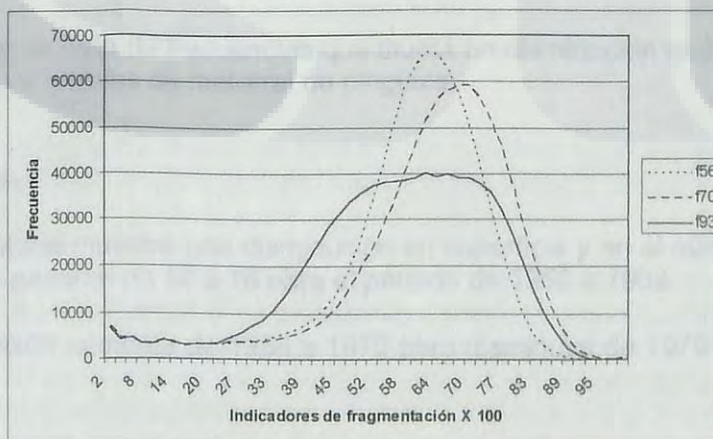
El bosque de encino-táscate no mostró un cambio significativo en el número de rodales de una fecha a la otra. En cambio, se presentó una tendencia hacia la fragmentación media y alta para el periodo 1970 a 1993.



Gráfica 6. Distribución de frecuencias de los indicadores de fragmentación que muestran poco cambio para el periodo de 1956 a 1970 y una tendencia hacia fragmentación media y alta de 1970 a 1993, para el bosque de encino-táscate.

### 3.5 BOSQUE DE ENCINO - PINO

En el bosque mixto de encino-pino, aumentó la superficie entre 1956 y 1970. El grado de fragmentación se mantiene de media a baja para los dos periodos, lo cual implica una recuperación en este tipo de vegetación (Gráfica 6).



Gráfica 7. Distribución de frecuencias que muestran una considerable disminución en la fragmentación al interior de los rodales de encino-pino de 1956 a 1993.

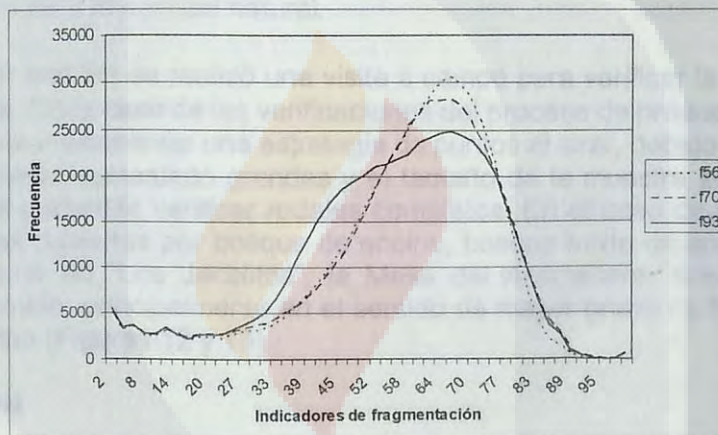


### 3.6 MATORRAL DE PINGÜICA

Otro tipo de vegetación que se encuentra muy bien representado en la zona es el matorral de pingüica que, al igual que el táscale, se establece principalmente en aquellos sitios en donde el encinar ha sido eliminado.

Además, según la opinión de personas que habitan en el lugar, la pingüica se ve favorecida en el reclutamiento de nuevos individuos por los incendios forestales, después de los cuales crece con mucha mayor densidad.

No se presentó cambio significativo en la superficie cubierta por matorral de pingüica, pero si se observó un aumento en el número de rodales de 15 a 18, entre 1956 y 1993. Para el periodo de 1970 a 1993, se observa una disminución en el grado de fragmentación al interior de los rodales (Gráfica 7).



Gráfica 8. Distribución de frecuencias que muestran disminución en la fragmentación al interior de los rodales de matorral de pingüica.

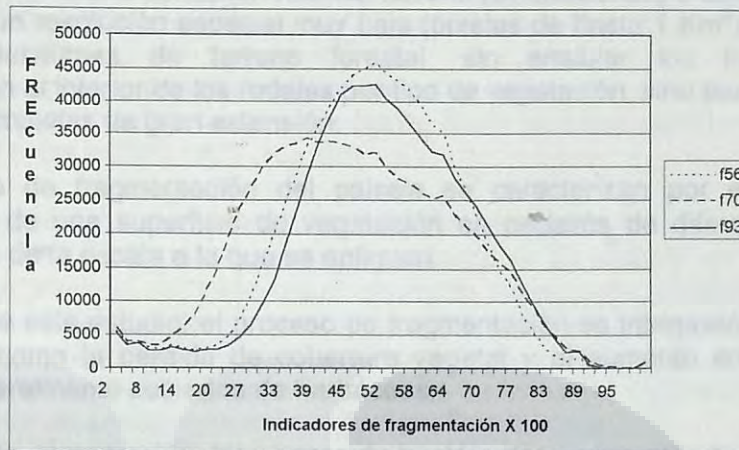
### 3.7 PASTIZAL

El pastizal natural muestra una disminución en superficie y en el número de rodales. Estos últimos pasaron de 18 a 16 para el periodo de 1956 a 1993.

La fragmentación aumenta de 1956 a 1970 pero disminuye de 1970 a 1993 (Gráfica 8).

Con respecto al grado de fragmentación se puede observar que la mayoría de los rodales de este matorral están en la categoría de fragmentación de 10 a 15.





Gráfica 9. Polígonos de frecuencia que muestran poco cambio en las condiciones de fragmentación para el pastizal natural.

Al término del análisis se realizó una visita a campo para verificar la coincidencia de los resultados. En el caso de las verificaciones del proceso de productos digitales, no es conveniente implementar una estrategia de puntos al azar, debido a que las zonas son por lo común demasiado grandes y el tamaño de la muestra sería insuficiente, por lo que es preferible verificar rodales completos. En el caso de este estudio, se visitaron áreas cubiertas por bosque de encino, bosque mixto de encino – táscate y bosque de pino en “Los Jacalitos”, la Mesa del Aserradero, que son sitios que mostraron cambio, principalmente en el sentido de mayor grado de fragmentación al paso del tiempo (Figuras 12 y 13).

#### 4. DISCUSIÓN

Es conveniente realizar algunas consideraciones referentes tanto a los datos utilizados para el estudio, como a los procedimientos aplicados a los datos como apoyo para el análisis.

El periodo en el que los disturbios fueron más intensos ocurrió entre 1920 y 1940, pero las fotografías más antiguas analizables por el método aplicado en este estudio datan de 1956.

Esto significa que entre 1940 y 1956 no se tiene registro de lo ocurrido en la zona y se supone que correspondió a un periodo de transición, en el que fue disminuyendo paulatinamente la presión sobre del recurso forestal debida a la extracción de madera y por lo tanto comenzó un periodo paulatino de recuperación del encinar y el pinar, con procesos de colonización de zonas abiertas por parte del táscate y la pingüica.

Con respecto al uso del modelo de fragmentación se puede comentar que la mayoría de los estudios de esta índole citados en la bibliografía, utilizan modelos raster que



no corresponden a una condición real del terreno (simulaciones) o utilizan imágenes de satélite con resolución espacial muy baja (píxeles de hasta 1 Km<sup>2</sup>), para abarcar grandes extensiones de terreno forestal, sin analizar los fenómenos de fragmentación al interior de los rodales por tipo de vegetación, sino para formaciones vegetales completas de gran extensión.

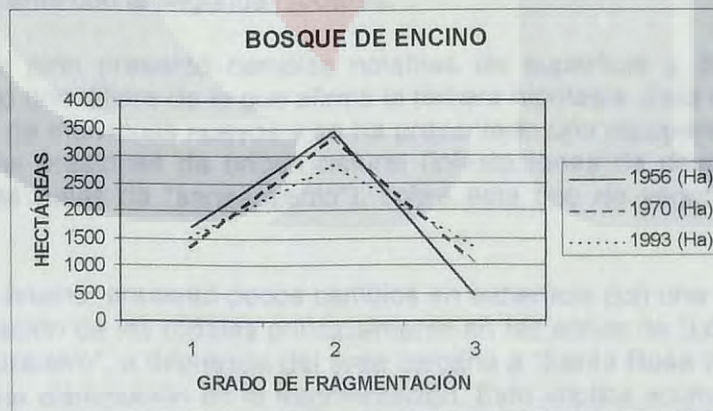
Los estudios de fragmentación del paisaje se caracterizan por el análisis del rompimiento de una superficie de vegetación en pedazos de diferentes tamaños dependiendo de la escala a la que se apliquen.

En el caso de este estudio, el proceso de fragmentación se interpretó, al interior de cada rodal, como la pérdida de cobertura vegetal y el aumento en los espacios abiertos generalmente cubiertos de herbáceas.

Al realizar una comparación del número de hectáreas que pasaron de una condición de baja fragmentación (o alta cobertura) a una de media o alta fragmentación, se puede establecer en que periodo se presentó mayor presión sobre cada uno de los tipos de vegetación considerados (Gráfica 9).

Cuadro 7. Número de hectáreas por grado de fragmentación, para bosque de encino en 1956, 1970 y 1993.

| Categoría               | 1956 (Ha)  | 1970 (Ha)  | 1993 (Ha)  |
|-------------------------|------------|------------|------------|
| Fragmentación baja (1)  | 1701.40161 | 1325.85524 | 1517.3045  |
| Fragmentación media (2) | 3429.16694 | 3333.21263 | 2833.90797 |
| Fragmentación alta (3)  | 463.325934 | 1038.68504 | 1347.39347 |



Gráfica 10. Las curvas muestran el conteo de hectáreas de bosque de encino para cada categoría de fragmentación, en 1956, 1970 y 1993.

Tal es el caso del bosque de encino, en el que entre 1956 y 1970, 39.7 hectáreas de este bosque en la zona pasaron de una condición de baja fragmentación a una de alta fragmentación y entre 1970 y 1993, 21 hectáreas pasaron de una condición de



baja a alta fragmentación. Lo anterior indica que hubo mucha más presión en el periodo de 1956 a 1970 y disminuyo sensiblemente de 1970 a 1993 (Fig. 11).

Un ejemplo de áreas que muestran gran deterioro, son la Mesa del Aserradero y Los Jacalitos, mientras que en la zona de Santa Rosa de Lima se manifiesta algo de recuperación entre 1970 y 1993 (Fig. 20).

La tendencia general a una menor fragmentación en algunos rodales de bosque de la Sierra Fría traerá como consecuencia el aumento de biomasa y, en el periodo de sequía que se presenta cada año, de combustible. Esto puede provocar incendios de copa en dichos bosques. Por ello es importante implementar un plan de manejo que evite el daño de los incendios sobre las casas de campo y los poblados, y que mejore las condiciones de aprovechamiento de los recursos mediante la regulación de las prácticas pecuarias y de extracción de leña y madera.

## 5. CONCLUSIONES

El análisis comparativo de cada tipo de vegetación para las 3 fechas, muestra que, en general, en la zona de estudio, no hubo grandes cambios al paso del tiempo. En la primera hipótesis se supone que la zona de estudio presenta una recuperación. Esto no se pudo comprobar. Se supone que al terminar o disminuir la presión ejercida sobre el arbolado se esperaría una clara mejoría y no es así. Es probable que la tasa de aprovechamiento del arbolado sea igual a la recuperación, por ello no se aprecia un aumento en cobertura.

Sin embargo, algunos de los tipos de vegetación mostraron cambios claramente perceptibles: el bosque de táscate, tuvo un incremento en superficie y cobertura, lo que es consistente con la segunda hipótesis.

El bosque de pino presentó cambios notables de superficie y cobertura, éstas aumentaron, lo que difiere de lo que afirma la tercera hipótesis. Esto indica que hubo reclutamiento de individuos nuevos y se ha presentado una recuperación moderada a pesar de las presiones de origen natural (infestaciones de descortezadores) o antropogénicas (talas de "saneamiento"), sobre este tipo de vegetación (Soriano, 2003).

El bosque de encino, presentó pocos cambios en superficie con una clara tendencia a la fragmentación de los rodales principalmente en las zonas de "Los Jacalitos y la Mesa del Aserradero", a diferencia del área cercana a "Santa Rosa de Lima" en que se observa una disminución en la fragmentación. Esto implica acumulación en esta última zona de biomasa al paso del tiempo, con una tendencia a baja fragmentación (cobertura alta). La hipótesis número 3, señala que no habría cambios en este tipo de vegetación. Esta hipótesis fue parcialmente correcta ya que efectivamente no hubo cambios significativos en el tamaño de los rodales, pero si los hubo con el incremento o disminución de espacios abiertos al interior de los mismos.



El matorral de pingüica, no presentó cambios en superficie, pero si aumentó el número de rodales. Se observa, además, una disminución en el grado de fragmentación al interior de los mismos.

La pingüica, es un recurso como alimento del ganado, sus frutos son consumidos por fauna silvestre y sus troncos son apreciados como leña, por lo que existe una explotación intensiva sobre este tipo de vegetación y por lo que se mantiene al paso del tiempo sin dar lugar al establecimiento de especies de mayor talla resultantes de procesos de sucesión.

El pastizal natural y el pastizal inducido presentaron una reducción en superficie, lo cual no coincide con lo que se menciona en la hipótesis número cinco.

Por otra parte, los rodales de bosques mixtos (bosques con elementos de latifoliadas y aciculifolios), aparecen menos fragmentados, por lo que se considera que son los tipos de vegetación que no han sido tan explotados en la zona o que aunado a la disminución de latifoliadas se registra un aumento en aciculifolios.

El método utilizado en este trabajo ha permitido generar una metodología para el estudio de los cambios en la cubierta vegetal, a partir del análisis de fotografías aéreas de diferentes fechas. Asimismo, se ha contribuido a mejorar el acervo de información que será útil para la toma de decisiones que permitan un aprovechamiento sostenible del área natural protegida Sierra Fria.



## 11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Addison, P, R. Morrison & R. Quenet. 1999. A national forest information system for Canada", Proceedings of the GIS 99 Conference, Vancouver, BC, Canada **1**: 235-237.

Antrop, M. 1999. Background concepts for integrated landscape analysis. Agriculture, Ecosystems and Environment **77**: 17-28.

Bastian, O. 2001. Landscape ecology – towards a unified discipline? Landscape Ecology **16**: 757-766.

Bunn, A. G., R. L. Urban & T. H. Keitt. 2000. Landscape connectivity: a conservation application of graph theory. Journal of Environmental Management **59**: 256-278.

Burrough, P. A. 1986. Principles of geographic information systems for land resources assessment. Oxford University Press. New York. USA. 237 p.

CETENAL. 1971. Cartas geológicas F13d17, F13d18, F13d19, F13b78, F13b87 y F13b88 escala 1:50,000. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. México.

Chuvieco, E. 2001. Elementos de teledetección aeroespacial. Ed. RIALP. Madrid. España. 147-182.

Clouston, G. 1950. The use of aerial photographs in the range inventory work on the national forests. Photogramm. Eng. **16**: 329-331.

Colwell, R. N. 1960. Some uses of infrared aerial photography in the management of wildland areas. Photogramm. Eng. **26**: 774-785.

DGG. 1981. Carta fisiográfica Guadalajara, escala 1:1,000,000. SPP. México.

Elkie, P. C., R. S. Rempel & A. P. Carr. 1999. Patch analyst user's manual: a tool for quantifying landscape structure. Northwest Science & Technology. Ontario. Canada. Technical Manual TM-002.

ESRI, 2000. Understanding map projections. N. Y. USA.

Forman, R. T. T., A. E. Galli & C. F. Leck. 1976. Forest size and avian diversity in New Jersey woodlots with some land use implication. Ecology **26**:1-8.

Forman, R. T. T. & M. Godron. 1986. Landscape ecology. John Wiley & Sons. N. Y. USA **3**: 83-119.

García, M. E. 1980. Apuntes de climatología. UNAM. México.



Gómez, R. J. 1981. Método climático de fina en la aplicación de la agricultura en el Estado de Aguascalientes. Fac. de Filosofía y Letras. Colección Cuadernos UNAM. México.

Hargis, C. D., J. A. Bissonette & J. L. Davis. 1997. Understanding measures of landscape pattern. *Wildlife and Landscape Ecology*. John Wiley & Sons. N. Y. USA. **9**: 231-261.

Hargis, C. D., J. A. Bissonette & J. L. Davis. 1998. The Behavior of landscape metrics commonly used in the study of habitat fragmentation. *Landscape Ecology* **13**: 167-186.

He, H. S. 1999. Spatially explicit and stochastic simulation of forest-landscape fire disturbance and succession. *Ecology*. <http://www.findarticles.com>.

Heilman, G. E., J. R. Strittholt, N. C. Slosser & D. A. Dellasala. 2002. Forest fragmentation of the conterminous United States: assessing forest intactness through road density and spatial characteristics. *BioScience*. Vol. 52, No. **5**: 411-422.

Howard, J. C. Mitchell. 1980. Phyto-geomorphic classification of the landscape. *Geoforum* **11**: 85-106.

Hughes, F. M. R., W. M. Adams, E. Muller, C. Nilsson, K. S. Richards, N. Barsoum, H. Decamps, R. Foussadier, J. Girel, H. Guillo, A. Hayes, M. Johansson, L. Lambs, G. Pautou, J. L. Peiry, M. Perrow, F. Vautier & M. Winfield. 2001. The importance of different scale processes for the restoration of floodplain woodland. *Regul Rivers: Res Mgmt*. **17**: 325-345.

Hurd, J., E. Wilson & D. Civco. 2002. Development of a forest fragmentation index to quantify the rate of forest change. *Proc. of Annual Conference and Fig XXII Congress. ASPRS. USA*.

INEGI, 1995. Carta de uso del suelo y vegetación de la Sierra Fría, Zona Centro, escala 1:50,000. México.

INEGI, 1993. Ortofotografías digitales F13B88 B, C, D, y E. México.

Johnson, P. I. 1969. Remote sensing in ecology. University of Georgia Press. USA 196 p.

Li, H. & J. F. Reynolds. 1993. A new contagion index to quantify spatial patterns of landscapes. *Landscape Ecology* **8**: 155-162.

Lillesand, T. M. & R. W. Kieffer. 1982. Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons. N. Y. USA. 612 p.



Mas, J. F. y S. J. Correa. 2000. Análisis de la fragmentación del paisaje en el área protegida "Los Retenes", Campeche, México. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. México. **43**: 42-59.

Mas, J. F., Velásquez, A., Palacio-Prieto, J. L., Bocco, G., Peralta, A. y Prado, J. 2002. Assessing forest resources in México: wall-to-wall land use/cover mapping. Phot. Eng. & Rem. Sens. Vol. 68 No. 10.

Minnich, R. A. J. Sosa Ramírez, V. E. Franco, W. J. Barry. y D. M. Siqueiros. 1994. Reconocimiento preliminar de la vegetación y de los impactos de las actividades humanas en la Sierra Fría, Aguascalientes, México. Investigación y Ciencia, UAA, número **12**: 23-29.

Minnich, R. A., M. G. Barbour, J. H. Burk & J. Sosa Ramírez. 2000. Californian mixed-conifer forests under unmanaged fire regimes in the Sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. Journal of Biogeography, **27**: 105-129.

Moloney, K. A. & S. A. Levin. 1996. The effects of disturbance architecture on landscape-level population dynamics. Ecology **77**: 375-394.

Monmonier, M.S. 1974. Measures of pattern complexity for choropleth maps, The American Cartographer, **1**, **2**: 159-169.

Mueller-Dombois, D. & H. Ellemberg. 1974. Aims and methods of vegetation ecology. John Wiley & Sons. N. Y. USA. 256 p.

Müller, C. H. & R. McVaugh. 1972. The Oaks (*Quercus* spp.) described by Nee (1801) and by Humbolt & Bonpland (1809), with comments on related species. Contr. Univ., Michigan. USA. **9**: 507-522.

Odum, P. E. 1972. Ecología. Ed. Interamericana. México. 588-593.

Petit, C. & E. Lambin. 2002. Impact of data integration technique on historical land-use/land-cover change: Comparing historical maps with remote sensing data in the Belgian Ardennes. Landscape Ecology. **17**: 117-132.

Pickett, S. T. A. & M. L. Cadenasso. 1995, Landscape ecology: spatial heterogeneity in ecological systems. Science, **269**: 331-334.

Riitters, K., J. Wickham, R., O'Neill, B. Jones, & E. Smith. 2000. Global-scale patterns of forest fragmentation. Conservation Ecology. **4**(2): 3. USA.

Rudis, V. 1995. Regional forest fragmentation effects of bottomland hardwood community types and resource values. Landscape Ecology. **10**: 291-307.

Rzedowski, J. y R. McVaugh. 1966. La vegetación de Nueva Galicia. Michigan Herbarium, Univ., of Michigan. **9**: 55-68.



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Rzedowski, J. 1983. Vegetación de México. Ed. LIMUSA. México. 267-268 pp.

Saura, S. & J. Martínez-Millán. 2000. Landscape patterns simulation with a modified random clusters method. *Landscape Ecology* **15**: 661-678.

Schmiegelow, F., C. Machtans & S. Hannon. 1997. Are boreal birds resilient to forest fragmentation? An experimental study of short-term community responses. *Ecology*. **78**: 1914-1931.

Söndgerath, D. & B. Schröder. 2002. Population dynamics and habitat connectivity affecting the spatial spread of populations – a simulation study. *Landscape Ecology* **17**: 57-70.

Soriano, V. S. 2003. Estudios de escarabajos descortezadores del pino del género *Dendroctonus* en la Sierra Fría, Aguascalientes; especies, distribución y manejo con feromonas. Tesis de Maestría. UAA. México.

Tinker, D., C. Resor, G. Beauvais, K. Kipfmüller, C. Fernandes & W. Baker. 1998. Watershed analysis of forest fragmentation by clear cuts and roads in a Wyoming forest. *Landscape Ecology*. **13**: 149-165.

Wickens, G. E. 1966. The practical application of aerial photography for ecological surveys in the savannah regions of Africa. *Photogrammetria* **21**: 31-41.

Wickham, J., K. Bruce, K. Riitters, T. Wade & R. O'Neill. 1999. Transitions in forest fragmentation: implications for restoration opportunities at regional scale. *Landscape Ecology*. **14**: 137-145.

Zsilinsky, V. G. 1964. The Practice of photo interpretation for a forest inventory. *Photogrammetria* **19**: 42-58.



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

# A N E X O : F I G U R A S

TESIS TESIS TESIS TESIS





Figura 1. Bosque de *Pinus leiophylla* en la Sierra Fría, Aguascalientes, 12 de septiembre de 2003.





Figura 2. Encinar en la Cañada del Abuelo, Sierra Fria, Aguascalientes, 3 de marzo de 2003.



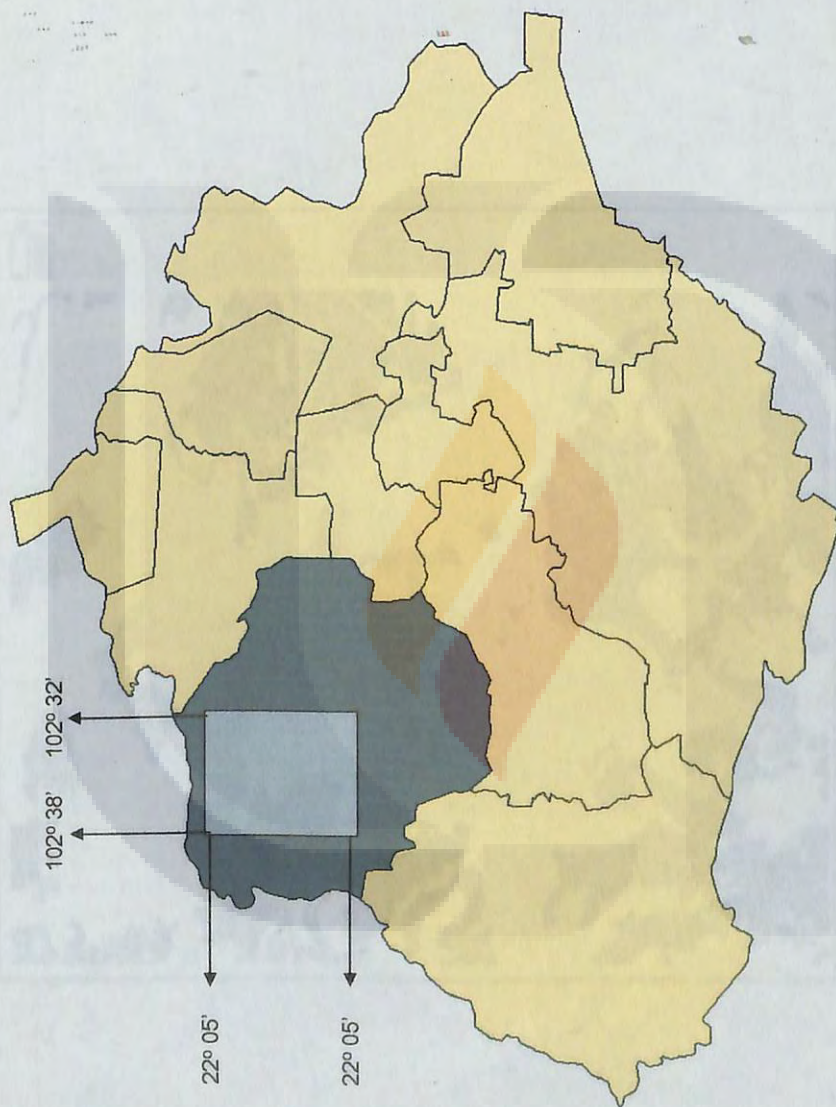


Figura 3. Ubicación de la zona de estudio en el Municipio de San José de Gracia, del Estado de Aguascalientes.



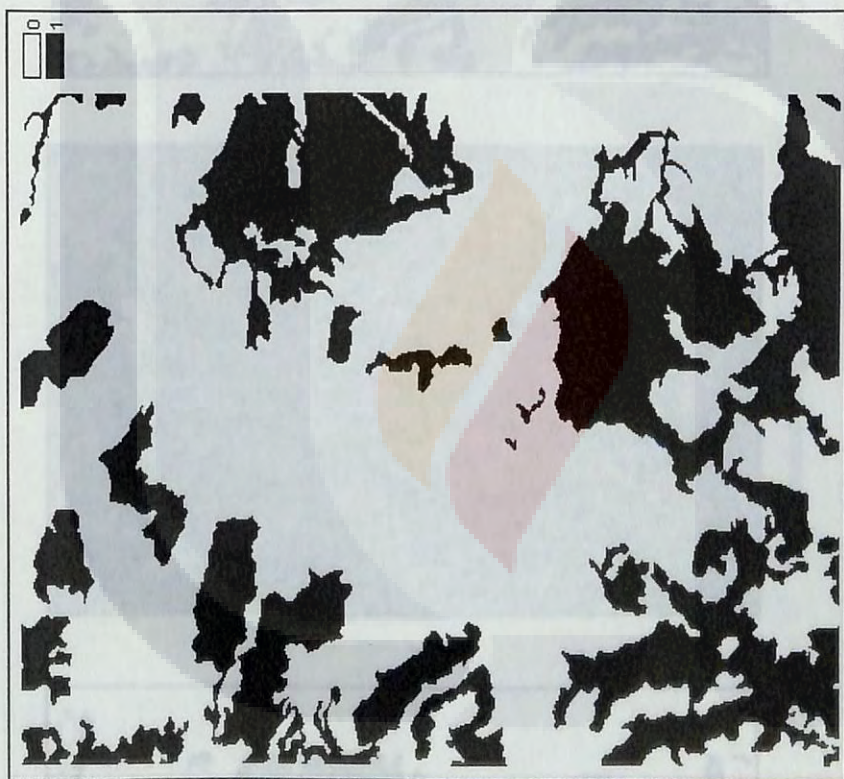
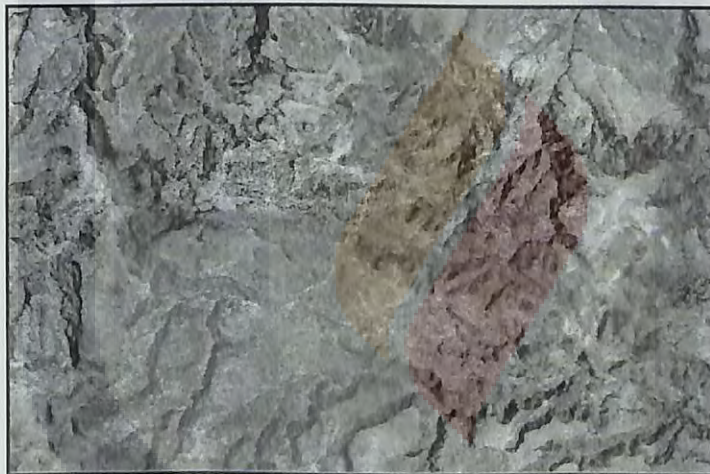


Figura 4. Mapa "booleano" que incluye toda la zona de estudio. Se muestran los rodales de bosque de encino con valor de 1 y el resto de la zona con valor de 0 para 1956.

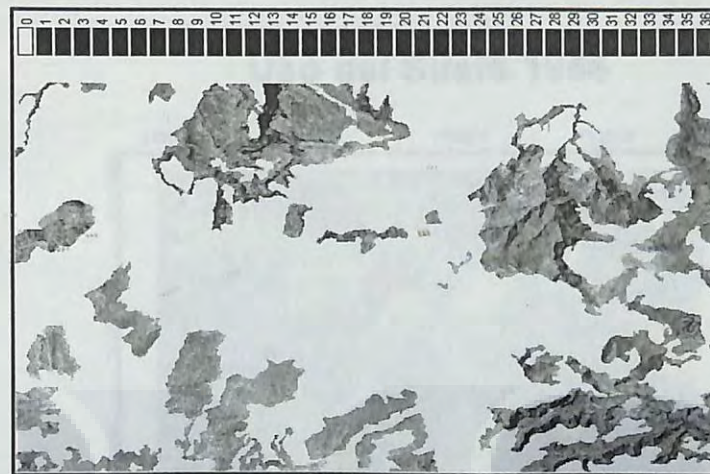




Encino en 1956



mosaico fotográfico 1956



Datos de encino en la fotografía

Figura 5. Un mapa "booleano" multiplicado por la fotografía resulta en un mapa fotográfico que contiene los datos originales solo para un tipo de vegetación.



## Uso del Suelo 1956

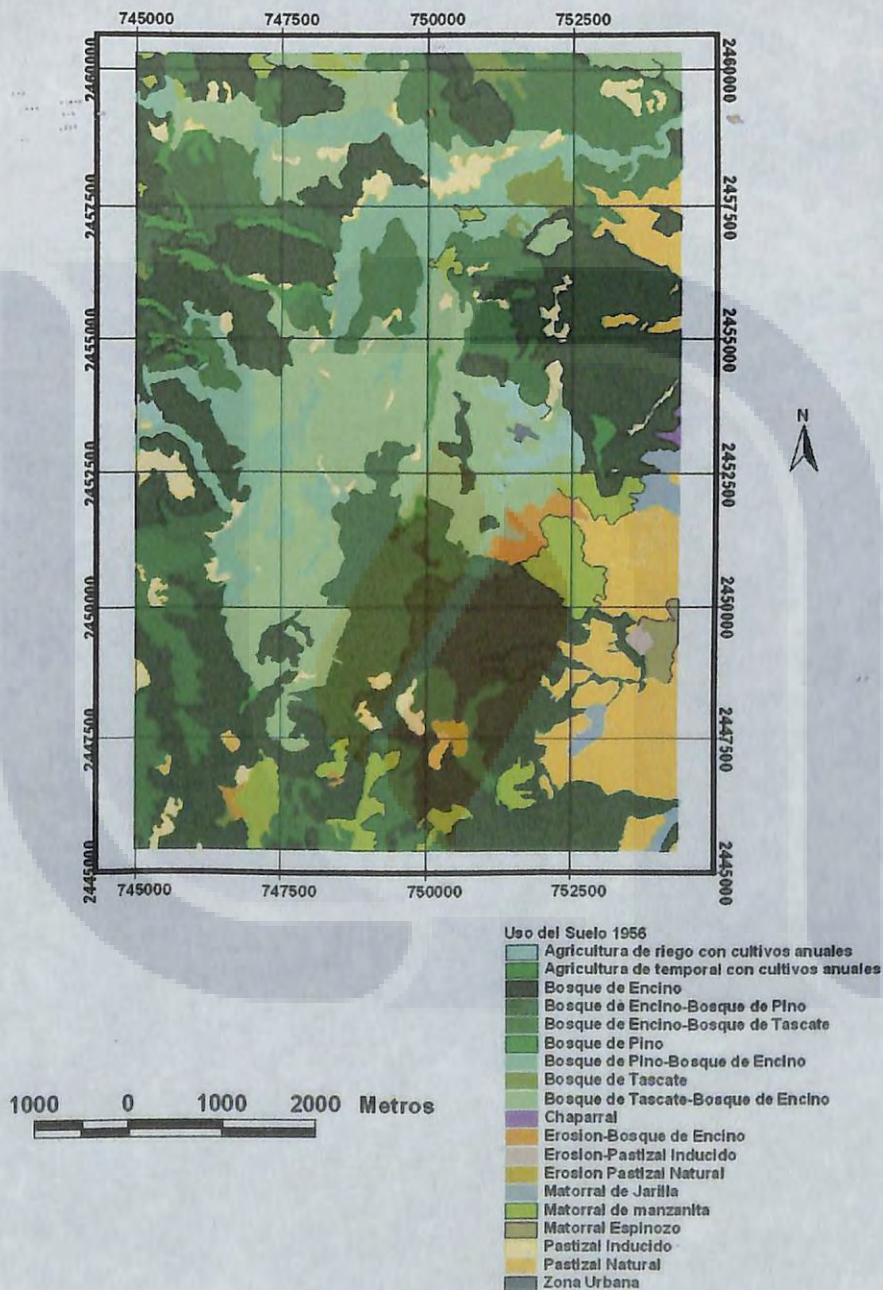


Figura 6. Mapa de Uso del Suelo en formato vectorial para 1956.





Figura 7. Mosaico fotográfico de la zona de trabajo, en tonos de gris, para 1993.



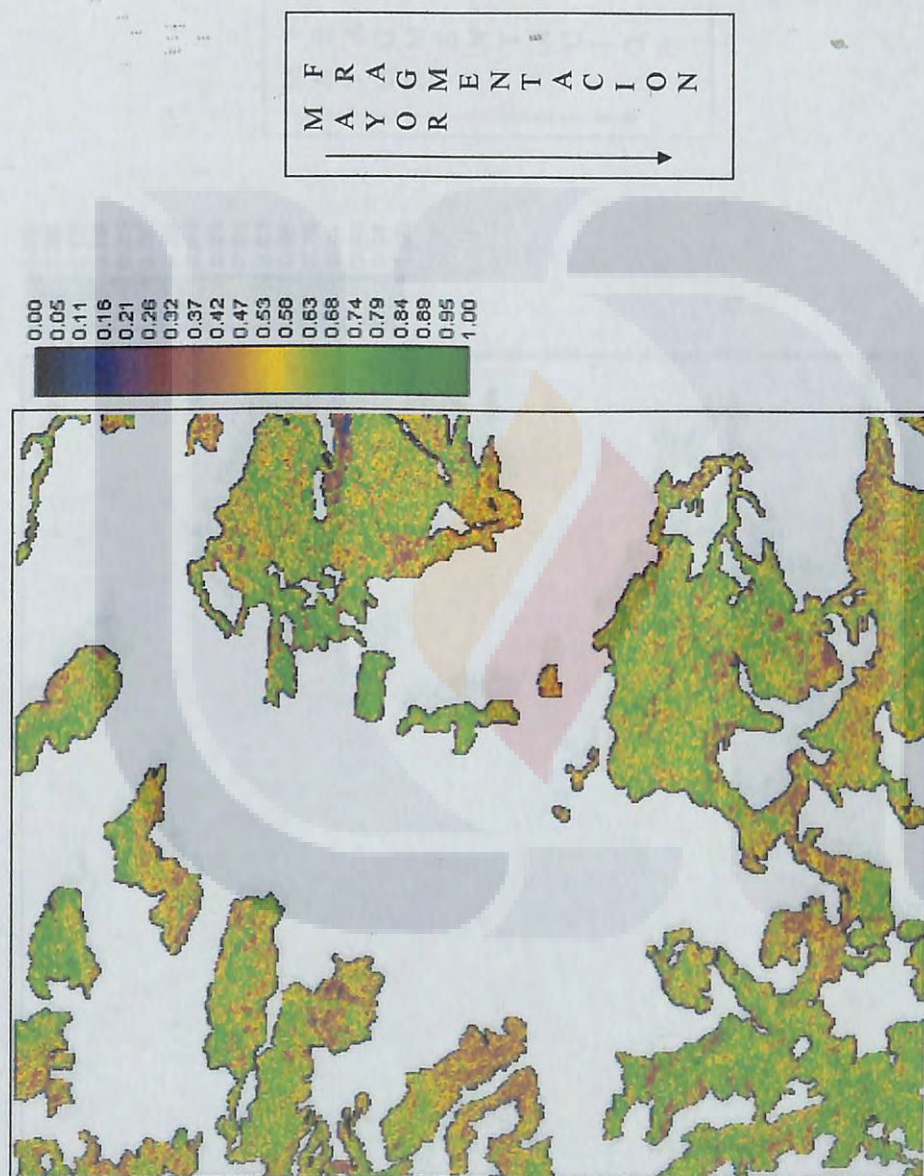


Figura 8. Índice de fragmentación para bosque de encino en 1956.



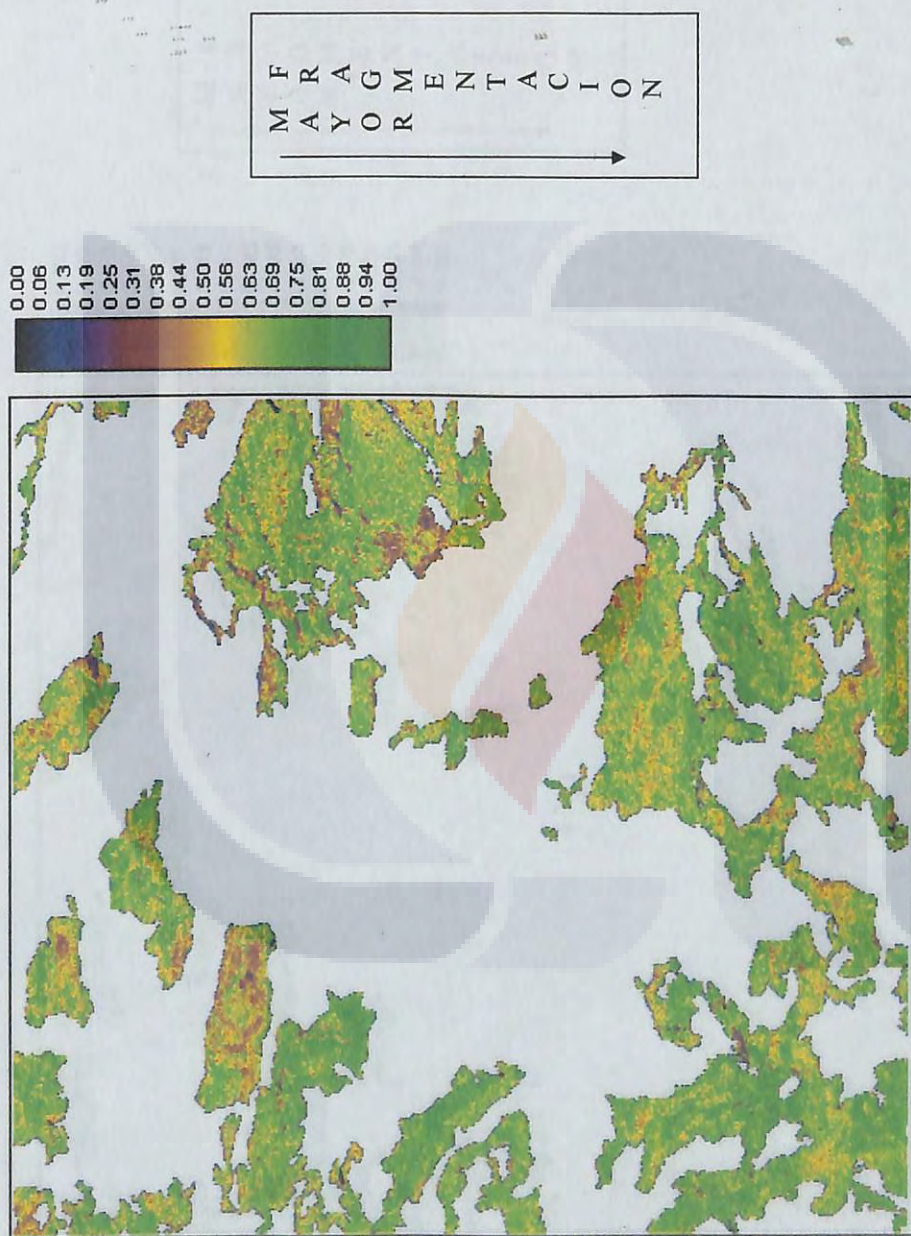


Figura 9. Índice de fragmentación para bosque de encino en 1970.



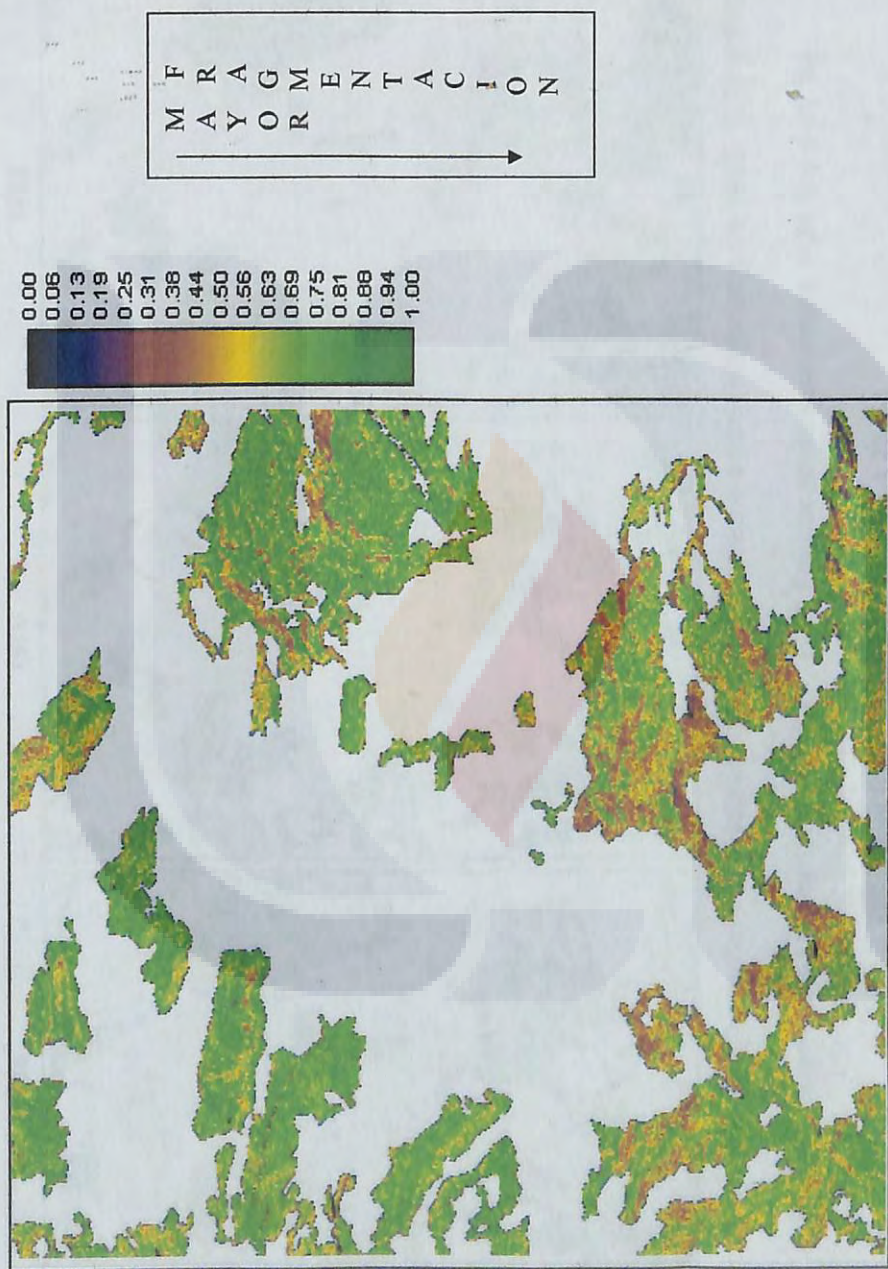


Figura 10. Índice de fragmentación para bosque de encino en 1993.





Figura 12. Ejemplos de una zona de encinar muy fragmentado en "Los Jacalitos" (arriba) y muestras de los "tocones" resultado de la tala de encinos (abajo). Fotos del 10 de noviembre de 2003.





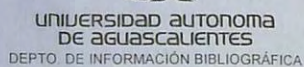
Figura 13. Antiguos encinares ahora deteriorados, con reclutamiento de individuos de táscate (arriba) y matorral de pingüica con alta cobertura (abajo), en la Mesa del Aserradero. Fotos del 10 de noviembre de 2003.



02 DIC. 2003



000002



## CONTROL DE DEVOLUCIÓN

[illegible]

DGPDdoaa280203